

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université de Tlemcen.
Faculté de Technologie
Département de Génie Electrique et Electronique

Thèse de Doctorat en Sciences en Productique

Intitulée :

**Investigations sur la sélection de routages alternatifs en
temps réel basées sur les métaheuristiques
-les essais particulaires-**

Présentée le : *Mardi 27 Novembre 2012*

Par :

SOUIER Mehdi

Devant le Jury :

Président :

GHOUALI Nouredine Professeur Université de Tlemcen, Algérie.

Examineurs :

YALAOUI Farouk Professeur Université de Technologie de Troyes, France.
MEBARKI Nasser Maître de Conférences Université de Nantes, France.
NOUBAT Wahid Maître de Conférences Université de sciences et de la technologie
d'Oran, Algérie.

Encadreur :

SARI Zaki Professeur Université de Tlemcen, Algérie.

Table des matières

Remerciements	iv
Introduction générale	1
Chapitre 1 L'ordonnancement dans les systèmes flexibles de production	5
1.1. Introduction	5
1.2. La présentation des systèmes flexibles de production	6
1.2.1 Définitions et spécificités	6
1.2.2 Classifications des systèmes flexibles de productions	7
1.2.3 Les Problèmes posés pendant l'implémentation des systèmes flexibles de production	8
1.2.3.1 La phase de conception	9
1.2.3.2 La phase d'exploitation	9
1.3. Généralités sur l'ordonnancement	10
1.3.1 Définition	10
1.3.2 Les contraintes	10
1.3.3 Les objectifs de l'ordonnancement	11
1.4. Modélisation et présentation des problèmes d'ordonnancement dans les systèmes flexibles de production	11
1.4.1 Spécificités des décisions d'ordonnancement dans les systèmes flexibles de productions	12
1.4.2 Facteurs influant sur les décisions d'ordonnancement dans les systèmes flexibles de production	14
1.4.3 Classification des approches de résolution des problèmes d'ordonnancement dans les systèmes flexibles de production	16
1.4.3.1 Aperçu sur les approches classiques	18
1.4.3.1.1 Méthodes de résolution exactes	18
1.4.3.1.2 Méthodes de résolution approchées	18
1.4.3.2 Aperçu sur les approches issues de l'intelligence artificielle	19
1.4.3.2.1 La logique floue	19
1.4.3.2.2 Les réseaux de neurones	19
1.4.3.2.3 Les métaheuristiques	20
1.4.3.2.4 Les systèmes experts	20
1.4.3.2.5 Les systèmes multi agents	20
1.5. Aperçu sur les travaux d'ordonnancement dans les FMS avec flexibilité de routages	21
1.5.1 L'importance de la flexibilité de routage dans un FMS	21
1.5.2 La mesure de la flexibilité de routage	22
1.5.3 L'analyse de l'effet de la flexibilité de routages sur les performances des FMS	24
1.5.4 Les approches proposées pour la résolution des problèmes de routages de pièces	27
1.5.5 Synthèse sur les recherches dans le domaine d'ordonnancement dans les FMS avec flexibilité de routage	32
1.6. Conclusion	33
Chapitre 2 Un état de l'art sur les Métaheuristiques	35
2.1. Introduction	35
2.2. Notions de bases liées aux problèmes d'optimisation	36
2.2.1 Définition d'un problème d'optimisation	36
2.2.2 Classes de complexité	37
2.2.3 Principales méthodes de résolution	37
2.3. Généralités sur les métaheuristiques	38

2.3.1	Définitions et caractéristiques.....	40
2.3.2	Classification des métaheuristiques.....	41
2.3.3	Concepts principaux de la modélisation des métaheuristiques.....	42
2.3.3.1	La représentation de la solution.....	43
2.3.3.2	La fonction objectif.....	43
2.3.4	Aperçu sur les métaheuristiques les plus répandues.....	43
2.3.4.1	Les métaheuristiques à solution unique.....	44
2.3.4.1.1	Le recuit simulé.....	44
2.3.4.1.2	La recherche tabou.....	45
2.3.4.2	Les métaheuristiques à population de solutions.....	46
2.3.4.2.1	Les colonies de fourmis.....	46
2.3.4.2.2	Les algorithmes génétiques.....	48
2.3.4.2.3	Les essais particuliers (Particle Swarm Optimization : PSO).....	49
2.4.	Conclusion.....	53
Chapitre 3 Un algorithme à base des essais particuliers pour les décisions de routages de pièces.....		54
3.1.	Introduction.....	54
3.2.	La présentation du modèle FMS étudié.....	56
3.3.	Les décisions de routages des pièces.....	58
3.3.1	Un modèle mathématique pour les décisions de routages des pièces.....	58
3.3.2	La description de l'algorithme OEP discret.....	61
3.4.	Un système logiciel pour l'évaluation des performances de métaheuristiques.....	63
3.4.1	La philosophie du système.....	64
3.4.2	Le design du système.....	65
3.4.2.1	Le sous système de modélisation.....	66
3.4.2.2	Le sous système de simulation.....	66
3.5.	L'analyse de sensibilité de l'algorithme OEP proposé.....	67
3.5.1	L'effet de la structure de l'essaim (taille de population).....	68
3.5.2	L'effet des paramètres comportementaux (w , C_1 et C_2).....	70
3.6.	Analyse de l'effet de règles de séquençement combinées avec l'algorithme OEP proposé.....	72
3.6.1	Les décisions de séquençement de machines.....	72
3.6.2	Résultats et interprétations.....	73
3.7.	Analyse de l'effet de la combinaison de l'algorithme OEP avec les décisions de lancement de pièces.....	75
3.7.1	Les décisions de lancement de pièces.....	76
3.7.2	Résultats et interprétations.....	77
3.8.	Conclusion.....	79
Chapitre 4 Un algorithme à base des essais particuliers pour le ré-ordonnancement en temps réel dans un environnement incertain avec flexibilité de routages.....		80
4.1.	Introduction.....	80
4.2.	L'ordonnancement sous incertitude.....	81
4.2.1	La notion de l'incertitude (sources et définition).....	81
4.2.2	La classification et la modélisation des incertitudes.....	82
4.2.3	Classification des approches d'ordonnancement en présence d'incertitudes.....	84
4.2.3.1	Les approches proactives.....	85
4.2.3.2	Les approches réactives.....	85
4.2.3.3	Les approches proactives- réactives.....	86
4.3.	Un algorithme de ré-ordonnancement en temps réel basé sur les essais particuliers.....	86
4.3.1	Une stratégie de ré-ordonnancement en temps réel pour la sélection de routages des pièces.....	87

4.3.2	L'adaptation d'un algorithme OEP pour le ré-ordonnancement en temps réel	89
4.4.	Analyse de sensibilité de l'algorithme OEP proposé.....	92
4.4.1	L'effet de la taille de la population.....	92
4.4.2	L'effet du facteur d'inertie w et les coefficients de confiance C_1 et C_2	94
4.5.	Vérification de l'efficacité de l'approche proposée dans un contexte incertain	95
4.6.	Analyse de l'effet de l'interaction de l'approche proposée avec des règles de séquençement..	98
4.7.	Analyse de l'effet de la combinaison avec des règles de lancement	100
4.8.	Conclusion	103
Chapitre 5 Les effets de la flexibilité de routages et des décisions d'ordonnancement sur les performances d'un système flexible de production sous incertitudes.....		104
5.1.	Introduction.....	104
5.2.	Motivations et objectifs.....	105
5.3.	La description du modèle FMS hypothétique.....	107
5.4.	Analyse de l'effet de la flexibilité de routage et les approches proposées pour les décisions de routages des pièces.....	110
5.5.	Analyse de l'effet de la flexibilité de routages et les règles de séquençement.....	115
5.6.	Analyse de l'effet de règles de lancement et les niveaux de flexibilité de routage	119
5.7.	Conclusion	121
Conclusion et perspectives.....		123
Annexe.....		128
Références bibliographiques		133

Remerciements

Cette page ne figure pas par tradition dans ce mémoire, mais c'est plutôt un devoir moral qui me pousse à la faire pour exprimer ma reconnaissance sincère à tous ceux qui ont apporté une contribution dans la réalisation de ce travail.

Je tiens tout d'abord à remercier Monsieur Zaki SARI, Professeur à l'université de Tlemcen et le directeur du laboratoire de productique de Tlemcen, pour la confiance qu'il m'a accordé en acceptant de diriger cette thèse et sa patience de la suivre jusqu'à son aboutissement. Je le remercie profondément pour son attention, sa bienveillance et son appui sans faille qui ont été des encouragements décisifs pour mener à terme ce travail. Sans ses qualités rares au niveau humain et scientifique, le développement et l'achèvement de ce travail n'auraient été possibles.

Je suis sincèrement reconnaissant à vous, Monsieur SARI. J'ai un grand honneur et une grande chance d'avoir un encadreur comme vous.

Je voudrais également remercier les personnes qui me font l'honneur d'accepter de participer au jury de cette thèse :

- Monsieur Noureddine GHOUALI, Professeur à l'université de Tlemcen. Il était derrière un accord CMEP qui m'a permis de bénéficier d'un stage scientifique à l'université de Nantes. Qu'il trouve ici toute ma reconnaissance pour cela et pour avoir accepté de présider le jury de cette thèse, malgré sa très lourde charge.
- Monsieur Farouk YALAOUI, Professeur à l'université de technologie de Troyes, pour l'intérêt qu'il a porté à mon travail et pour le temps qu'il a consacré en acceptant d'être rapporteur. Les commentaires et les conseils qu'il m'a donnés lors de congrès (CCCA 11, ICIEM 12) ont toujours été très fructueux pour moi. Je suis très honoré par leur présence dans ce jury.
- Monsieur Nasser MEBARKI, Maître de conférences à l'université de Nantes, que j'ai connu en septembre 2011, lors de mon court séjour à Nantes. Durant cette période, il m'a appris beaucoup de choses et j'ai eu beaucoup de plaisir à travailler et à discuter avec lui. Depuis ce temps, il a toujours répondu à toutes mes sollicitations et questions. Je le remercie vivement pour ses conseils, sa gentillesse qui n'a d'égal que sa culture scientifique et pour sa participation à ce jury.
- J'adresse également mes remerciements à Monsieur Wahid NOUIBAT, maître de conférences à l'université de sciences et de la technologie d'Oran qui a accepté d'être rapporteur et de participer au jury.

Cette thèse ne se serait pas passée dans d'aussi bonnes conditions sans les autres membres du laboratoire de productique. J'adresse mes remerciements à eux pour leur patience et leur bonne humeur, qui ont su faire régner dans le laboratoire une atmosphère studieuse et chaleureuse.

Je tiens aussi à mentionner le plaisir que j'ai eu à travailler au sein de l'école préparatoire en sciences économiques, commerciales et de gestion de Tlemcen et à l'université de Tlemcen, et j'en remercie ici tous les collègues, pour leur gentillesse, leur amitié.

Malgré que tous les mots restent faibles pour exprimer mes sentiments, qu'ils trouvent à travers ce travail les fruits et la récompense de leurs efforts. Je remercie mes parents pour leur soutien moral, spirituel et leur tolérance durant toutes mes années d'études. J'espère que le dieu me donne la force et le courage pour que je puisse rendre leurs sacrifices.

Mes remerciements vont aussi à mes proches et aux membres de ma famille en particulier mes deux sœurs, dont les encouragements et le soutien ont été indispensables à l'aboutissement de mes études.

Je voudrais remercier tous ceux qui ont facilité ma tâche et m'ont permis de mener à bien ce travail ainsi que ceux qui m'ont aidé dans mes études, et que je n'ai pas pu citer.

Enfin, je remercie Dieu tout puissant de la patience et de la volonté qu'il m'a donné pour réaliser ce travail.

Introduction générale

Actuellement, la dynamique des marchés a évolué, le contexte industriel est devenu largement ouvert sur l'étranger, et à cause de la nature de la consommation actuelle caractérisée par une forte demande de personnalisation à des prix bas, les entreprises manufacturières ont dû s'adapter pour rester compétitives dans cet environnement caractérisé par des conditions en perpétuel changement.

Afin de pouvoir conquérir de nouveaux marchés et de faire face à cette concurrence qui ne cesse de s'accroître et à un marché de plus en plus fluctuant, les entreprises qui visent à améliorer leurs performances en satisfaisant au mieux les demandes et les besoins de leurs clients tout en minimisant les coûts et les délais de production, ont besoin de compenser ces conditions changeantes. Pour y arriver, ils sont contraints d'améliorer leur productivité tout en augmentant la qualité des produits fabriqués et ont besoin d'être réactives à ces changements au moment opportun pendant la fabrication. En plus, selon Saenz de Ugarte [**Saenz de Ugarte 09**] toute entreprise souhaitant rester compétitive doit proposer à ses clients de la valeur ajoutée additionnelle tels qu'une flexibilité accrue, un plus grand choix d'options, un meilleur respect des délais.

Ces compromis entre les contraintes de contrôle des coûts et la qualité de production, le besoin de la réactivité et de flexibilité en termes de produits peuvent être instaurés au niveau des systèmes flexibles de production. Ce sont des systèmes capables de s'adapter à une possible évolution de l'environnement et de présenter une diversité de produits avec différentes séquences. Ils peuvent changer rapidement de produits et de séquences de produits sans perdre leur productivité. Ils fournissent donc des avantages divers comme l'augmentation de l'utilisation des ressources, l'augmentation de la productivité, la réduction des en-cours...

Ces bénéfices sont à condition qu'il soit possible d'obtenir le bon produit, palette, support, ou outil, à la bonne place au bon moment. Ces principaux critères doivent être pris en compte, non seulement lors de la phase de planification, mais aussi lors des autres phases tel que l'ordonnancement.

Par nature, ces systèmes ont une complexité fonctionnelle et structurelle qui résulte pour une large part de la qualité et la diversité des produits et ainsi que des exigences du marché et de la concurrence... Cette complexité dépend non seulement du produit mais aussi du processus. Ce qui rend les problèmes d'ordonnancement caractérisés par un grand nombre de contraintes relatives aux ressources (renouvelables ou consommables), aux tâches (préemptives ou non, indépendantes ou non), aux types de contraintes portant sur les tâches (précédences, disjonctions)... En plus, l'ordonnancement dans ces systèmes nécessite la prise en compte de plusieurs critères, dont certains sont contradictoires entre eux (maximisation du taux de production, minimisation des en-cours, du temps de cycle et des retards, la maximisation des taux d'utilisation des équipements de transport et d'usinage...).

Selon le contexte du système flexible de production considéré et son environnement, plusieurs sortes d'aléas peuvent arriver en cours de la production. Ces aléas qui vont perturber le plan de production peuvent dégrader les performances du système et même les industriels sont incapables de fournir des données fiables ou satisfaisantes au problème posé car dans ces cas la probabilité qu'un ordonnancement défini à priori soit exécuté tel qu'il a été planifié est très faible et les données du problème qui sont assorties de valeurs numériques caractérisant l'état du système réel peuvent être susceptibles de changer ou mal connues. Ces perturbations peuvent être selon [La Hoang 05] de différentes origines. Elles sont liées soit à des paramètres internes (incertitudes sur les durées opératoires, pannes de machines...) soit à des paramètres externes (arrivée d'une commande urgente, changement de la demande d'un client, annulation de la commande...).

En effet, l'ordonnancement prévisionnel limite les capacités de ces systèmes et ne permet pas de répondre aux attentes de leurs responsables. De plus, les nouvelles informations apparaissent durant l'exécution du programme prévisionnel susceptibles de rendre sa mise en oeuvre caduque. Une des conditions nécessaires pour tirer pleinement partie de la flexibilité offerte par ces systèmes est de proposer un système de gestion souple, capable de les piloter en temps réel, permettant de prendre dynamiquement et à très court terme les décisions d'allocation et d'ordonnancement des opérations et des plans de processus en fonction de l'état du système de production, les objectifs de production..., et doit souvent faire face à ces événements imprévus.

La plupart des problèmes d'ordonnancement sont classés NP-difficiles [Rinnooy Kan 1976]. La majorité des problèmes industriels sont d'une telle complexité que le nombre de solutions croît exponentiellement avec la taille du problème et les problèmes liés à la technologie des FMS sont relativement complexes comparés aux systèmes de production traditionnels. C'est la raison pour laquelle les problèmes d'ordonnancement dans ces systèmes sont généralement des problèmes d'optimisation difficile.

En plus de la difficulté de résolution de ces problèmes, qui vient de la taille du problème caractérisé par un grand nombre d'entités à gérer et un grand nombre de tâches et ceci avec les contraintes citées précédemment, la présence des incertitudes rend ces problèmes plus complexes; ce qui exige la résolution rigoureuse de ces problèmes.

Les métaheuristiques sont une famille d'algorithmes de type stochastique destinés à résoudre des problèmes d'optimisation difficile. Ces méthodes ne fournissent aucune garantie sur la qualité des résultats, mais présentent l'avantage de résoudre avec succès plusieurs problèmes sans pour autant que l'utilisateur ait à modifier la structure de base de l'algorithme qu'il utilise. Souvent inspirées d'analogies avec la réalité comme l'éthologie (colonies de fourmis, essais particuliers), la biologie (algorithmes évolutionnaires, recherche tabou) et la physique (recuit simulé)... Elles sont généralement conçues au départ pour des problèmes discrets mais peuvent s'adapter aux autres types de problèmes.

Cette thèse s'intéresse aux processus d'ordonnancement et de ré-ordonnancement dans un système flexible de production avec présence d'incertitudes externes caractérisées par le non déterminisme des ordres de fabrications, et internes, liées aux pannes de machines et les incertitudes sur les durées opératoires. En raison de l'existence de machines identiques, les pièces à usiner peuvent avoir des routages alternatifs, ce qui justifie la présence de la flexibilité de routage (Routing Flexibility (RF)) dans ce système. Les décisions d'ordonnancement sont prises en terme de comment les pièces (les ordres de fabrication) arrivent au système (part launching decisions),

comment ces pièces sont routées vers les diverses machines alternatives, et le séquençement de pièces aux niveaux des files d'entrée des machines.

Le travail de cette thèse vise l'implantation de ces procédures opérationnelles d'ordonnement en temps réel intégrant l'optimisation et les techniques de simulation au sein du processus de décision, afin de pouvoir mieux générer l'évolution du comportement dynamique de l'atelier. Le système décisionnel proposé utilise des règles de priorité pour le lancement et le séquençement de pièces. Puisque les méthodes exactes sont inutiles dans le processus de routage de pièces présenté par un modèle mathématique décrivant l'état global du système il s'avère nécessaire d'utiliser des méthodes de types métaheuristiques pour le résoudre en un temps raisonnable. Plus précisément, nous nous sommes intéressés dans cette contribution à une métaheuristique à population de solutions, dite les essais particuliers.

Le manuscrit s'articule autour de cinq chapitres :

Les deux premiers représentent des généralités sur les FMS, les problèmes d'ordonnement et les métaheuristiques, ils n'apportent rien de nouveau, mais sont utiles à la compréhension du sujet pour les non spécialistes. Tout d'abord, le premier chapitre contient quatre parties principales la première est consacrée aux généralités concernant les systèmes flexibles de production, la deuxième décrit les problèmes d'ordonnement de manière générale et traite la problématique d'ordonnement et la troisième présente la modélisation des problèmes d'ordonnement dans les systèmes flexibles de production, la notion d'ordonnement dans un FMS avec flexibilité de routage est ensuite développée en présentant un aperçu sur les travaux les plus récents dans ce domaine.

Dans le deuxième chapitre nous nous intéressons de manière approfondie aux métaheuristiques. Il contient les éléments nécessaires à la compréhension de ces approches. Il est composé de deux parties principales, la première traite de manière générale ces techniques, leurs définitions, leurs domaines d'utilisation, leurs caractéristiques et leur classification. La seconde partie est réservée à la présentation des métaheuristiques les plus utilisées en incluant leurs définitions, leurs origines et leurs algorithmes de base.

Dans le troisième chapitre, nous proposons un algorithme à base des essais particuliers pour la prise des décisions de routage de pièces en temps réel, cet algorithme peut répondre aux variations des demandes de fabrication même en cas de présence de pannes de machines. Afin de pouvoir tester son efficacité et de sélectionner son meilleur paramétrage, nous avons développé un outil software en Java. Une description complète du modèle FMS étudié, puis de cet algorithme et de la Framework développée sont présentées. Finalement, l'interaction de décisions de routages de pièces basées sur l'algorithme proposé et les autres décisions prises par les différentes règles de priorité est investiguée mais en supposant que le temps opératoire est toujours déterministe.

Dans le but d'améliorer les performances de l'algorithme proposé en palliant aux aléas concernant les variations du temps opératoire, nous avons développé une approche de ré-ordonnement en temps réel de pièces en cours de traitement dont les performances ont été analysées en deux chapitres. Le chapitre 4 présente un aperçu sur les méthodes traitant de l'ordonnement sous incertitudes, puis les nouveaux mécanismes de résolution proposés pour donner une solution capable de faire face aux différents incertitudes internes et externes concernées sont présentés. L'approche proposée est évaluée sur le même modèle FMS mais lorsque le temps opératoire supposé inconnu suit une loi exponentielle qui est très utilisée pour la modélisation des

cas caractérisés par de fortes perturbations. Le chapitre 5 aborde l'analyse des performances en variant les différents niveaux de flexibilité de routage décrite par le nombre maximal de machines identiques pour chaque tâche.

Enfin, nous terminons notre thèse par une conclusion générale en présentant un bilan final de notre travail et en ouvrant de nouvelles perspectives de recherches.

Chapitre 1

L'ordonnancement dans les systèmes flexibles de production

1.1.Introduction

La féroce concurrence internationale, la globalisation des marchés fluctuants et la nature de la consommation actuelle sont des facteurs contraignants pour les entreprises de nos jours. Ce contexte économique a poussé les industriels à se diriger vers des systèmes de fabrication capables de fabriquer des produits personnalisés de bonne qualité et à des prix bas tout en réduisant le plus possible les coûts et les délais de production, ceci a conduit à l'émergence des systèmes flexibles de production (Flexibles Manufacturing Systems (FMS)).

Une autre motivation importante pour le FMS a été basée sur le besoin perçu de l'industrie manufacturière pour répondre aux changements plus rapidement que dans le passé. Ces technologies de fabrication qui jouent un rôle important à cet égard ont déjà prouvé leur succès dans un grand nombre d'industries.

Les FMS sont des systèmes de production fortement automatisés et adaptés à la fabrication en petites et moyennes séries de produits ayant des gammes différentes et ceci à faible coûts et avec des temps de préparation des machines et de changement d'outils minimums. Plus spécifiquement, il est indiqué par Raj et al. [Raj 07] que ce type des systèmes de production a été conçu de telle manière qu'il a l'efficacité d'une ligne de transfert bien équilibré et la flexibilité d'un job shop.

La flexibilité qui est la capacité des systèmes de production à répondre à la fois aux changements internes et externes, est une caractéristique importante qui distingue les FMS des autres systèmes de fabrication, mais sa mise en œuvre entraîne un coût énorme pour l'installation de machines flexibles, de changeurs d'outils et d'équipements automatisés, d'opérateurs de machines possédant des compétences multiples... Par conséquent, les gestionnaires du système doivent déterminer le niveau approprié pour une configuration spécifique du système afin d'établir un équilibre entre ses avantages et les coûts encourus.

Dans un système flexible de production, le plan de charge permet de comparer la charge occasionnée dans l'atelier par les commandes par rapport à la capacité des ressources de l'atelier et alors d'effectuer des réajustements de charge ou de capacité (heures ou équipes supplémentaires) si la charge de l'atelier dépasse sa capacité. Les données sont transmises à la fonction d'ordonnancement qui permet à la fois l'optimisation de l'utilisation des ressources et la réactivité de l'atelier.

Dans la vision de Raj et al. [**Raj 07**] sur la théorie d'ordonnancement, un FMS peut être considéré comme un Job Shop avec des machines parallèles, des ressources additionnelles limitées et d'autres caractéristiques tels que les routages alternatifs, les palettes et les supports, les stations de chargement ou de déchargement. Mais, En raison de haut niveau de traitement de données distribuées, des flux de matières..., les problèmes opérationnels d'ordonnancement dans ces systèmes sont considérés par Chan et al. [**Chan 02**] plus compliqués que ceux d'un Job Shop classique. Bien que, ces derniers appartiennent généralement à la classe NP-difficile.

Ce chapitre est consacré aux problèmes d'ordonnancement dans les systèmes flexibles de production. La prochaine section de ce chapitre vise à décrire les systèmes flexibles de production. Pour cela, nous rappelons leurs définitions puis leurs classifications, nous étudions ensuite les différentes étapes liées à leur implémentation.

La deuxième section de ce chapitre est un aperçu sur l'ordonnancement où nous présentons sa définition, ses contraintes et objectifs.

La problématique de la modélisation des problèmes d'ordonnancement dans les systèmes flexibles de production est ensuite développée dans la troisième section en décrivant les spécificités de ces problèmes, les facteurs influant sur leurs décisions et notre classification de différentes approches de résolution existantes.

La résolution des problèmes d'ordonnancement dans les systèmes flexibles de production avec flexibilité de routage, objet principal de notre travail, est décrite dans la quatrième section de ce chapitre où nous présentons dans un premier temps l'importance de la flexibilité de routage, et dans un second temps ses différentes mesures, puis les études de son impact sur les performances du système. Ensuite, les différentes approches proposées pour la sélection de routages sont présentées. Nous clôturons cette section par une synthèse sur les recherches dans le domaine d'ordonnancement dans les FMS avec flexibilité de routage.

1.2.La présentation des systèmes flexibles de production

1.2.1 Définitions et spécificités

La littérature propose différentes définitions des FMS, mais il n'existe pas une définition standard acceptée pour ce terme. La plupart d'entre elles sont basées sur la composition matérielle du système. Par exemple, Byrkett et al. [**Byrkett 88**] ont déclaré qu'un FMS combine un ensemble de machines de production à commande numérique inter-reliées par un système automatisé de maintenance travaillant en coopération sous un système de contrôle. O'Keefe et Kasirajan [**O'Keefe 92**] ont défini un FMS comme un groupe de stations du travail connectées par un système de maintenance produisant ou assemblant un ensemble de différentes pièces, sous le contrôle centralisé d'un ordinateur.

D'autres auteurs définissent les FMS relativement à leurs performances et capacités fonctionnelles. Par exemple, Kaltwasser et al. [**Kaltwasser 86**] voient qu'un FMS est un système de production hautement automatisé capable de produire une grande variété de types de produits en utilisant le même équipement et le même système de contrôle.

MacCarthy et Liu [**MacCarthy 93**] ont proposé une définition qui intègre les aspects fonctionnels et structurels : un système flexible de production est un système de production capable de produire une variété de pièces, composé de machines à commande numérique connectées par un

système automatisé de manutention. Le fonctionnement du système entier est sous le contrôle et le pilotage d'un système informatique.

Malgré la diversité des définitions, il est admis qu'un FMS se compose d'un certain nombre d'équipements, qui ont été divisés par Sari [Sari 03] en quatre grandes familles :

- ✓ Les stations de travail, englobant les machines outils à commande numérique (MOCN), les systèmes de changement d'outils, les palettes, les supports, les systèmes d'inspection...
- ✓ Les systèmes de manutention et de transport, comprenant les systèmes de transport, les robots manipulateurs...
- ✓ Les systèmes de stockages, renfermant les aires de stockages, les systèmes de chargement déchargement...
- ✓ Les systèmes de contrôle et de communication.

En plus, les systèmes flexibles de production peuvent être caractérisés par les points suivants [Sari 03], [Brauner 05] :

- ✓ Machines reprogrammables à commande numérique.
- ✓ Changement d'outils automatisé.
- ✓ Système de transport automatisé.
- ✓ Chargement et déchargement automatisé.
- ✓ Contrôle coordonné.

En raison de ces caractéristiques et les objectifs de production, on peut ainsi définir plusieurs variantes, ou types d'FMS qui apportent des réponses variables aux objectifs des industriels.

1.2.2 Classifications des systèmes flexibles de productions

Le développement des FMS a permis d'en installer un nombre important dans différents types d'environnements industriels. Cependant, il existe de nombreuses classifications des différents types avec une variante de critères. Citons par exemple le nombre de machines à commande numérique et leur agencement, comme la classification proposée par Kusiak [Kusiak 85] qui classe les systèmes en cinq types, un module flexible de production (MFP) qui est une machine à commande numérique avec une aire de stockage, un changeur de pièces ou d'outils..., la cellule flexible de production (CF) qui englobe plusieurs modules flexibles, le groupe flexible de production (GF) qui peut être vu comme un ensemble de cellules et de modules formant la même zone de production, le système flexible de production (SFP) qui représente plusieurs cellules flexibles reliées entre elles par des véhicules filoguidés composant les diverses zones de production, et la ligne flexible de production.

D'autres classifications sont basées sur les modèles des flux de pièces à traiter en mettant l'accent sur la flexibilité de routages. Browne et al. [Browne 84] ont classé les FMS en quatre classes : cellule flexible d'usinage, système flexible d'usinage, ligne flexible de transfert, multi-lignes flexible de transfert. Stecke et Browne [Stecke 85a] ont étendu cette classification afin d'inclure le type de système de manutention.

D'après MacCarthy et Liu [MacCarthy 93] l'usage de nombre de machines pour faire la différence entre une cellule et un système est une base de comparaison douteuse pour un système de classification utile. Aussi, un certain nombre de divergences résident dans les précédentes classifications. Par exemple il n'existe pas une relation de classification entre les lignes flexibles

(LF) et les autres structures, de plus le terme système flexible qui est très général est considéré comme un niveau de la classification. En plus, ces classifications n'abordent pas la problématique des caractéristiques de fonctionnement et de contrôle qui doivent être comprises et gérées de façon efficace afin de profiter des avantages de toute configuration spécifique d'un FMS.

MacCarthy et Liu [MacCarthy 93] ont dressé une classification pouvant être appliquée à un grand nombre de systèmes flexibles de production, afin d'homogénéiser les notations. Cette classification nous semble claire en terme de relations hiérarchiques entre les différents types des FMS et présente des discussions critiques par rapport aux classifications existantes. En plus, elle a l'avantage de prendre en compte les processus de production, de manutention et de stockage. Elle permet de distinguer quatre structures inter-reliées :

- ✓ La machine flexible unique (*Single Flexible Machine, SFM*) est une unité de production pilotée par ordinateur qui contient une machine unique avec capacité de changement d'outil, un système de manutention et un aire de stockage.
Le système de manutention dans une SFM peut être un robot ou un dispositif de changement de palettes spécialisé. Quand une SFM est utilisée comme une composante d'un grand système, son dispositif de manutention peut être éliminé si sa fonction peut être réalisée par les systèmes de manutention du grand système.
- ✓ La cellule flexible de production (*Flexible Manufacturing Cell, FMC*) est un groupe de SFM reliées par un seul élément de manutention.
- ✓ Le système flexible de production à plusieurs machines (*Multi-Machine Flexible Manufacturing System, MMFMS*) est un groupe de SFM reliées par un système de manutention automatisé qui inclut deux ou plusieurs dispositifs de manutention, sinon il est capable de desservir deux ou plusieurs machines à la fois.
- ✓ Le système flexible de production à plusieurs cellules (*Multi-Cell Flexible Manufacturing System, MCFMS*) est un groupe de FMCs et éventuellement de SFM tous connectées par un système de manutention automatisé.

A partir des définitions précédentes, il est clair que les deux catégories FMC et MMFMS contiennent plusieurs SFM, mais ils se distinguent par les caractéristiques de leurs systèmes de manutention. Plus précisément, dans une FMC, il n'y a qu'un seul système de manutention, bien que, chaque machine dans une cellule a besoin d'un système de transport pour le déplacement de pièces. En revanche, un MMFMS est doté de plusieurs systèmes du transport ou d'un système de transport multiple, ce qui permet de servir deux ou plusieurs machines à la fois.

1.2.3 Les Problèmes posés pendant l'implémentation des systèmes flexibles de production

Dans la littérature, plusieurs articles ont décrit les étapes nécessaires pour l'implémentation des systèmes flexibles de productions. Primrose et Leonard [Primrose 91] ont exigé que la procédure d'implémentation dans les FMS doit être divisée en trois étapes : (i) l'évaluation des investissements (ii) la sélection de la technologie et (iii) l'installation technique. Fry et Smith [Fry 89] ont proposé les huit étapes suivantes distinctes : (i) la détermination des exigences de fabrication des pièces à réaliser, (ii) l'identification et l'évaluation des technologies alternatives (iii) le choix de la technologie appropriée (iv) l'envoi des demandes de propositions (v) l'évaluation et la sélection du fournisseur (vi) l'installation du FMS (vii) la configuration du FMS (viii) secouer le système.

Groover [Groover 03] a proposé que l'implémentation d'un FMS doit être divisée en deux étapes : la phase de la conception et la planification et la phase opérationnelle. La première considère les familles de pièces, les exigences des traitements, les caractéristiques physiques de pièces, le volume de la production, les types des stations, les variations du processus de routages et de configurations, le système de manutention, les en-cours, les supports, les palettes et les outils. Les problèmes opérationnels doivent être résolus à travers l'ordonnancement, le séquençement, le routage de pièces, le groupage de pièces, la gestion des outils, des palettes et des supports.

Plusieurs approches et algorithmes ont été proposés pour résoudre les problèmes rencontrés pendant les différentes phases d'implémentation. Mais malheureusement d'après Raj et al. [Raj 07] il y'a un grand écart entre les solutions proposées et les complexités du contexte réel. Dans la suite, nous présentons les différents problèmes d'implémentations des systèmes flexibles de production avec des véhicules autoguidés (Automated Guided Vehicle (AGV), regroupées par la communauté scientifique [Brauner 05] en deux phases, la phase de conception et celle d'exploitation.

1.2.3.1 La phase de conception

Les problèmes de conception des FMS avec véhicules autoguidés peuvent être regroupés en deux catégories, les problèmes de dimensionnement et les problèmes d'agencement [Brauner 05].

Les problèmes de dimensionnement comprennent :

- ✓ La détermination du nombre de machines.
- ✓ La détermination du nombre, de la capacité et de l'emplacement des zones de stockage des chariots, appelées également parking.
- ✓ La détermination de la capacité des zones de stockage des pièces.
- ✓ La détermination du nombre de chariots...

Les problèmes d'agencement comprennent :

- ✓ L'agencement des machines et leurs regroupements en cellules en tenant compte des gammes des pièces qui génèrent les flux de produits entre les différentes machines et cellules afin de minimiser les temps de déplacement.
- ✓ L'agencement du réseau de guidage (orientation optimale du réseau de guidage) qui est fortement contraint par l'implantation des postes de travail à desservir, le mode de fonctionnement des chariots (monodirectionnels, bidirectionnel) et la place disponible...

1.2.3.2 La phase d'exploitation

Cette phase a pour but de gérer efficacement le système flexible de production en proposant des solutions aux problèmes liés à la planification des mouvements des chariots, l'accès aux ressources, les incertitudes sur l'arrivée des ordres de fabrications (OF)... en prenant en compte les contraintes relatives à la limitation des capacités de stockage, la capacité du système, les déplacements à vide du chariot...

Ils pensent que les problèmes de la phase d'exploitation concernent :

- ✓ la gestion et prévention des blocages;
- ✓ l'ordonnancement et la planification des pièces et des chariots.

Plusieurs travaux de recherche ont été proposés dans cette direction, mais les deux phases d'implémentation ont été traitées séparément, et les modèles étudiés ont représenté le FMS comme isolé sans interaction avec son environnement et utilisent des hypothèses simplificatrices, donc loin

de la réalité avec ses contraintes (la charge est généralement partiellement connue, les dates de disponibilités des pièces sont incertaines...), ce qui influe sur les solutions obtenues qui peuvent poser des problèmes de faisabilité dans le système réel.

1.3.Généralités sur l'ordonnancement

L'ordonnancement est une branche de la recherche opérationnelle et de la gestion de production. Les champs d'application de la théorie d'ordonnancement sont diverses, notamment la gestion des systèmes de production, l'organisation des différentes tâches et processus et la gestion de la mémoire dans les systèmes informatiques, la planification de différents projets, l'organisation des activités de services, le transport, l'administration...

À cet effet, les problèmes d'ordonnancement ont été largement étudiés par des informaticiens, les décideurs et les industriels ..., depuis de nombreuses décennies. Cette étude est également d'un intérêt théorique toujours renouvelé pour les chercheurs, à cause de la nature fortement combinatoire de ces problèmes et le manque de méthodes de résolutions générales offrant des solutions de qualité et à faible coût.

1.3.1 Définition

L'ordonnancement est défini de différentes manières dans plusieurs ouvrages [**Baker 74**], [**Esquirol 99**], [**Pinedo 08**]..., nous reprenons la définition proposée dans [**Carlier 88**] :

Ordonnancer c'est programmer l'exécution des opérations en leur attribuant des ressources et en fixant leurs dates d'exécution.

Cette procédure s'effectue en deux étapes dans le but d'atteindre un ou plusieurs objectifs, la première consiste à déterminer la séquence des opérations dans le temps, la deuxième consiste à répartir leur exécution sur les ressources, tout en respectant les contraintes.

1.3.2 Les contraintes

Les contraintes expriment des restrictions sur les valeurs pouvant être prises par les variables de décisions. Ce sont donc des conditions à respecter dans la construction de l'ordonnancement pour qu'il soit réalisable. Il existe plusieurs classifications possibles de contraintes.

Suivant la disponibilité des ressources et l'évolution temporelle. Une classification de ce type a été donnée par [**Ben Hmida 09**] qui distingue deux types de contraintes en ordonnancement, les contraintes temporelles et les contraintes de ressources.

- ✓ Les contraintes de ressources : comprennent les contraintes de capacité et d'affectation, les premières peuvent distinguer deux types de ressources, les ressources disjonctives qui ne peuvent exécuter qu'une seule tâche à la fois et les ressources cumulatives permettant la réalisation simultanée de plusieurs tâches. Les contraintes d'affectation qui existent dans les systèmes flexibles englobent deux types de contraintes, les contraintes de domaine qui représentent l'ensemble des ressources candidates pour l'exécution d'une tâche et les contraintes de différence qui imposent l'utilisation de ressources différentes pour la réalisation d'un certain nombre de tâches.
- ✓ Les contraintes temporaires peuvent être classées en deux catégories, les contraintes de temps absolu et de temps relatif, les contraintes de temps absolu permettent de représenter la limitation des valeurs possibles pour les dates des tâches. Par exemple date de début au plus tôt, date de fin au plus tard... les contraintes de temps relatif sont les contraintes relatives

aux contraintes de cohérence technologique telle que les contraintes de gammes dans lesquelles il faut respecter le positionnement relatif entre tâches.

Une autre classification consiste à classer les contraintes selon leur lien avec le système de production. D'après [Tangour 07], ces contraintes peuvent être classées en deux types : endogènes et exogènes.

- ✓ Les contraintes endogènes constituent les contraintes liées directement au système de production et à ses performances telles que :
 - ✓ les dates de disponibilité des machines et des moyens de transport,
 - ✓ les capacités des machines et des moyens de transport,
 - ✓ les séquences des actions à effectuer ou les gammes des produits.
- ✓ Les contraintes exogènes sont des contraintes imposées extérieurement, et donc indépendantes du système de production; on distingue :
 - ✓ les dates de fin de fabrication au plus tard du produit imposées généralement par les commandes,
 - ✓ les priorités de quelques commandes et de quelques clients,
 - ✓ les retards possibles accordés pour certains produits.

Selon Letouzey [Letouzey 01] 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 ne pas être satisfaites.

1.3.3 Les objectifs de l'ordonnancement

Un problème d'ordonnancement n'est pas nécessairement exprimé comme un problème d'optimisation. Néanmoins, la notion de critère d'optimisation est toujours présente, cette notion est nécessaire pour juger la pertinence d'un ordonnancement satisfaisant ses contraintes du point de vue exploitation. Dans certains cas, où les objectifs de l'entreprise sont multiples, on cherche à optimiser (ou rapprocher de) plusieurs fonctions objectifs à la fois. Dans ce cas, le problème d'ordonnancement n'est plus un problème simple mais devient un problème multicritère. Ces objectifs sont classés selon Esquirol et Lopez [Esquirol 99] en plusieurs classes :

- ✓ Les objectifs liés au temps : la minimisation du temps total d'exécution, du temps de cycle, des durées totales de réglage ou des retards par rapport aux dates de livraison...
- ✓ Les objectifs liés aux ressources : la maximisation du taux d'utilisation d'une ressource ou la minimisation du nombre de ressources à employer...
- ✓ Les objectifs liés au coût : ces objectifs sont généralement de minimiser les coûts de lancement, de production, de stockage, de transport, du retard, de non occupation des machines...

1.4. Modélisation et présentation des problèmes d'ordonnancement dans les systèmes flexibles de production

Afin de pouvoir tirer les avantages offerts par les FMS, tel que l'amélioration de la productivité et de la qualité en réduisant les coûts et les délais, les processus de décisions doivent être en mesure de résoudre les difficultés liées aux conditions changeantes de l'environnement, et les imprévus. Stecke [Stecke 85b] a identifié quatre niveaux hiérarchiques de décisions qui sont la conception, la planification, l'ordonnancement et le contrôle.

La conception implique la sélection des équipements et de configurations, en incluant les différentes phases de dimensionnement et d'agencement citées précédemment. Chan et al. [Chan 02] a déclaré que la planification de production implique la détermination des paramètres de la production tels que les niveaux de la production, la disponibilité des ressources, les dates dues... Avec ces paramètres, l'ordonnancement permet une utilisation efficace des ressources. Les tâches de contrôle permettent de coordonner et superviser les différentes activités concernant la progression des ordres et le fonctionnement des équipements. En considérant ces différentes phases, la maîtrise de l'ordonnancement est d'un intérêt capital pour les FMS qui cherchent toujours des ordonnancements assurant leurs objectifs et gardent de bonnes performances en cas d'aléas et d'événements non planifiés.

1.4.1 Spécificités des décisions d'ordonnancement dans les systèmes flexibles de productions

En raison de leur impact sur les performances d'un FMS, les problèmes d'ordonnancement dans les FMS ont gagné l'intérêt des deux communautés scientifique et industrielle durant les trois dernières décennies. Ces problèmes ont fait l'objet de nombreuses études. En effet, plusieurs méthodes de résolution ont été développées pour résoudre des problèmes de plus en plus complexes et de plus en plus proches de la réalité.

Plusieurs auteurs ont analysé ce qui différencie ces problèmes. Dans le point de vue de Raj et al. [Raj 07] sur la théorie de l'ordonnancement un FMS peut être considéré comme un Job Shop avec des machines parallèles, des ressources supplémentaires limitées et d'autres spécificités tels que les routages alternatifs, l'usage de palettes, les supports et les aires de stockage à capacité finie.

Liu et MacCarthy [Liu 96] pensent que cet environnement est différent des ateliers d'usinage classiques car plusieurs hypothèses de base de la théorie d'ordonnancement classique ne s'appliquent pas dans l'ordonnancement des FMS :

- ✓ Dans un environnement classique, chaque job a un routage fixe. Par contre, dans un FMS, puisque les machines peuvent effectuer plusieurs types d'opérations, une pièce peut avoir plusieurs routages facultatifs à travers le système.
- ✓ Les temps d'installation sont indépendants et peuvent être incluses dans les temps opératoires dans les environnements classiques. Cependant, dans un FMS, en plus que différentes opérations ont besoin de différents ensembles d'outils, le temps et le coût de changement d'outils entre les opérations sur une machine sont dépendants de la séquence.
- ✓ Les machines sont considérées comme le seul élément contraignant dans un environnement classique. Alors que, dans un FMS, plusieurs contraintes additionnelles doivent être considérées par exemple : les moyens de transport, les aires de stockages, les dispositifs de changement des outils...

En plus des problèmes qui proviennent des spécificités des ressources physiques utilisées concernant par exemple la présence de machines avec des files d'entrée/ sortie de capacité limitée, un (ou plusieurs) système(s) de transport dont les temps de déplacement ne doivent pas être négligés qui rend le problème plus difficile à résoudre à cause des conflits d'accès aux ressources du réseau de transport. Brauner et al. [Brauner 05] ont signalé qu'il y'a des difficultés qui proviennent de l'interaction du système avec son environnement. Parmi ces problèmes, on peut citer plusieurs sortes d'aléas qui vont perturber le plan de production. Ces incertitudes peuvent être selon La Hoang [La Hoang 05] liées soit à des paramètres internes, exemple : incertitudes sur les durées opératoires, panne d'une machine, augmentation ou diminution de la capacité des ressources, soit à

des paramètres externes, exemple : l'arrivée d'une commande urgente, la modification de commandes...

Chan et al. [Chan 02] ont déclaré que la gestion de la production et les problèmes d'ordonnancement dans les FMS sont plus compliqués que ceux dans un Jop Shop ou une ligne de transfert à cause de plusieurs raisons, ils les ont résumé dans les points suivants :

- ✓ Chaque machine est polyvalente et capable d'utiliser différents outils pour exécuter des opérations différentes. Par conséquent, plusieurs types de pièces peuvent être fabriqués à un moment donné.
- ✓ En plus des machines, les systèmes de manutention tels que les véhicules autoguidés, les supports, les palettes doivent également être ordonnancés. En d'autres termes, le nombre de points de décision, où les règles d'ordonnancement peuvent être modifiées est plus grand dans un FMS que celui dans un Job Shop.
- ✓ Il peut y avoir un changement rapide ou aléatoire de la demande des nouveaux produits qui ont une haute priorité.
- ✓ Une opération est susceptible d'être effectuée sur un nombre de machines alternatives avec des temps de traitements qui peuvent être différents.
- ✓ La production est continue même pendant des événements imprévus tels que les pannes de machines.
- ✓ En raison des grands temps requis pour les opérations alternatives dans un Jop Shop, la production sera interrompue en cas de pannes. Mais dans les systèmes automatisés comme les FMS, la programmation des instructions relatives aux opérations réduit considérablement les temps de réglage.

En plus selon Ourari [Ourari 11], et Brauner et al. [Brauner 05] le problème de type Job Shop pose les hypothèses simplificatrices suivantes : capacité de stockage suffisante (considérée infinie), temps et ressources de transport négligés, disponibilités complètes des pièces et des machines, temps de traitement des opérations connu et déterminé. Mais ces hypothèses sont parfois trop restrictives, et des modèles plus complexes doivent souvent être envisagés.

Souvent mal maîtrisés, les FMS continuent à poser d'énormes problèmes d'ordonnancement qui consistent à organiser des tâches et à leur attribuer des ressources, afin d'optimiser un certain objectif, de telle sorte que les contraintes soient respectées. Selon ces contraintes concernant le système de production considéré et son environnement, plusieurs types de décisions peuvent être prises, afin de pouvoir exploiter la flexibilité d'un FMS et d'atteindre ses buts d'implémentation. Selon Liu et MacCarthy [Liu 96] l'ordonnancement d'un système flexible de production doit englober les trois aspects suivants :

- ✓ Le réglage de machines et le changement d'outils : le réglage de machines peut être défini comme la procédure où la décision d'attribuer les outils sur la machine à partir de son état initial ou un état de travail résultant de l'opération précédente afin d'effectuer l'opération suivante (ou les opérations suivantes). Le changement d'outils implique souvent le changement d'un état de travail à un autre différent de l'état initial de la machine.
- ✓ Le routage des pièces : est défini comme étant le processus de la détermination de la machine sur laquelle chaque opération d'une pièce est traitée, c-à-d la détermination de la séquence de machines pour chaque pièce passant à travers le système.
- ✓ Le séquençement des opérations : ces décisions doivent considérer l'ordre des opérations pouvant être performées sur chaque machine.

Ils ont ignoré quelques décisions importantes comme celles d'avancement et de retardement des ordres de fabrications très connus comme sources de perturbations... Joseph et Sridharan [Joseph 11a] pensent que les décisions d'ordonnancement peuvent être prises en terme de comment les pièces (les ordres de fabrication) arrivent au système (part launching decision), comment ces pièces sont routées vers les diverses machines alternatives, et le séquençement des pièces aux niveaux des files d'attente d'entrée des machines. Malgré qu'ils ont pris en considération les contraintes liées aux variations des ordres de fabrications et les décisions de sélection des opérations prises lorsque les contraintes de précédences ne sont pas fixes (lorsqu'il y'a une flexibilité de séquences dans le système), ils ont ignoré d'autres comme les décisions de sélection de systèmes de transport utilisées lorsqu'il y'a deux ou plusieurs transporteurs dans le système...

Chan et Chan [Chan 04a] ont classé les décisions d'ordonnancement dans les FMS en cinq catégories :

- ✓ Les problèmes de sélection de pièces : pour sélectionner une pièce contenue dans une file d'attente.
- ✓ Les problèmes de sélection de machines : pour sélectionner la prochaine machine pour une pièce.
- ✓ Les problèmes de sélection des AGV : pour sélectionner un AGV ou déterminer son routage.
- ✓ Les problèmes de sélection des opérations : pour sélectionner la prochaine opération de la pièce à traiter.
- ✓ Autres : puisque le FMS est un système très complexe...

A cause de la complexité d'un FMS et son impact sur les types de décisions à prendre, ils n'ont pas pu citer tout les types de décisions, exemple ceux de la sélection d'outils et ceux liés aux problèmes de chargement de machines, d'où ils ont ajoutés une classe nommée autres. Mais quelque soit la nature des décisions prises, le système d'ordonnancement doit, en général, assurer un ensemble de tâches :

- ✓ La permission de l'intégration de l'atelier avec son environnement.
- ✓ Prendre en considération les contraintes concernant les tâches, les ressources...
- ✓ Assurer un bon fonctionnement du système et pendant de longues périodes malgré la présence d'incertitudes et d'événements non planifiés.
- ✓ Faire face aux changements de l'environnement et permettre la concentration de machines aux opérations critiques et aux ordres urgents.
- ✓ Permettre l'intégration avec les autres tâches telles que les procédures de réparation en cas de défaillance...

1.4.2 Facteurs influant sur les décisions d'ordonnancement dans les systèmes flexibles de production

Les systèmes flexibles de production avec des ressources limitées, des pannes de machines aléatoires ou des critères et contraintes de production multiples... ont plusieurs aspects qui compliquent leurs problèmes d'ordonnancement. C'est pour cela, que pour ce genre de systèmes, il faut développer des algorithmes efficaces. Dans le but de leurs trouver une résolution rigoureuse, plusieurs questions peuvent être posées :

- ✓ Quelles sont les décisions d'ordonnancement qui doivent être établies dans l'environnement concerné ?
- ✓ Quelle est la manière d'établir ces décisions ? ...

Pour répondre à ces questions, il faut avoir une idée sur les caractéristiques des problèmes d'ordonnancement qui sont dépendantes du contexte. À cet égard, Liu et MacCarthy [Liu 96] ont classé les aspects qui affectent les décisions d'ordonnancement dans les FMS en cinq classes afin de pouvoir établir un schéma de classification applicable pour n'importe quel problème d'ordonnancement dans les FMS :

- ✓ Le type de système : il existe plusieurs configurations de FMS avec une confusion considérable concernant la classification de ces systèmes. Dans leur schéma, ils ont classé les types de systèmes selon la classification de MacCarthy et Liu [MacCarthy 93] présentée précédemment.
- ✓ Les contraintes de capacité : celles-ci indiquent le niveau de contraintes de capacité qui peuvent influencer sur la politique de l'ordonnancement. En plus de contraintes de ressources, le système de manutention, les outils et les supports, les dispositifs de changement d'outils, les aires de stockages sont aussi considérés. Par exemple, les contraintes de machines peuvent être modélisées par un seul niveau (le nombre limité). Par contre, trois niveaux peuvent être considérés pour représenter les contraintes des aires de stockage qui peuvent être de capacité zéro (le niveau le plus restrictif), de capacité limitée ou infinie.
- ✓ Caractéristiques des jobs : impliquent les différents niveaux de complexité des jobs et leur flexibilité de routages. Le nombre d'opérations (une ou plusieurs opérations) pour un job, leurs contraintes conjonctives et disjonctives, le nombre de machines (une ou plusieurs machines) dédiées pour une opération donnée... peuvent être classés dans cette catégorie.

Ces distinctions sont nécessaires pour la considération de différentes décisions. Lorsqu'il y a deux ou plusieurs opérations par pièce, différentes contraintes doivent être considérées : les opérations d'une pièce ne peuvent pas être effectuées en même temps et doivent être performées en un ordre exigé. En plus, lorsque la flexibilité de routages existe dans le système, les décisions de routages des pièces doivent être prises en considération.

- ✓ L'environnement de la gestion de la production : englobe les politiques et les fonctions de la gestion de la production effectuant l'activité d'ordonnancement. Il est recommandé qu'au moins les contraintes suivantes soient considérées :
 - ✓ Si les ordres sont manipulés périodiquement ou continûment.
 - ✓ S'il y'a des contraintes de dates dues.
 - ✓ S'il y'a une seule pièce par type ou plusieurs pièces.
 - ✓ S'il y'a des taux de demandes, ou de demandes par lots pour les pièces.

En plus de contraintes d'arrivée des ordres (dynamiquement ou statistiquement). S'il y'a une seule pièce par type, chaque pièce représentant un type doit être considérée individuellement. Un autre problème se pose lorsqu'il y'a plusieurs pièces par type qui consiste à définir si les pièces de même type sont manipulées en lots donc traitées, transportées et stockées ensemble ou non...

- ✓ Les critères d'ordonnancement : ceux-ci sont déterminés par l'objectif global de la planification de la production du système. Plusieurs types de critères sont généralement considérés :
 - ✓ Critères relatifs à l'utilisation des ressources, l'utilisation du système.

- ✓ Critères relatifs aux coûts (coût de retard, coût de non occupation de machines, coût (ou valeur) des en-cours, coût total par job...).
- ✓ Critères relatifs au temps de cycle, aux en-cours, aux retards d'opérations...

1.4.3 Classification des approches de résolution des problèmes d'ordonnancement dans les systèmes flexibles de production

De très nombreuses approches ont été proposées pour la résolution des problèmes d'ordonnancement dans les systèmes flexibles de production. À cet effet, plusieurs classifications de ces approches existent dans la littérature. Kusiak et Ahn [Kusiak 92] distinguent trois types d'approches qui sont les approches de la recherche opérationnelle, les approches basées sur l'intelligence artificielle et la combinaison des deux approches. Une classification proposée par Spano et al. [Spano 93] comporte deux catégories : les approches traditionnelles et les approches basées sur l'intelligence artificielle. En effet, l'approche traditionnelle peut être divisée en deux catégories : la recherche théorique portant sur les procédures d'optimisation et la recherche expérimentale. La recherche théorique a mis l'accent sur le développement de modèles mathématiques et des algorithmes optimaux ou sous optimaux. La recherche expérimentale a surtout porté sur les règles de priorité et les heuristiques qui permettent de résoudre efficacement les problèmes d'ordonnancement. Cette classification est adoptée par Chan et Chan [Chan 04a] qui s'étaient intéressés aux techniques de l'intelligence artificielle, ils les ont classé en plusieurs catégories qui incluent en particulier la logique floue, les systèmes experts, les réseaux de neurones, les algorithmes génétiques mais ils ont ignoré certaines approches comme celles basées sur les systèmes multi agents et les autres types de métaheuristiques telles que les colonies de fourmis, les essais particuliers...

Certains auteurs ont pensé que la simulation peut être considérée comme approche d'ordonnancement dans un FMS. Basnet et Mize [Basnet 94] ont décrit la méthodologie de l'ordonnancement sous différentes catégories : la programmation mathématique, les décisions multicritères, les heuristiques orientées, le contrôle théorique, la simulation, et l'intelligence artificielle. Joseph and Sridharan [Joseph 12] ont déclaré que l'ordonnancement dans un FMS peut être classé en méthodes analytiques, heuristiques, simulation, systèmes experts/ techniques d'intelligence artificielle et méthodes hybrides. La classification proposée par Balogun et Popplewell [Balogun 99] distingue plusieurs catégories de base d'ordonnancement dans les FMS, l'optimisation combinatoire, les règles de priorité basées sur la simulation, les heuristiques orientées, les décisions multicritères, les méthodes hybrides et les techniques de l'intelligence artificielle représentées par plusieurs catégories comme les systèmes experts, les réseaux de neurones, les algorithmes génétiques et d'autres techniques issues de l'intelligence artificielle.

D'autres chercheurs ne se sont intéressés qu'aux problèmes d'ordonnancement dynamiques, Suresh and Chaudhuri [Suresh 93] ont distingué trois types d'approches : conventionnelles (optimisation, l'heuristiques...), les approches basées sur les connaissances (exemples les systèmes experts, ...) et les approches distribuées comme les systèmes multi agents. En se basant sur cette classification et d'autres (Shukla and Chen [Shukla 96], Stoop and Weirs [Stoop 96], Brandimarte and Villa [Brandimarte 99]), Ouelhadj et Petrovic [Ouelhadj 09] ont dressé une classification pour l'ordonnancement dynamique dans un FMS, sept classes sont alors formées : les heuristiques, les métaheuristiques, les systèmes basés sur les connaissances, la logique floue, les réseaux de neurones, les techniques hybrides et les systèmes multi agents.

D'autres classifications existent; par exemple, Letouzey [Letouzey 01] a classé les méthodes de résolution de problèmes d'ordonnancement selon leur manière de résoudre le problème. Deux catégories sont donc distinguées, les méthodes directes résolvant le problème en une seule passe et les méthodes itératives qui permettent de produire une solution puis chercher à l'améliorer.

Dans ce qui suit, nous proposons une classification globale et simple, en se basant sur les classifications précédentes qui permet de couvrir les approches qu'elles décrivent ainsi que de nouvelles approches. Cette classification comporte deux familles : les approches classiques et les techniques de l'intelligence artificielle. La première famille est classée en deux catégories : les heuristiques ou les méthodes approchées, et les méthodes exactes. La deuxième famille comprend les métaheuristiques, la logique floue, les systèmes experts, les réseaux de neurones et les systèmes multi agents... En raison de la complexité d'un FMS, et son aspect multidimensionnel, on peut trouver d'autres approches basées sur les méthodes décrites dans cette section, en les hybridant avec d'autres techniques ou stratégies afin de pouvoir résoudre les problèmes multi objectifs ou d'autres plus compliqués. La typologie proposée est décrite graphiquement par la figure 1.1 qui montre aussi qu'il est possible de coupler deux ou plusieurs approches afin de tirer profit des avantages qu'offre chacune d'elles. Les catégories de notre classification sont présentées dans les sous sections suivantes où nous classifions également plusieurs travaux au sujet d'ordonnancement dans un FMS afin de vérifier la complétude de la classification adoptée.

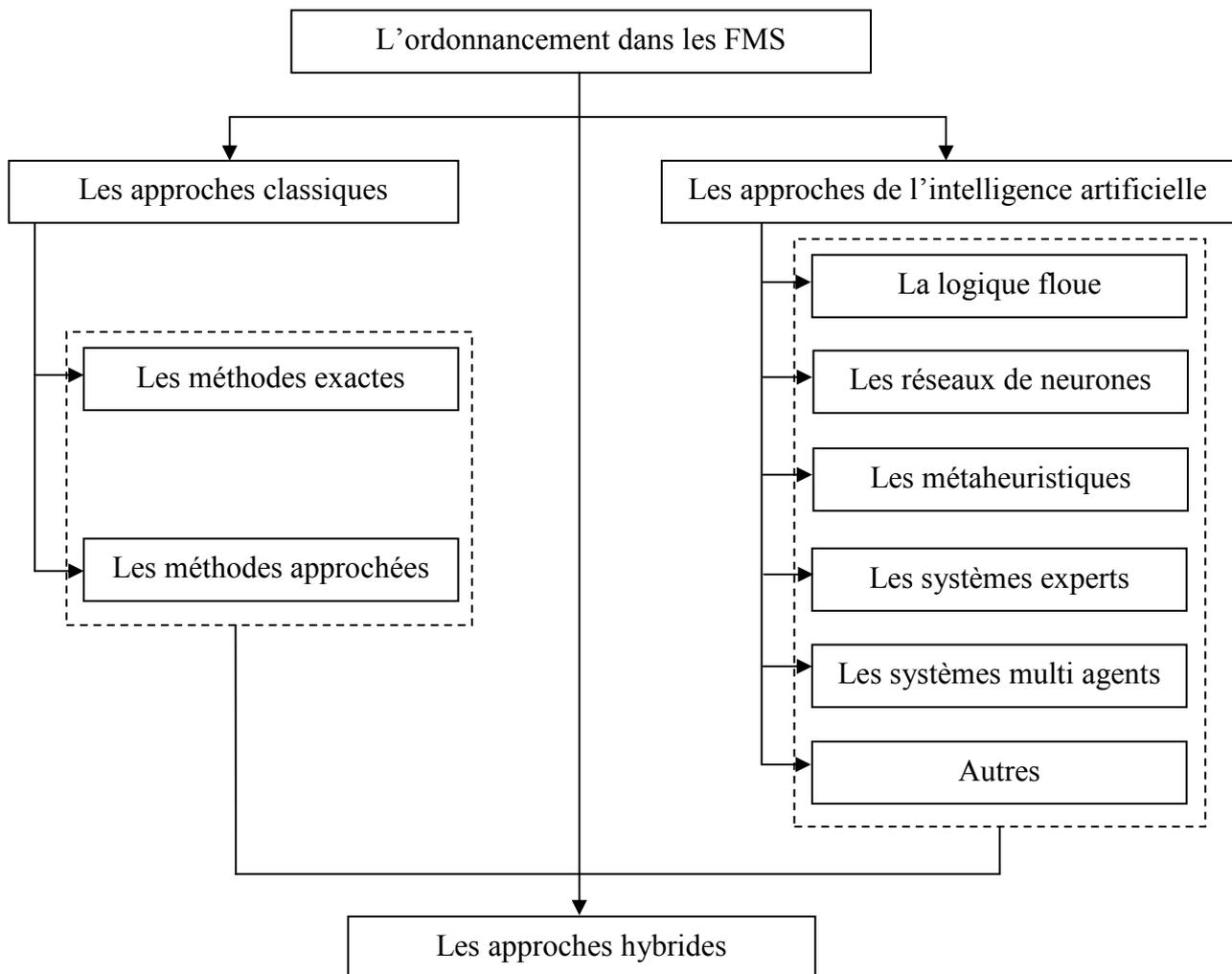


Figure 1.1 : La représentation graphique de notre classification des approches d'ordonnancement dans les FMS.

1.4.3.1 Aperçu sur les approches classiques

Plusieurs méthodes peuvent être classées sous cette catégorie, qui englobe des méthodes exactes qui visent à chercher à partir d'hypothèses réductrices sous certaines conditions relatives à la classe, la taille et la complexité du problème, une solution optimale par rapport à un critère donné et des méthodes approchées ou heuristiques qui n'assurent pas l'optimalité de la solution mais peuvent fournir des solutions satisfaisantes et s'appliquer à des problèmes plus complexes.

1.4.3.1.1 Méthodes de résolution exactes

Ces méthodes considèrent le problème d'ordonnancement comme un problème d'optimisation où l'on cherche une solution pour une fonction objectif généralement unique. Dans cette catégorie on peut classer la programmation linéaire (PL), la programmation linéaire en nombres entiers, les procédures par séparation et évaluation progressive (Branch and Bound), la relaxation lagrangienne, la programmation dynamique... Dans cette direction, plusieurs formulations mathématiques ont été développées par Bellman et al. [Bellman 82], Lashkari et al. [Lashkari 87], Sawik [Sawik 90], Aanen et al. [Aanen 93], Buyurgan et Mendoza [Buyurgan 06a], Turkcan et al. [Turkcan 07]...

Puisque la majorité des problèmes d'ordonnancement dans les FMS sont généralement de type NP-difficile, les méthodes exactes ont gagné peu d'intérêt dans ces contextes industriels.

1.4.3.1.2 Méthodes de résolution approchées

Contrairement aux méthodes exactes qui cherchent des solutions optimales pour des problèmes particuliers dans des situations qui existent rarement dans les problèmes industriels, les heuristiques préconisent de poser des hypothèses des problèmes plus compliqués et capables de trouver des solutions acceptables en terme de qualité et coûts (temps de calcul, complexité des méthodes). On peut les classer en plusieurs catégories :

- ✓ Méthodes par construction progressive : ces méthodes visent à construire itérativement un ordonnancement solution du problème. Parmi ces méthodes, on peut citer la procédure par machine goulot (Shifting Bottleneck Procedure) proposée par Adams et al. [Adams 88]. Son principe est basé sur un calcul machine par machine de la séquence des jobs.
- ✓ Méthodes sérielles : on appelle méthodes sérielles, les méthodes permettant d'affecter les tâches aux machines selon certaines priorités (éventuellement dynamiques) et selon les dates de disponibilité des machines [Domeingts 83]. Les approches les plus connues de ces méthodes sont les règles de priorité qui sont des heuristiques directes capables de gérer en temps réel la flexibilité du système et jouent un rôle très important dans plusieurs types de décisions (sélection d'opérations, de routages, d'équipements...) en fonction de différents paramètres concernant les opérations, les pièces, les ressources, les systèmes de transport...
- ✓ Les heuristiques de réparation de l'ordonnancement ou de ré-ordonnancement sont aussi classées sous cette catégorie, exemple la méthode de décalage à droite (right shift rescheduling) et la méthode de ré-ordonnancement par retour vers l'ordonnancement initial (match up rescheduling), ces méthodes ont été définies par Benbouzid [Benbouzid 05] comme suit, la première consiste, pour le cas d'une panne, à retarder dans le temps les opérations affectées par la panne en maintenant la même séquence de départ au niveau de chaque machine et la deuxième consiste à recalculer une partie de l'ordonnancement prédictif initial de façon à ce que le nouvel ordonnancement revienne sur l'ordonnancement initial à un point donné dans le temps. Ceci nécessite la présence du temps mort dans l'ordonnancement initial...

Parmi les travaux basés sur l'utilisation de différentes méthodes approchées en ordonnancement des FMS. Plusieurs sont basés sur les règles de priorité [Ramasesh 90], [Rajendran 99], [Chan 03a], [Chan 04b], [Chan 08a], [Wadhwa 05] ou les heuristiques de réordonnancement [Mehta 99], [O'Donovan 99], [Akturk 99], ou d'autres comme [Haq 03], [Tiwari 07]...

1.4.3.2 Aperçu sur les approches issues de l'intelligence artificielle

Dans un contexte industriel où les changements apparaissent rapidement et dynamiquement, il n'est pas très utile de chercher une solution optimale mais plutôt chercher à développer des Ordonnanceurs automatiques capables d'aider à prendre les décisions. En plus d'être faciles à utiliser, ils doivent être capables de répondre aux changements de l'environnement en temps réel, et pour ce faire, ces outils doivent prendre en compte les contraintes, les critères et les facteurs affectant les performances du système, pour prendre les décisions nécessaires. Donc, ils ont besoin d'une expertise et une expérience sur le système, et des mécanismes pour les améliorer. L'intelligence artificielle peut aider à imiter l'expertise humaine pour l'ordonnancement des FMS. Cette discipline a fourni de nouvelles approches pour proposer de nouveaux ordonnancements ou d'améliorer des ordonnancements déjà existants notamment par l'utilisation des approches présentées dans cette section.

1.4.3.2.1 La logique floue

La logique floue qui est une extension de la logique booléenne a été créée par Lotfi Zadeh en 1965 [Zadeh 65] en se basant sur sa théorie mathématique des ensembles flous.

Contrairement à la logique classique où les phénomènes ne sont représentés qu'à l'aide de variables booléennes, la logique floue confère un bon compromis entre la souplesse de l'emploi et la puissance de la représentation, en introduisant la notion de la fonction d'appartenance ou de degré dans la vérification d'une condition, permettant ainsi à une condition d'être dans un autre état que vrai ou faux, ce qui rend possible la prise en compte des imprécisions et des incertitudes.

La logique floue qui a permis d'apporter ponctuellement des techniques qui permettent d'être plus proche de la réalité est au sein de plusieurs travaux : Caprihan et al. [Caprihan 06], Buyurgan and Saygin [Buyurgan 06b], Yu et al. [Yu 99], Srinoi et al. [Srinoi 06]...

1.4.3.2.2 Les réseaux de neurones

Les réseaux de neurones qui représentent des collections de modèles mathématiques, sont aussi utilisés pour émuler certaines propriétés du système neuronal humain et leur faculté d'apprentissage.

Un réseau de neurones est un maillage de plusieurs neurones, généralement organisés en couches, connectées par des processeurs élémentaires fonctionnant en parallèle. Chaque processeur élémentaire calcule une sortie unique sur la base des informations qu'il reçoit en entrée. Le nombre de couches, le nombre de neurones sur chaque couche ainsi que le mécanisme d'interconnexion sont des paramètres pour spécifier l'aspect structurel et fonctionnel du réseau.

Ces techniques servent aujourd'hui dans plusieurs sortes d'applications et dans divers domaines d'ordonnancement de FMS, exemple ceux étudiés par Akyol et Araz [Akyol 07], Cakar et Yildirim [Cakar 05], Wang et al. [Wang 95], Min et al. [Min 98]...

1.4.3.2.3 Les métaheuristiques

Les méthodes dites, métaheuristiques consistent à explorer intelligemment l'espace des solutions possibles pour trouver une solution satisfaisante. Depuis les dernières décennies, ces approches suscitent un intérêt croissant pour leur capacité de fournir des solutions de bonne qualité en un temps de calcul réduit. Pour cela, de nombreuses métaheuristiques ont été conçues pour la résolution d'une famille de problèmes de plus en plus complexes dites NP-difficile.

Malgré, qu'il n'est jamais garanti que leur utilisation aboutisse à la découverte d'une solution et il est encore moins sûr qu'une solution optimale soit atteinte, ces techniques ont prouvées leurs capacités à résoudre avec succès une large gamme de problèmes auxquels elles sont appliquées. Parmi les métaheuristiques les plus connues on trouve : les colonies de fourmis, les algorithmes génétiques, le recuit simulé, la recherche tabou...

À cause de la complexité des problèmes d'ordonnancement dans les FMS et l'absence de méthodes optimales, plusieurs ont pensé à utiliser les approches métaheuristiques pour les résoudre et surmonter leur difficulté, Rossi and Dini [Rossi 00], Kumar et al. [Kumar 06], Tiwari et al. [Tiwari 07], Biswas and Mahapatra [Biswas 08], Chan et al. [Chan 10], Pitts et Ventura [Pitts 09], Babu et al. [Babu 10]...

1.4.3.2.4 Les systèmes experts

Les experts humains sont capables de résoudre un certain nombre de problèmes à cause de leur grande expérience et connaissance sur leurs domaines de spécialité. Un système expert est un outil informatique conçu pour simuler le savoir faire et le raisonnement d'un spécialiste et utiliser les connaissances correspondantes à son domaine afin de pouvoir résoudre des problèmes spécifiques avec des performances comparables à l'expert humain. En plus de l'acquisition de connaissances, ces systèmes sont capables de les exploiter pour déduire de nouvelles informations à l'aide d'algorithmes constituant un moteur d'inférence qui leur permet de proposer des résultats identiques à ceux proposés par l'être humain en utilisant les mêmes hypothèses.

Dans la littérature d'ordonnancement dans les FMS, un grand nombre de systèmes experts ont été développés. Par exemples ceux proposés par O'kane [O'kane 00], Ruiz et al. [Ruiz 01], Kovács et al. [Kovács 94], Li et al. [Li 06]...

1.4.3.2.5 Les systèmes multi agents

Un système multi agent (SMA) est un ensemble d'agents situés dans un certain environnement et interagissant selon une certaine organisation. Un agent peut être vue comme une entité virtuelle dotée d'un comportement intelligent, possédant une certaine autonomie dans la prise de décisions, capable d'agir sur elle même et sur l'environnement, contient une représentation partielle de son environnement, et peut communiquer avec d'autres agents de cet environnement, pour pouvoir coordonner leurs buts et leurs plans d'actions pour résoudre un problème.

Une architecture multi agent semble être bien adaptée aux problèmes complexes en prenant les décisions d'une manière décentralisée. Cette approche permet de résoudre des sous problèmes localement avec agent, et de proposer une solution globale en raison des interactions entre les agents. À cet effet, plusieurs programmes d'ordonnancement dans les FMS ont été soutenus par ces architectures, Cowling et al. [Cowling 03, 04], Ouelhadj et al. [Ouelhadj 03], Turgay [Turgay 09], Ruiz et al. [Ruiz 11]...

1.5. Aperçu sur les travaux d'ordonnancement dans les FMS avec flexibilité de routages

1.5.1 L'importance de la flexibilité de routage dans un FMS

Pour faire face à une concurrence internationale, les industriels ont développé la flexibilité de leurs systèmes de production afin d'améliorer leur productivité et la qualité de leurs produits, tout en réduisant les coûts et les délais de fabrication.

La littérature indique l'existence de plusieurs types de flexibilité. Citons par exemple ceux identifiées par Browne et al. [Browne 84] classés en huit types : la flexibilité de la machine, la flexibilité de processus, la flexibilité de produit, la flexibilité de routages, la flexibilité de volume, la flexibilité d'expansion, la flexibilité d'opération, la flexibilité de la production. Sethi et Sethi [Sethi 90] ont enrichi les types de flexibilité pour inclure la flexibilité du système de manutention, la flexibilité du programme et la flexibilité du marché...

La flexibilité de routage est un contributeur majeur de ces flexibilités. Selon Sethi et Sethi [Sethi 90] ce type de flexibilité a été reconnu comme une caractéristique fondamentale de la flexibilité globale d'un FMS car elle améliore les performances du système en facilitant l'ordonnancement des pièces avec un très bon équilibre de charges de machines et permet au système de produire les différentes familles des pièces sans interruptions.

La littérature propose différentes définitions de la flexibilité de routages. La majorité d'entre elles sont liées à la présence de routages alternatifs. Bilge et al. [Bilge 08], Joseph et Sridharan [Joseph 11a] ont défini la flexibilité de routage comme la capacité du système à fournir des routages alternatifs multiples pour produire un ensemble de pièces. Cette définition est similaire à celle donnée dans [Benjaafar 93], [Carter 86] sauf qu'ils ont ajouté la composition de routages en termes de machines et séquences, ils voient que la flexibilité de routages est la production de routages alternatifs qui comprennent l'utilisation de machines et de séquences alternatives. D'autres ont lié la flexibilité de routages à la capacité de ré-routage en cas de présence d'un aléa. Ali et Wadhwa [Ali 10], Wahab et Stoyan [Wahab 08] pensent que la flexibilité de routage est la capacité du système à manipuler les pannes et continuer la production des pièces demandées. Elle a été définie par Chang [Chang 07] comme étant la capacité du système de production à fournir des routages alternatifs multiples pour produire un ensemble de pièces/ produits économiquement et efficacement et ainsi de permettre au système à terminer les tâches sans éprouver une dégénérescence fatale des performances du système, particulièrement lorsque des incertitudes internes (par exemple, bris de machine) et/ ou externes (par exemple, les commandes urgentes) se produisent. Cette définition prend en compte les deux aspects : la présence de routages alternatifs et la capacité de ré-routage en cas de présence d'aléas.

Malgré l'existence de plusieurs définitions, il est reconnu que la flexibilité de routage existe dans chaque système qui comprend des machines flexibles alternatives ou identiques, des machines à outils redondantes ou des systèmes de manutention polyvalents.... Donc le niveau réalisé de la flexibilité de routages dépend des capacités technologiques du système et ses stratégies de contrôle opérationnel.

La flexibilité de routage peut être traitée comme un outil pour améliorer les performances du système. Ces fins peuvent être identifiées comme suit [Sethi 90], [Nasr 90], [Saygin 04], [Yu 09], [Chang 07] :

- ✓ L'ordonnancement efficace des pièces en balançant mieux les charges de machines.
- ✓ Si les machines sont correctement outillées, les routages alternatifs peuvent produire plusieurs avantages tels que l'augmentation de la productivité d'atelier d'usinage, l'augmentation de l'utilisation des machines, du système de manutention...
- ✓ La minimisation du temps de cycle et des en-cours.
- ✓ Permettre au système de produire les pièces demandées malgré l'occurrence d'événements inattendus tels que les pannes de machines ou lorsque certaines d'entre elles sont dans un état de maintenance, la réception tardive d'outils... ce qui permet également de maintenir les performances du système élevées...

Ce type de flexibilité a été regardé par Joseph et Sridharan [**Joseph 11a**] comme le principal contributeur à la flexibilité d'un FMS. À cet effet, et afin de pouvoir bénéficier de ses avantages, plusieurs ont pris en compte la flexibilité de routage lors de l'implémentation et la configuration des systèmes surtout lors de la formation des cellules flexibles de production tels que Uddin et Shanker [**Uddin 02**], Ahkioon et al. [**Ahkioon 09**], Aryanezhad et al. [**Aryanezhad 09**], Kao et Lin [**Kao 12**], Chan et al. [**Chan 08b**], Garbie et al. [**Garbie 05**]...

Mais selon Yu et Greene [**Yu 09**] sa mise en œuvre entraîne un coût énorme d'installation des machines flexibles, changeurs d'outils et des équipements automatisés... Par conséquent, les gestionnaires du système doivent déterminer le niveau approprié de la flexibilité de routage pour une configuration spécifique du système afin d'équilibrer les avantages et les coûts engagés.

1.5.2 La mesure de la flexibilité de routage

L'étude de la littérature montre qu'il existe un grand nombre de mesures de la flexibilité de routage dans les FMS. Le tableau 1.1 résume notre revue sur ces modèles que nous avons classé en trois catégories : mesures basées sur les routages alternatifs, mesures entropiques et mesures multidimensionnelles. Cette classification est une extension de celle de Yu et Greene [**Yu 09**] qui comprend les mesures basées sur le nombre de routages alternatifs et l'entropie.

Puisqu'il est prévu que ces systèmes doivent fournir des routages différents qui sont tous capables de produire les types de pièces, une majorité de ces mesures sont basées sur les routages alternatifs. Chung et Chen [**Chung 89**] ont proposé une mesure de la flexibilité de routage basée sur le nombre moyen de routages utilisables pour chaque type de pièces. La valeur que peut prendre cette mesure se situe entre 0 et une valeur positive quelconque si plusieurs routages alternatifs sont autorisés. Bernardo et Mohamed [**Bernardo 92**] ont utilisé l'inverse du nombre de routages disponibles comme un seul critère de la mesure de la flexibilité de routage. Chatterjee et al. [**Chatterjee 84**] ont proposé une mesure basée sur le nombre de routages alternatifs disponibles pour les différents types de produits. Shewchuk [**Shewchuk 99**] a mesuré la flexibilité de routage en considérant le nombre de routages, la moyenne de la disponibilité du routage et le nombre de machines alternatives.

Les travaux cités précédemment sont principalement une fonction du nombre de routages, le nombre de machines identiques, et leurs dispositions dans les routages. Ces paramètres peuvent être définis à l'avance car ils sont généralement déterministes. Par conséquent, les modèles proposés sont incapables de prendre en considération les incertitudes et les événements inattendus qui peuvent perturber tout le plan de production.

L'entropie a été développée par Shannon [**Shannon 48**] comme une mesure de l'incertitude ou l'information dans les systèmes probabilistes en thermodynamique. Après, ce concept a été

utilisé pour la mesure du degré de désordre dans les systèmes de production. Plusieurs chercheurs ont proposé des mesures entropiques pour la flexibilité de routage afin de pouvoir faire face aux différents événements qui occurred aléatoirement pendant le processus de production. Kumar [Kumar 87], Yao et Pei [Yao 90] ont développé des mesures applicables lorsqu'il y'a un seul type de pièces et dépendantes de la distribution de probabilité du temps opératoire dans une machine et la probabilité de la réalisation de l'opération dans cette machine. Ces mesures ont été améliorées par Piplani et Wetjens [Piplani 07] pour qu'ils puissent être appliquées à plusieurs types de pièces.

Tableau 1.1 : Un résumé des recherches existantes sur la mesure de la flexibilité de routage

L'article Publié	Routages alternatifs	Entropie	Aspects considérés dans les mesures multi dimensionnelles			
			Efficacité	Versatilité	Variété	Autres
[Chung 89]	X					
[Bemardo 92]	X ^a					
[Chatterjee 84]	X ^a					
[Shewchuk 99]	X ^{a, b}					
[Kumar 87]		X ^c				
[Yao 90]		X ^c				
[Piplani 07]		X				
[Chang 07]		X	X	X	X	
[Joseph 11a]			X	X	X	
[Yu 09]	X					X
[Wahab 08]	X		X			X
[Zahran 90]	X ^a		X			

a : Mesure qui considère la disponibilité du routage. b : Prise en compte du nombre de machines alternatives. c : Entropie applicable lorsqu'il y'a un seul type de pièces.

Malgré leurs avantages, il y'a aussi plusieurs limitations de l'utilisation de l'entropie comme une mesure de la flexibilité. Selon Shuiabi et al. [Shuiabi 05] l'entropie est une mesure relative, donc elle ne peut pas être utilisée pour les mesures absolues, ou pour indiquer la réalisation des objectifs prédéfinis. Par conséquent, il est toujours nécessaire d'utiliser une métrique d'accompagnement pour indiquer l'état de ce qui est mesuré et de donner un aperçu de la causalité.

Les mesures mentionnées ci-dessus sont basées sur un seul critère présentant généralement une vision limitée du système. Par contre, d'autres travaux ont utilisé des mesures multi dimensionnelles pour la flexibilité de routages. Donc, en plus du nombre de routages, ces travaux sont basés sur d'autres dimensions qui sont classées par Chang [Chang 07] en trois directions, la dimension de l'intervalle (range dimension) définie par l'ensemble de routages alternatifs, le temps ou bien la durée requise pour le changement de la réalisation de différentes tâches et les coûts qui représentent la perte financière liée à ces changements. Il a proposé une mesure multi attributs qui intègre l'efficacité de routage basée sur le temps de cycle (flow time) du routage, la versatilité du

routage qui implique que si le nombre de routages disponibles pour la production d'une pièce augmente, la flexibilité du système sera plus grande, et la variété de routages qui exprime la différence entre les routages de production d'une pièce spécifique. L'entropie est aussi utilisée dans le développement de cette mesure. Joseph et Sridharan [**Joseph 11a**] ont évalué la flexibilité de routages en termes des attributs définis par Chang [**Chang 07**] dans un FMS avec arrivée dynamique de pièces. Yu et Greene [**Yu 09**] ont développé une mesure quantitative pour un système multi étages flexible, en plus du nombre de routages, ils ont pris en compte l'équilibre de charges entre les différentes machines. Wahab et Stoyan [**Wahab 08**] ont proposé deux modèles, un pour la flexibilité de machine et le second concerne la flexibilité de routage qui inclut l'efficacité de routages, la probabilité de transfert d'une opération à un routage alternatif, le nombre de routages possibles dans un système, la disponibilité ou l'utilisation d'une machine. Zahran et al. [**Zahran 90**] ont proposé un modèle basé sur le nombre de routages, la disponibilité d'un routage et son efficacité qui considère le temps de traitement et le temps d'installation d'une opération sur une machine.

1.5.3 L'analyse de l'effet de la flexibilité de routages sur les performances des FMS

Les industriels ont développé la flexibilité de leurs systèmes de production afin d'améliorer leur productivité, leur réactivité, et de pouvoir rester compétitifs dans les contextes du marché actuel. Malgré les avantages offerts par la flexibilité, la littérature suggère également qu'un niveau élevé de la flexibilité peut être difficile à atteindre, à justifier économiquement et peut incrémenter la complexité de management. La flexibilité de routages est l'un de ces types de flexibilité dont la mise en œuvre entraîne un coût d'investissement et une difficulté de réalisation énorme.

À cet effet, plusieurs travaux se sont intéressés à l'analyse de son effet sur les performances des FMS afin de pouvoir aider les gestionnaires à déterminer le niveau approprié pour leurs systèmes en bénéficiant de ses avantages et minimisant les coûts. L'impact de la flexibilité de routage ne peut être étudié indépendamment des autres paramètres qui doivent être considérés en incluant les différents types de décisions, les objectifs de production, les contraintes physiques et opérationnelles des systèmes... Nous avons classé les articles présentant des études sous cette direction selon les différentes mesures de performances considérées en trois catégories : études liées au temps de cycle, études incluant les retards des opérations et d'autres études qui incluent l'utilisation des ateliers, le temps d'attente, les en-cours, les sorties du système... Les synthèses des travaux de chaque catégorie sont présentées dans le tableau 1.2.

Plusieurs études sont basées sur le temps de cycle, Chan et al. [**Chan 06**] analysent en se basant sur le makespan l'effet des niveaux de la flexibilité de routages sous des caractéristiques opératoires et physiques déterministes de l'atelier normalisées en terme d'incrémentations du temps opératoire sur les machines alternatives. Ali et Wadhwa [**Ali 10**] reportent sur une étude en simulation pour analyser l'impact de la flexibilité de routage, nombre de palettes, les conditions de la charge du système et les règles de séquençement sur le makespan. Il a été trouvé que l'incrémentations de la flexibilité de routage ne peut être traitée comme un rôle clé dans les améliorations apportées au système. Il est aussi observé que les conditions de la charge du système ont le plus grand impact tandis que l'effet du nombre de palettes est le moins important. Ali et Wadhwa [**Ali 05**] ont considéré trois niveaux de la flexibilité de routages (aucune flexibilité, flexibilité partielle et flexibilité complète). Ils ont trouvé que la flexibilité partielle donne les meilleures performances à différentes capacités des tampons de stockage. Wadhwa et al. [**Wadhwa 10**] ont présenté une étude en simulation qui analyse l'impact du pourcentage de pièces mixtes et la

flexibilité de routages combinée avec un ensemble de règles de priorité sur les performances du système.

Le tableau 1.2 : Un résumé des recherches existantes sur l'analyse de l'effet de la flexibilité de routage sur les performances des FMS

L'article Publié	Les effets étudiés et les conditions considérées					Les mesures de performances			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
[Chan 06]	X			*		X			
[Ali 10]	X	X		X		X			
[Ali 05]	X ^a			*		X			
[Wadhwa 10]	X	X			X	X			
[Chan 07]	X			X		X			
[Caprihan 97]	X					X			
[Tsubone 99a]	X		X	*		X			
[Chan 08a]	X	X ^b				X			
[Tsubone 99b]	X		X	*	*	X	X		
[Mahmoodi 99]	X	X		*		X	X		
[Joseph 11b]	X	X ^c	X		*	X	X		
[Joseph 11c]	X	X	X		*	X	X		
[Lin 91]	X	X				X		X	X
[Garavelli 01]	X ^e					X			X
[Chan 01]	X			*	*	X		X	
[Shafiq 10]	X	X	X	X	X	X		X	X
[Nomden 08]	X ^{d,e}			X	X	X		X	

1 : Flexibilité de routage. 2 : Approches d'ordonnancement. 3 : Autres flexibilités. 4 : Conditions endogènes. 5 : Conditions exogènes. 6 : Temps de cycle ou makespan. 7 : Retards. 8 : Utilisation du système. 9 : Autres indicateurs.

* : Variations considérées mais sans études de leurs effets. a : Analyse considérant les trois niveaux de flexibilité de routage (aucune flexibilité, flexibilité partielle et flexibilité complète). b : Différents modes de contrôle sont considérés (réactif, proactif...). c : L'effet de modèles d'assignement des dates dues dynamiques est étudié. d : Flexibilité de routage modélisée en se basant sur plusieurs dimensions. e : Systèmes décomposés en cellules.

Chan et al. [Chan 07] ont étudié l'impact de variations des paramètres des machines alternatives sur les performances du système sous plusieurs niveaux de flexibilité de routage afin d'identifier le niveau de variation qui ne limite pas les avantages de la flexibilité. La méthode de Taguchi a été utilisée pour aider le décideur à avoir une vision sur l'importance relative de différents facteurs. Caprihan et Wadhwa [Caprihan 97] ont présenté une plateforme basée sur la conception expérimentale de Taguchi pour étudier l'impact de la flexibilité de routage sur les performances du système. Tsubone et Horikawa [Tsubone 99a] ont évalué la flexibilité de la machine et de routage en terme du temps de cycle moyen de pièces dans plusieurs environnements d'ateliers sous plusieurs conditions telles que la variance du temps opératoire, le temps de

d'installation, la charge du système, les pannes de machines. Chan et al. [**Chan 08a**] ont contribué par une approche à l'aide de la simulation sous la méthode de Taguchi pour étudier des paramètres variés liés aux niveaux de la flexibilité de routage et les différentes stratégies de contrôle comme la sélection de machines et de pièces sous différents modes de décisions comme le contrôle en temps réel, le contrôle réactif et proactif...

Plusieurs travaux ont pris en compte des critères liés au temps et aux retards simultanément. Tsubone et Horikawa [**Tsubone 99b**] ont investigué l'impact de la flexibilité de la machine, du routage et du volume sur les performances du système évaluées par le pourcentage des opérations en retards, sous les conditions de pannes de machines et les ordres urgents qui ont été introduits simultanément et individuellement dans le système. Mahmoodi et al. [**Mahmoodi 99**] ont examiné par simulation les effets de la flexibilité de routage et les différentes règles de séquençement sur les performances d'un FMS jugées par le temps de cycle moyen, le pourcentage moyen de retards et le retard moyen en considérant plusieurs facteurs liés à la charge du système, sa configuration et la présence de pannes. Joseph et Sridharan [**Joseph 11b**] ont étudié l'effet des modèles d'assignements des dates dues dynamiques, la flexibilité de routage, la flexibilité de séquence et les règles de séquençement de pièces sur les performances d'un FMS évaluées par le temps de cycle moyen, le retard moyen, le pourcentage de pièces en retard, la moyenne du temps restant dans une situation où les pièces arrivent dynamiquement et d'une façon aléatoire. Ils ont analysé aussi dans [**Joseph 11c**] les effets de la flexibilité de routage, de séquence et les règles de séquençement sur les performances du système liées au temps de cycle moyen, la déviation standard du temps de cycle, le retard moyen, la déviation standard sur le retard moyen, le pourcentage de pièces en retard.

Selon Chan [**Chan 03a**] l'investissement d'installation d'un FMS devrait être compensé par l'utilisation du système de la manière la plus efficace. Dans cette direction, d'autres études ont évalué la flexibilité de routage en se basant sur d'autres critères de performances incluant en particulier, en plus du temps de cycle et des retards, l'utilisation du système, le temps d'attente dans les différents tampons, les en-cours, les sorties du système... Lin et Solberg [**Lin 91**] ont reporté une investigation de l'impact de la représentation du plan de processus de pièces (la flexibilité de routage) et les différents algorithmes adaptatifs de routage sur les performances du système. Les résultats indiquent que la flexibilité de routage peut réduire le temps de cycle, augmenter l'utilisation de machines et la productivité du système. Garavelli [**Garavelli 01**] a analysé l'impact de la flexibilité de routage intercellulaire qui permet aux produits et aux ressources d'être chaînés par un nombre minimal de liens basés sur différentes mesures de performances telles que les délais de réalisation et les en-cours. Chan [**Chan 01**] a présenté une plateforme basée sur la méthode de Taguchi pour analyser les effets de la flexibilité de routages sur les performances du système jugées par le makespan, les délais de réalisation et l'utilisation de machines. Plusieurs facteurs ont été considérés comme le pourcentage de produits mixtes, le volume de la production et les pannes de machines. Shafiq et al. [**Shafiq 10**] ont développé une plateforme pour étudier la flexibilité de la production, la flexibilité de routage, les capacités de stocks tempos, le nombre de palettes, le volume de pièces, les règles de séquençement sur les performances du système évaluées par le makespan, le coût, l'utilisation de machines, le temps d'attente dans les files. Nomden et Zee [**Nomden 08**] ont investigué la configuration de la flexibilité de routage dans les cellules virtuelles de production basées sur les trois choix liés aux niveaux de la flexibilité de routage (le nombre de routages alternatifs réservés pour une famille de produits), la distribution de la flexibilité de routage (les différents types de pièces liés au routage) et le nombre de machines secondaires. Afin de

pouvoir déterminer le meilleur choix qui améliore le temps de cycle moyen et l'utilisation de l'atelier, ils ont conduit une étude sur trois configurations de cellules sous différentes caractéristiques telle que le nombre de types de pièces...

1.5.4 Les approches proposées pour la résolution des problèmes de routages de pièces

Dans un FMS avec flexibilité de routage, les pièces peuvent suivre différents routages dont chacun est composé d'une séquence de machines, ce qui permet de traiter chaque opération dans différentes machines. Pour effectuer les traitements requis sur les différentes pièces, plusieurs contraintes sont à prendre en compte telles que les contraintes disjonctives et conjonctives des opérations, les contraintes de chargements de machines qui utilisent des outils, qui sont regroupées par type. En plus de ces problèmes liés aux machines, les capacités supplémentaires et alternatives qui rendent le système plus flexible, augmentent le nombre de variables de décision et les contraintes associées à chaque domaine du problème, avec des critères secondaires qui affectent les objectifs principaux de la production tels que l'équilibre de charges de machines pour éviter les goulots d'étranglement, le traitement des opérations identiques sur les mêmes machines pour minimiser les mouvements et le temps de préparation de ressources... Malgré la complexité des problèmes d'ordonnancement, plusieurs travaux ont été proposés pour les résoudre afin de pouvoir bénéficier des avantages de la flexibilité de routages. Ces travaux utilisent des approches classées sous différentes catégories incluant en particulier les approches analytiques, les approches heuristiques, la logique floue, les métaheuristiques, les systèmes multi agents... Le tableau 1.3 présente notre synthèse sur ces travaux.

Plusieurs chercheurs ont proposé des approches analytiques pour faire face aux problèmes d'ordonnancement liés aux routages de pièces. Zeballos [Zeballos 10a] a développé un modèle de programmation par contraintes pour l'ordonnancement dans un FMS en considérant les décisions d'allocation et de planification des outils, d'assignement des machines, de routages de pièces, de synchronisation des tâches. La formulation qui prend en compte plusieurs contraintes liées à l'environnement industriel comme la durée de vie et la limitation du nombre d'outils, la capacité des magasins à outils a été résolue par une relaxation lagrangienne et une stratégie de recherche, et a été évaluée par le makespan, le retard, le coût de traitement... Drótos et al. [Drótos 09] se sont intéressés à une étude d'un cas du secteur d'éclairage qui peut être vu comme un Job Shop avec des routages alternatifs. Ils ont proposé une méthode à base d'une relaxation lagrangienne améliorée par une recherche locale pour résoudre un système mixte d'un programme linéaire en nombres entiers évalué par la minimisation du retard total des jobs. Zeballos et al. [Zeballos 10b] ont proposé un modèle de programmation par contraintes intégrées pour lutter contre les problèmes d'allocation d'outils, le chargement de machines, le routage des pièces et d'autres problèmes d'ordonnancement en prenant en compte des contraintes qui apparaissent dans un milieu industriel liées aux machines, au système de manutention et aux coûts d'installation. Le modèle a été testé en plusieurs cas d'études de différentes tailles en vue de minimiser le makespan, le nombre total de copies d'outils. Özgüven et al. [Özgüven 10] ont développé un système mixte d'un programme linéaire en nombres entiers pour résoudre le problème d'ordonnancement dans un Job Shop flexible (Flexible job shop problem (FJSP)) qui englobe les sous problèmes de routage et de séquençement et un système mixte amélioré pour un FJSP avec la flexibilité du plan de processus pour la minimisation du makespan. Kesen et al. [Kesen 10a] ont proposé une formulation mixte d'un programme linéaire multiobjectif en nombres entiers pour l'ordonnancement de jobs dans une cellule de production virtuelle en présence de différents routages de traitements pour les jobs multiples et de différents types de

machines dont plusieurs sont identiques pour la minimisation du makespan et la distance totale du voyage (total traveling distance).

Le tableau 1.3 : Un résumé sur les approches proposées pour le routage de pièces

Article publié	Les approches de résolution					Les mesures de performances			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
[Zeballos 10a]	X ^a			X		X	X		X
[Drótos 09]	X ^b			X			X		
[Zeballos 10b]	X ^a					X			X
[Özgüven 10]	X ^a					X			
[Kesen 10a]	X					X			X
[ElMekkawy 03]		X ^b				X		X	
[Jang 01]		X ^b				X	X		
[Ozmutlu 05]		X ^b				X			
[Matsui 09]		X					X		
[Guo 09]		X				X			X
[Tung 99]		X				X	X		X
[Albey 11]		X ^a							X
[Saygin 01]		X ^b						X	X
[Hassam 10]		X ^b						X	X
[Souier 12a]		X ^{b, c}						X	X
[Bilge 08]			X ^b			X			X
[Chan 03b]			X			X	X		
[Caprihan 06]		X	X			X	X		
[Lu 11]		X	X ^a			X	X		
[Domingos 03]			X ^{a, b}			X	X		
[Kumar 11]				X ^a		X			
[Kesen 10b]				X		X			X
[Rossi 09]				X ^c		X			
[Zhao 01]				X ^a			X		
[Chen 05]				X		X		X	X
[Kim 07]				X ^{a, c}		X			
[Rossi 07]				X		X			
[Low 06]				X		X	X		X
[Giovanni 10]				X ^d		X			
[Pitts 09]				X ^{a, c}		X			
[Moon 08]				X ^b		X	X		
[Defersha 12]				X		X			
[Wang 08]				X	X		X		
[Wong 06]					X ^{a, b}	X		X	
[Leung 10]				X	X	X			
[Indrayadi 02]					X ^a		X		
[Badr 10]					X ^{a, b}	X			X

1 : Modèles analytiques. 2 : Heuristiques. 3 : Logique floue. 4 : Métaheuristiques. 5 : Systèmes multi agents. 6 : Temps de cycle ou makespan. 7 : Retards. 8 : Utilisation ou productivité du système. 9 : Autres indicateurs. a : Problèmes nécessitant plusieurs types de décisions. b : investigation avec présence de perturbations. c : Métaheuristiques hybrides.

Les méthodes heuristiques proposées dans la littérature pour l'ordonnancement dans les FMS sont nombreuses. Beaucoup d'entre elles s'adressent aux problèmes de routages de pièces. ElMekkawy et ElMaraghy [ElMekkawy 03] ont développé un algorithme de ré-ordonnancement qui utilise les réseaux de Pétri temporisés pour faire face aux différentes sources de perturbations comme les pannes de machines en temps réel. L'existence de routages alternatifs, la disponibilité du système de manutention, la limitation des capacités des tampons de stockage a été prise en compte. L'analyse des résultats de simulation évalués par le temps de cycle, le makespan, la moyenne de l'utilisation des machines a indiqué que l'utilisation du système avec flexibilité de routages améliore ses performances. Jang et Suh [Jang 01] ont proposé un «look ahead procédure» de routage dans un système de production très instructif (Highly informative manufacturing system (HIMS)). La procédure qui utilise les informations de l'état du système dans le futur proche a été évaluée par le temps de cycle, le retard dans différents cas considérés en simulation avec du temps opératoire stochastique, arrivée aléatoire des pièces... Ozmutlu et Harmonosky [Ozmutlu 05] ont proposé une stratégie efficace du routage nommée «Threshold-based alternate routing» pour la minimisation du temps de cycle de pièces dans un FMS avec flexibilité de routage en considérant plusieurs paramètres liés aux pannes de machines, aux tailles de files d'attente, au nombre de machines alternatives, au nombre de types de pièces.

Matsui [Matsui 09] a évalué les performances d'un FMS avec des capacités de stockage limitées, en utilisant des décisions de routages statiques et dynamiques basées respectivement sur la probabilité de routage et le nombre de pièces dans la file d'attente de chaque groupe de machines. Le routage dynamique a surpassé les décisions statiques en terme de sorties du système et d'utilisation des machines particulièrement lorsque les charges de machines sont équilibrées. Guo et al. [Guo 09] ont investigué les problèmes de contrôle de production dans une ligne d'assemblage flexible. Un système intelligent de décisions a été développé, ce système utilise une heuristique de routage de pièces basée sur le nombre d'opérations qui ont été assignées à chaque machine. Cette approche a été évaluée en termes du temps de cycle, du temps libre, de l'efficacité de la ligne... Tung et al. [Tung 99] ont proposé une approche hiérarchique pour l'ordonnancement dans un FMS où les décisions de routages de pièces sont prises en utilisant des règles de priorité afin de minimiser le coût de retard, le coût des en-cours, le temps de cycle... Albey et Bilge [Albey 11] ont proposé une plateforme hiérarchique de planification de production conçue pour un FMS en prenant en compte les pièces mixtes, la charge, les décisions opérationnelles telles que celles de routage faites en utilisant la règle Smallest Work In Next Queue (SWINQ). La qualité de la solution a été évaluée par le pourcentage de la satisfaction des demandes et le coût total final mesuré jusqu'à la fin d'exécution de l'horizon de la planification (après une période fixe).

Saygin et Kilic [Saygin 99] ont proposé une plateforme qui intègre le processus de la planification flexible et l'ordonnancement prédictif (en temps différé), ils ont présenté un concept nommé Dissimilarity Maximisation Method (DMM) pour minimiser la congestion dans un FMS, l'idée de cette règle est de maximiser les dissimilarités entre les routages occupés. L'efficacité de cette règle dans la résolution des problèmes de sélection de routage en temps réel a été démontré dans [Saygin 01] où elle a surpassé d'autres règles telles que FIFO/ FA (First-In First-Out/ First Available) et EPL (Equal Probability Loading) si chaque machine utilise la règle FIFO en terme du taux de production, de taux d'utilisation de l'AGV, d'utilisation des machines. D'un autre côté cette méthode augmente les en-cours. Dans l'étude de Hassam et Sari [Hassam 10] sur la règle DMM, ils ont remarqué que pour un taux d'arrivée de pièces important et pour une capacité de files d'attente

faible le système de production est saturé et 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 ils ont proposé la règle DMM modifiée qui est une modification de la règle DMM qui vise à garder le même principe mais si tous les routages sont sélectionnés par des pièces, 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. Dans **[Souier 12a]** nous avons proposé une amélioration de la règle DMM modifiée en développant un coefficient de dissimilitude qui prend en considération la probabilité d'occurrences des pannes.

En raison des besoins d'exprimer les connaissances imprécises liées aux approximations dues à la complexité des systèmes qui compliquent l'obtention de mesures précises ou la collection d'informations, plusieurs chercheurs ont pensé à des approches basées sur la logique floue. Bilge et al. **[Bilge 08]** ont investigué les problèmes d'ordonnancement dans les FMS avec une flexibilité totale des routages. Ils ont proposé trois nouvelles approches incluant la logique floue appliquées pour le routage dynamique de pièces. Le système flou de sélection de routages prend les décisions en fonction de l'état du système en se basant sur des critères locaux multiples comme le temps opératoire, le temps d'attente, le temps de déplacement afin de pouvoir améliorer les performances du système évaluées par le temps de cycle moyen et les jobs terminés (completed jobs). Chan et al. **[Chan 03b]** ont développé un système expert intelligent et flou pour l'ordonnancement en temps réel de pièces ayant des routages alternatifs en considérant plusieurs facteurs tels que les nombres minimaux/ maximaux du temps opératoire, les nombres minimaux et maximaux des étapes opératoires. Le système a été évalué en se basant sur plusieurs indicateurs tels que la moyenne du temps de cycle, la moyenne du retard global, la moyenne du retard algébrique...

Caprihan et al. **[Caprihan 06]** ont proposé une stratégie basée sur la logique floue pour différentes décisions d'ordonnancement dans un FMS en utilisant des critères flous relatifs aux Work In Next Queue (WINQ) et Number In Next Queue (NINQ). L'approche floue a surpassé les règles WINQ et NINQ en termes du retard global moyen, le pourcentage de retards et le temps de cycle moyen. Lu et Liu **[Lu 11]** ont développé une stratégie de sélection dynamique de règles de priorité pour de multiples mesures de performances basées sur les inférences floues en prenant des décisions de sélection des règles appropriées aux différents points de décisions tels que les sélections des pièces, des machines, des routages pour atteindre les objectifs de production liés au temps de cycle minimal moyen, au retard minimal moyen... Domingos et Polianto **[Domingos 03]** ont proposé une procédure pour l'ordonnancement en ligne qui utilise un système de décisions basé sur la logique floue en considérant différents points principaux comme l'ordonnancement de pièces au niveaux des machines, des systèmes de transport, des routages alternatifs, de l'entrée aléatoire de pièces afin de minimiser le pourcentage de jobs en retard, la moyenne du retard, la moyenne du temps de cycle.

Les métaheuristiques forment une famille d'algorithmes d'optimisation visant à résoudre des problèmes d'optimisation difficile, pour lesquels on ne connaît pas de méthode classique plus efficace. Elles sont généralement utilisées comme des méthodes génériques pouvant optimiser une large gamme de problèmes différents, sans nécessiter de changements profonds dans l'algorithme employé. À cause du succès rencontré par ces techniques dans la résolution de beaucoup de problèmes, plusieurs chercheurs les ont utilisé pour résoudre les problèmes d'ordonnancement dans les FMS avec flexibilité de routage. Kumar et al. **[Kumar 11]** ont investi l'ordonnancement simultané des machines et du système de transport dans un FMS avec des machines alternatives

pour la minimisation du makespan. Ils ont proposé un algorithme d'assignement de véhicules et une heuristique de sélection de machines qui sont embarqués dans une approche à base de l'évolution différentielle. Kesen et al. [**Kesen 10b**] ont proposé une approche à base d'algorithmes génétiques pour l'ordonnancement de jobs dans une cellule flexible virtuelle en considérant le cas où il y'a des jobs multiples avec différents routages du traitement comprenant des machines multiples dont plusieurs sont identiques. Dans cette approche, les objectifs d'ordonnancement sont le makespan pondéré (weighted makespan) et la distance totale de déplacement. Rossi et Boschi [**Rossi 09**] ont proposé un algorithme de recherche collaborative et distribuée qui combine les algorithmes génétiques et les colonies de fourmis pour l'ordonnancement dans un Job Shop avec des machines parallèles afin de minimiser le makespan.

Zhao et Wu [**Zhao 01**] ont suggéré un algorithme génétique pour le problème de routages flexibles dans un FMS en incluant les exigences de sélection de routages, la sélection de machines et de séquences des opérations afin de minimiser le retard des jobs dans le système. Chen et Ho [**Chen 05**] ont proposé un algorithme génétique multi objectifs et efficace pour résoudre le problème de la planification de la production dans un FMS où les opérations sont réalisées sur des machines alternatives pour atteindre plusieurs objectifs comme la minimisation du temps de cycle, la minimisation du déséquilibre des charges de machines, du coût total d'outillage... Kim et al. [**Kim 07**] ont considéré le problème d'ordonnancement intégré dans un FMS qui se compose de plusieurs sous problèmes liés au chargement, au routage et au séquençement. Ils ont proposé un algorithme évolutionnaire symbiotique en considérant le makespan comme objectif de leur ordonnancement simultané.

Rossi et Dini [**Rossi 07**] ont développé un système software à base des colonies de fourmis pour l'ordonnancement dans un FMS de type Job Shop avec flexibilité de routage, l'installation dépendante de la séquence et la considération du temps de transport dont le but est de minimiser le makespan. Low et al. [**Low 06**] ont développé un modèle multi objectifs d'ordonnancement dans un FMS avec flexibilité de routage pour la minimisation du temps de cycle, la minimisation du retard, la minimisation du temps libre. Ce modèle a été résolu en combinant la recherche locale avec le recuit simulé et la recherche tabou. Giovanni et Pezzella [**Giovanni 10**] ont proposé un algorithme génétique amélioré pour résoudre le problème d'ordonnancement dans un Job Shop flexible et distribué où les jobs sont traités dans différentes unités flexibles de production, sur différentes machines alternatives pour minimiser le makespan global. L'algorithme proposé utilise en plus des opérateurs de croisement et de mutation, un nouvel opérateur de recherche.

Pitts et Ventura [**Pitts 09**] ont investigué le problème de routage et de séquençement de jobs dans une cellule flexible de production afin de minimiser le makespan et pour le faire ils ont formulé un modèle mathématique capable de trouver une solution optimale dans les cas de petites instances. Un algorithme basé sur la recherche tabou à deux étages a été développé pour résoudre les problèmes de moyenne et de grande taille efficacement. Moon et al. [**Moon 08**] ont proposé une formulation linéaire mixte en nombres entiers pour l'ordonnancement dans un Job Shop avec des routages alternatifs. La formulation peut être utilisée pour les petits problèmes ou pour tester les heuristiques existantes. Un algorithme génétique a été développé pour les grandes instances du problème en considérant plusieurs critères liés au temps de cycle moyen, le makespan, le retard algébrique... Defersha et Chen [**Defersha 12**] ont proposé un modèle pour les lots ordonnancables (lot streaming) dans un environnement de type Job Shop flexible en considérant plusieurs facteurs tels que les temps d'installation dépendants des séquences, la flexibilité de routage. Puisque le

problème est NP-difficile, un algorithme génétique parallèle a été proposé pour le résoudre efficacement afin de pouvoir minimiser le makespan.

L'utilisation des systèmes multi agents permet de prendre les décisions d'une manière décentralisée, la résolution des sous problèmes localement par les agents et leur interaction permet de proposer une solution globale. Dans le cadre de résolution des problèmes d'ordonnancement, plusieurs chercheurs ont proposé des solutions basées sur cette approche qui semble bien adaptée aux problèmes complexes. Wang et al. [Wang 08] ont proposé une approche multi agents hybride d'ordonnancement dynamique dans un FMS avec flexibilité de routage et cellules multiples. Cette architecture comprend plusieurs agents qui coordonnent les cellules (cell coordinated agents). Afin d'améliorer la qualité des solutions et l'efficacité de la recherche, un algorithme basé sur la recherche faisceau filtré (filtered beam search) a été embarqué au niveau du système, en adoptant la minimisation du retard quadratique pondéré comme fonction objectif. Wong et al. [Wong 06] ont développé deux approches à base d'agents pour l'intégration dynamique du processus de planification et les fonctions d'ordonnancement en considérant les routages et les machines alternatives pour la production de pièces. La première approche comprend les agents des machines et des pièces, la seconde ajoute un superviseur pour former une architecture hybride en considérant le temps de cycle, la moyenne d'utilisation des machines et la somme de déviation des charges de machines.

Leung et al. [Leung 10] ont proposé un système multi agents basé sur les colonies de fourmis pour intégrer le processus de planification et d'ordonnancement dans un atelier avec flexibilité de routages et machines alternatives afin de minimiser le makespan. Indrayadi et al. [Indrayadi 02] ont développé un système multi agents pour l'ordonnancement dans un FMS avec arrivée dynamique des pièces. Ce système combine deux sous systèmes un pour dispatcher les routages et l'autre pour les machines afin de minimiser le coût de retard global et algébrique. Badr et al. [Badr 10] ont proposé une approche à base d'agents pour l'intégration de déplacements de l'AGV et l'ordonnancement conventionnel dans un FMS avec flexibilité de routage afin d'améliorer les performances concernant le makespan, le coût de transport...

Certaines recherches sur l'ordonnancement dans les FMS, nécessitant la prise de décisions de routages de pièces ou de gérer les niveaux de flexibilité de routages efficacement, ont adapté d'autres techniques issues de l'intelligence artificielle telles que l'approche holonique [Lun 00], le processus d'hierarchie analytique (analytical hierarchy process) [Buyurgan 08]...

1.5.5 Synthèse sur les recherches dans le domaine d'ordonnancement dans les FMS avec flexibilité de routage

Dans cette section, nous avons présenté un certain nombre de papiers sur l'étude des problèmes d'ordonnancement dans les FMS avec présence de la flexibilité de routage. Nous avons abordé d'une part, l'importance de la flexibilité de routage en présentant ses différentes définitions extraites de la littérature puis, ses points qui ont motivé les gents pour orienter leurs travaux vers le cadre de sa prise en compte lors du processus de différentes décisions établies pour l'ordonnancement en présence de différents facteurs et paramètres statiques et dynamiques liés aux systèmes qui compliquent souvent sa mise en œuvre.

D'autre part, la mesure de la flexibilité de routage qui a gagné l'intérêt de nombreux chercheurs afin de savoir si leurs systèmes sont suffisamment flexibles, a fait l'objet de la deuxième partie de notre état de l'art. La littérature montre qu'il existe un grand nombre de mesures de la

flexibilité de routage dans les FMS, mais nous avons trouvé une seule classification proposée par Yu et Greene [Yu 09] qui a distingué les mesures basées sur les routages alternatifs et les mesures entropiques. En raison de l'aspect multi dimensionnel des FMS relatif au temps, au coût..., la littérature scientifique a connu surtout ces dix dernières années une émergence de mesures qui prend en considération plus qu'une dimension, ce qui nous a poussé à étendre la classification de Yu et Greene [Yu 09] pour qu'elle puisse intégrer les mesures multi dimensionnelles.

Afin d'équilibrer les avantages et les coûts de la mise en place de la flexibilité de routage au sein des FMS, et de permettre aux gestionnaires du système de déterminer le niveau approprié de la flexibilité de routage pour la configuration du système et en fonction de leurs besoins, et comme nous l'avons vu, de nombreuses études s'intéressent à l'effet de la flexibilité routage sur les performances du système, mais plusieurs sont monocritères, basées surtout sur le makespan alors que les problèmes d'ordonnancement dans les FMS sont généralement multi objectifs. Malgré l'existence de plusieurs études multi critères avec la considération de différentes conditions opératoires et décisions qui influent significativement sur les performances du système. Il y'a un besoin pour la recherche axée sur l'analyse des effets de combinaison de la flexibilité de routage avec les autres flexibilités offertes par les FMS en prenant en compte d'autres exigences telles que la robustesse, la réactivité...

La dernière partie de cette section indique qu'il existe un grand nombre d'articles traitant les problèmes de décisions de routages dans les FMS tout en respectant les critères, les caractéristiques structurelles et comportementales des systèmes... En effet, plusieurs méthodes d'ordonnancement dynamique ou statique, en temps réel ou différé ont été présentées incluant en particulier les approches analytiques, les systèmes multi agents, la logique floue, les métaheuristiques... Le temps de cycle, les retards, le coût, et l'utilisation du système sont les critères de performances les plus étudiées car l'ordonnancement le plus performant en réalité est celui qui permet de gérer efficacement l'effort, pour achever les opérations demandées en minimisant les coûts, les délais... Malheureusement, pour le développement des systèmes pratiques d'ordonnancement dynamique, il est nécessaires de prendre en compte tous ces critères, contraintes et aléas simultanément, ce qui reste toujours un obstacle car plus on se rapproche de la réalité plus le modèle ou le problème devient plus compliqué.

1.6.Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé les spécifications d'ordonnancement dans les systèmes flexibles de production. Nous avons tout d'abord présenté les caractéristiques générales des systèmes flexibles de production. Puis, nous avons décrit la fonction ordonnancement d'une manière générale. Ensuite, nous avons abordé la problématique de la modélisation des problèmes d'ordonnancement dans les FMS. Enfin, nous nous sommes intéressés plus spécifiquement aux problèmes d'ordonnancement dans les FMS qui offrent une flexibilité de routages, ce qui fait l'objet de notre étude.

La plupart des problèmes d'ordonnancement sont classés NP-difficiles [Rinnooy Kan 1976]. Donc les méthodes exactes sont inutiles pour la résolution de tels problèmes surtout ceux de grandes tailles et il s'avère nécessaire d'utiliser des méthodes heuristiques pour les résoudre en un temps raisonnable.

L'avènement des métaheuristiques a permis de résoudre plusieurs problèmes pour lesquels il n'existe pas de méthodes spécifiques, dans notre état de l'art nous avons regroupé les travaux les plus importants qui traitent l'adaptation des métaheuristiques pour résoudre les problèmes de routages dans les FMS sans apporter de détails sur leurs caractéristiques, leurs classifications, leurs algorithmes de base... Puisque nous avons opté pour les métaheuristiques pour résoudre notre problème d'ordonnancement dans un FMS, nous consacrons le chapitre suivant à une présentation détaillée de ces techniques.

Chapitre 2

Un état de l'art sur les Métaheuristiques

2.1.Introduction

Dans leurs activités, les ingénieurs et les décideurs sont confrontés à des problèmes de complexité grandissante en vue de maximiser les bénéfices, minimiser les pertes... Ces problèmes surgissent dans des secteurs techniques ou socio économiques très divers, comme dans la recherche opérationnelle, la conception et l'implémentation des systèmes industriels, la tournée de véhicules, les réseaux informatiques, le traitement d'images, en robotique, en électronique...

Le problème à résoudre peut souvent s'exprimer comme un problème d'optimisation qui occupe à notre époque une place de choix. Ce type de problèmes est formulé en sélectionnant une ou plusieurs variables et en définissant une fonction objectif ou fonction coût que l'on cherche à minimiser ou à maximiser par rapport à tous les paramètres et les contraintes concernés. Le choix d'une méthode efficace capable de produire une solution optimale en un temps de calcul raisonnable est la principale difficulté à laquelle est confronté un décideur pour faire face à un problème d'optimisation.

Selon Talbi [Talbi 09] la complexité du problème donne une indication sur sa difficulté de résolution. En plus, il est très important d'avoir une idée sur la taille du problème et ses instances qui entrent en compte pour le choix d'une méthode d'optimisation. À cet égard, si le problème est de complexité réduite et de petite taille, il peut être résolu par une méthode exacte qui peut être capable d'aboutir à une solution optimale. Par contre, si le problème est d'une complexité tel que le nombre de solutions croît exponentiellement avec la taille du problème, les méthodes exactes sont incapables de le résoudre en un temps polynomial.

Pour ce type de problèmes qui demeurent hors de portée des méthodes exactes, les méthodes heuristiques constituent le moyen le plus efficace pour obtenir une solution de bonne qualité et de se rapprocher le plus possible de la solution optimale en un temps raisonnable. Même si ces heuristiques ne fournissent aucune garantie d'optimalité, elles offrent l'avantage de ne parcourir qu'une fraction de l'espace de recherche pour parvenir à une solution acceptable ce qui leur permet d'être exploitées avec succès sur une large gamme de problèmes pratiques et théoriques. Mais les heuristiques partagent l'inconvénient d'être spécifiques aux problèmes pour lesquels elles étaient conçues, ce qui rend leur développement une tâche difficile nécessitant une grande connaissance du domaine des heuristiques et du problème étudié.

Contrairement aux heuristiques dédiées, les métaheuristiques peuvent être appliquées à n'importe quel type de problèmes sans changements profonds des algorithmes donc elles ont réduit les difficultés des différentes heuristiques. Ces techniques présentent actuellement des alternatives intéressantes pour la résolution des problèmes d'optimisation difficile pour lesquels on ne connaît pas d'algorithmes classiques plus efficaces.

Ces dernières décennies, de nombreuses méthodes de types métaheuristiques sont proposées pour tenter d'améliorer la résolution des problèmes les plus complexes. Ces méthodes sont souvent inspirées d'analogies avec la réalité comme l'éthologie (colonies de fourmis, essaims particuliers), la biologie (algorithmes évolutionnaires, recherche tabou) et la physique (recuit simulé)... Elles sont généralement conçues au départ pour des problèmes discrets mais peuvent s'adapter aux autres types de problèmes.

Nous nous intéressons dans ce chapitre aux métaheuristiques. La prochaine section est consacrée à des généralités sur l'optimisation en présentant sa définition, les classes de complexité et les différentes méthodes d'optimisation. Dans la section 2.2, nous présentons la définition, les domaines d'utilisation, les caractéristiques et la classification des métaheuristiques. La section 2.3 sera consacrée aux principes des métaheuristiques les plus répandues (le recuit simulé (Simulated annealing (SA)), la recherche tabou (Taboo search (TS)), les algorithmes génétiques (Genetic algorithms (GA)), les colonies de fourmis (Ant colony optimisation (ACO)), les essaims particuliers (Particle swarm optimisation (PSO))) en citant leurs définitions, leurs origines et leurs algorithmes de bases. Un intérêt particulier est apporté à la méthode d'optimisation par essaim particulière (OEP), qui représente une approche de résolution principale dans notre travail de thèse.

2.2. Notions de bases liées aux problèmes d'optimisation

2.2.1 Définition d'un problème d'optimisation

Un grand nombre de problèmes d'aide à la décision, comme les problèmes d'apprentissage et d'identification..., peuvent être décrits sous forme de problèmes d'optimisation apparaissent de plus en plus dans des secteurs techniques comme l'électronique, la médecine, la mécanique... Dans chacun d'eux, on cherche un ensemble de solutions possibles qui minimisent ou maximisent une fonction objectif en vérifiant les contraintes du problème qui peuvent être statiques ou dynamiques.

On peut trouver de nombreuses formulations ou définitions mathématiques d'un problème d'optimisation, nous avons retenu celle de Blum et al. [Blum 08] qui ont décrit un problème d'optimisation P comme un triple (S, Ω, f) où :

- ✓ S est l'espace de recherche défini sur un ensemble de variables de décisions. Dans le cas où ces variables ont des domaines discrets, le problème traité est un problème discret ou combinatoire et dans le cas de domaine continu P est appelé problème d'optimisation continu. Il existe aussi des problèmes mixtes qui utilisent à la fois des variables continues et discrètes. Ω est l'ensemble de contraintes d'égalités ou inégalités qui doivent être satisfaites pour qu'une solution soit faisable.
- ✓ $f: S \rightarrow R^+$ est la fonction objectif qui assigne une valeur du coût positive à chaque élément (ou solution) de S .

Le but est de trouver une solution $s^* \in S$ tel que $f(s^*) \leq f(s), \forall s \in S$ (dans le cas où on veut minimiser la fonction objectif) ou $f(s^*) \geq f(s), \forall s \in S$ (cas où la fonction objectif doit être maximisée). Dans plusieurs problèmes, on cherche à optimiser plusieurs fonctions objectifs en

même temps, cette forme d'optimisation est appelée l'optimisation multi objectif, ou encore dynamique si $f(s)$ change avec le temps.

2.2.2 Classes de complexité

La complexité des algorithmes est un indicateur de performance permettant de comparer les différents algorithmes réalisant les mêmes fonctionnalités et proposés pour résoudre un problème en se basant sur le coût de l'exécution des algorithmes en termes du temps (nombre d'opérations effectuées par l'algorithme) et de l'espace mémoire (taille nécessaire pour stocker les différentes structures de données).

En optimisation, la complexité d'un problème est équivalente à celle du meilleur algorithme proposé pour le résoudre, c'est-à-dire un problème est facile s'il existe un algorithme capable de le résoudre en temps polynomial, sinon le problème est considéré comme difficile ou intraitable.

Les problèmes d'optimisation peuvent être classés suivant leur complexité ou le coût de résolution. Selon Garey et Johnson [**Garey 79**] les problèmes peuvent être classés en deux familles, les problèmes de complexité polynomiale et les problèmes dont la complexité est exponentielle. Mais, d'après Talbi [**Talbi 09**] la théorie de complexité est basée sur les problèmes de décision et non d'optimisation. Donc, il y'a une distinction entre les deux problèmes, un problème de décision est un problème qui admet toujours une réponse oui ou non. Cependant, un problème d'optimisation peut toujours être réduit à un problème de décision, en transformant par exemple la fonction objectif en une fonction binaire.

La théorie de complexité qui a été définie dans le cadre des problèmes de décision plutôt que dans celui des problèmes d'optimisation, a classé les problèmes de décisions en plusieurs classes dénommées classes de complexité, chacune d'elles représente un ensemble de problèmes qui peuvent être résolus en utilisant une quantité donnée de ressources de calcul. Voici quelques notions en ce qui concernent ces classes [**Talbi 09**], [**Azem 10**], [**Rebreyend 99**] :

- ✓ La classe de complexité polynomiale P : regroupe l'ensemble des problèmes de décisions traités par des algorithmes déterministes en un temps polynomial.
- ✓ La classe des problèmes NP (Non deterministic Polynomial) est la classe des problèmes de décision pouvant être résolus par un algorithme polynomial non déterministe. Ce type contient un ou plusieurs points de choix dans lequel de multiples suites différentes sont possibles. Ces problèmes peuvent être résolus en énumérant l'ensemble des solutions possibles qui peuvent être évaluées à l'aide d'un algorithme polynomial.

Un problème de décision est NP-complet quand tous les problèmes appartenant à la classe NP lui sont réductibles. Ainsi, s'il existe un algorithme polynomial pour un problème NP-complet alors tous les problèmes de classe NP peuvent être résolus en un temps polynomial.

Un problème d'optimisation est dit NP-difficile (NP-hard) si le problème de décision qui lui correspond est NP-complet. Ces problèmes nécessitent un temps exponentiel pour être résolus. Les métaheuristiques forment une famille d'algorithmes visant à résoudre ce type de problèmes.

2.2.3 Principales méthodes de résolution

En raison de l'importance de l'optimisation, de très nombreuses approches ont été proposées pour la résolution de ces problèmes. À cet effet, il existe dans la littérature plusieurs classifications de ces approches. Une classification consiste à répartir les méthodes d'optimisation, selon leur capacité à résoudre les problèmes, en deux classes : les méthodes dédiées qui sont conçues pour

résoudre de types particuliers de problèmes mais incapables de résoudre d'autres, et les métaheuristiques qui sont capable de résoudre efficacement une variété de types de problèmes.

Une autre classification proposée par Letouzey [**Letouzey 01**] pour les méthodes de résolution des problèmes d'ordonnancement mais applicable pour celles d'optimisation, a classé ces méthodes selon leur manière de résolution de problèmes ou leur principe de fonctionnement, en deux classes :

- ✓ Les approches directes qui sont des approches résolvant le problème en une seule passe.
- ✓ Les approches itératives qui permettent de produire une solution puis de l'améliorer par itérations successives.

Une autre classification de ce point de vue existe dans la thèse de Duvivier [**Duvivier 00**] consiste à classer les approches d'optimisation en quatre catégories :

- ✓ Les méthodes constructives qui complètent à chaque itération une solution partielle pour aboutir à une solution complète.
- ✓ Les méthodes basées sur une décomposition qui décomposent le problème à résoudre en sous problèmes supposés plus faciles.
- ✓ Les méthodes énumératives qui parcourent l'espace de recherche en énumérant partiellement (ou totalement) les points de l'espace de recherche. Contrairement aux méthodes constructives qui manipulent des solutions partielles, les méthodes énumératives travaillent sur des solutions complètes.
- ✓ Les méthodes amélioratrices qui consistent à générer une solution initiale puis chercher à l'améliorer en se déplaçant à chaque itération autour de son voisinage.

Selon la complexité d'un problème, il peut être résolu par des méthodes exactes ou des méthodes approximatives, cette classification a été adoptée par plusieurs chercheurs comme Talbi [**Talbi 09**], Azem [**Azem 10**]... :

- ✓ Les méthodes (ou algorithmes) exactes garantissent de trouver la solution optimale et de prouver son optimalité. Mais, seuls les problèmes de petites et moyennes tailles peuvent être résolus de façon optimale par ces algorithmes. Parmi ces méthodes, on trouve la programmation dynamique, la programmation par contraintes, la programmation linéaire, la séparation-évaluation (branch and bound)...
- ✓ Les méthodes approximatives : sous cette catégorie, on trouve les méthodes heuristiques qui sont capable d'exploiter l'espace de recherche d'un problème qui n'a pas une méthode de résolution exacte afin de trouver une solution de qualité satisfaisante et dans des délais raisonnables, mais sans offrir aucune garantie d'optimalité. On peut distinguer plusieurs types d'heuristiques selon plusieurs dimensions de classification, les heuristiques gloutonnes, les heuristiques aléatoires, les heuristiques de construction ou de décomposition, les métaheuristiques qui sont plus générales et peuvent être appliquées à plusieurs catégories de problèmes...

Dans cette classification, les métaheuristiques ont été vues comme des heuristiques générales. Mais plusieurs auteurs qui ont adopté cette classification comme Rebreyend [**Rebreyend 99**], Dréo [**Dréo 04**], Meignan [**Meignan 08**] ont distingués ces techniques des autres heuristiques.

2.3.Généralités sur les métaheuristiques

Les métaheuristiques sont une branche de l'optimisation en informatique et mathématiques appliquées. Elles sont apparues au début des années 1980 dans le but de résoudre au mieux les problèmes dits d'optimisation difficile. En effet, celles-ci s'appliquent à toutes sortes de problèmes

discrets, et elles peuvent s'adapter aussi aux problèmes continus ou mixtes. Elles partent de principes plus génériques que les heuristiques et sont susceptibles de s'appliquer à un cadre plus large de problèmes, tandis qu'une heuristique est particulière pour un problème donné.

Actuellement, ces techniques ont gagné l'intérêt de différentes communautés scientifiques ou industrielles spécialisées en différents domaines de recherche, y compris l'intelligence artificielle, la recherche opérationnelle... Mais, leur capacité à être appliquées avec succès dans de nombreux problèmes avec un minimum d'informations est contrebalancée par le fait qu'elles n'offrent aucune preuve d'optimalité. Une liste non exhaustive de ces techniques est dressée dans le tableau 2.1, qui synthétise leurs références originales, leurs phénomènes d'inspiration, ainsi que des exemples de leurs applications.

Tableau 2.1 : Exemples de métaheuristiques et de leurs applications

Métaheuristiques	Références originales, phénomènes d'inspiration	Exemples d'applications
Colonies de fourmis	Comportement de fourmis réelles, [Dorigo 92]	✓ Réseaux de télécommunication [Zhang 10]. ✓ Formation de cellules de production [Prabhakaran 05]...
Essaims particulaires	Comportements sociaux des animaux, [Eberhart 95]	✓ Applications médicales [Li 05]. ✓ Systèmes électriques [Kassabalidis 02]. ✓ Voyageur de commerce [Marinakis 10]...
Algorithmes génétiques	évolution naturelle des espèces, [Holland 75]	✓ Ordonnancement de projet [Torres 10]. ✓ La sécurité des systèmes de communication [Karras 04]...
Recuit simulé	Phénomène physique du recuit, [Kirkpatrick 83]	✓ Problème du sac à dos [Drexl 98]. ✓ Applications en multimédia [Terzi 04]... ✓ Systèmes automatisés de stockage et de déstockage [Bessenouci 12]...
Recherche tabou	Mémoire humaine [Glover 86]	✓ Problèmes d'affectation quadratique [Unver 11]. ✓ Problèmes d'allocation de ressources [Belfares 07]...
L'électromagnétisme	Théorie d'électromagnétisme (attraction -répulsion) [Birbil 03]	✓ Tournée de véhicule [Yurtkuran 10]. ✓ Systèmes de production re-configurables [Guan 12].
Système immunitaire artificiel	Système immunitaire naturel, [Farmer 86]	✓ Allocation dans les chaînes logistiques [Prakash 11]. ✓ Planification des séquences d'assemblage [Chang 09]...
Colonies d'abeilles	Comportement d'un essaim d'abeilles [Karaboga 05]	✓ Ordonnancement dans un Open Shop [Huang 11]. ✓ Routage dans les réseaux optiques [Kavian 12]...

2.3.1 Définitions et caractéristiques

En raison de la généralité du concept des métaheuristiques, il est très difficile de donner une définition précise de ce qu'est une métaheuristique. Dans ce qui suit, nous citons quelques définitions qui sont apparues dans la littérature et dont chacune traite quelques propriétés des métaheuristiques :

Blum et al. [**Blum 08**] ont pensé que les métaheuristiques sont des algorithmes qui effectuent des recherches dirigées au hasard de solutions possibles, optimales ou quasi optimales, à un problème jusqu'à ce qu'une condition d'arrêt particulière soit atteinte ou après un nombre prédéfini d'itérations. Tfaili [**Tfaili 08**] a déclaré que les métaheuristiques constituent une famille d'algorithmes inspirés de la nature. Ces algorithmes sont particulièrement utiles pour résoudre des problèmes pour lesquels les algorithmes d'optimisation classiques sont incapables de produire des résultats satisfaisants.

D'après Ben Othman [**Ben Othman 09**] les métaheuristiques sont des méthodes de recherche générales, dédiées aux problèmes d'optimisation difficile. Elles sont, en général, présentées sous forme de concepts. Voss et al. [**Voss 99**] ont défini les métaheuristiques comme un processus itératif qui guide et modifie les opérations heuristiques subordonnées pour produire efficacement des solutions de haute qualité. Ce processus peut manipuler une solution unique ou un ensemble de solutions à chaque itération. Les heuristiques peuvent être des procédures de recherche locale simple, ou tout simplement des méthodes de construction... Osman et Laporte [**Osman 96**] voient qu'une métaheuristique est formellement définie comme un processus itératif de génération qui guide une heuristique subordonnée en combinant intelligemment différents concepts pour explorer et exploiter l'espace de recherche, les stratégies d'apprentissage sont utilisées pour structurer l'information afin de trouver efficacement des solutions quasi optimales.

Pour notre part, nous pensons que les métaheuristiques peuvent être définis comme une famille d'approches souvent inspirées de phénomènes naturels, et destinées à résoudre une large gamme de problèmes d'optimisation difficile, sans ou avec peu de connaissances sur leurs espaces de recherches. Ces techniques sont généralement décrites par des modèles génériques, mais s'adaptent facilement sans changements profonds de leurs algorithmes de bases.

Malgré qu'il n'existe pas une définition générique pour les métaheuristiques. Il est reconnu que ces techniques partagent des caractéristiques fondamentales [**Widmer 00**], [**Blum 05**], [**Dréo 03**], [**Clerc 04**], [**Blum 03**] :

- ✓ Les métaheuristiques sont dotées de stratégies qui guident le processus de recherche. Elles possèdent des mécanismes permettant d'éviter les optimums locaux, par exemple l'acceptation de la dégradation de la fonction objectif ou l'utilisation d'une population de solutions comme méthode de recherche...
- ✓ La plupart des métaheuristiques sont des algorithmes incertains utilisant des processus aléatoires comme moyens de récolter de l'information et de parcourir l'espace de recherche afin de trouver une solution satisfaisante.
- ✓ Les techniques qui constituent les métaheuristiques vont de la simple procédure de recherche locale à des processus d'apprentissage complexe.
- ✓ Les métaheuristiques ne donnent aucune garantie d'optimalité.
- ✓ Les métaheuristiques peuvent utiliser l'expérience acquise durant le processus de recherche pour guider les étapes suivantes du processus.

- ✓ En plus de cette base stochastique, les métaheuristiques sont généralement itératives, c'est à dire qu'un même schéma de recherche est appliqué plusieurs fois au cours de l'optimisation, et directes, c'est à dire qu'elles n'utilisent pas l'information du gradient de la fonction objectif.
- ✓ Certaines métaheuristiques récentes introduisent des mécanismes pour adapter et guider la recherche dynamiquement.
- ✓ Les métaheuristiques du fait de leur capacité à être utilisées sur un grand nombre de problèmes différents, se prêtent facilement à des extensions.
- ✓ Souvent d'origine discrète à l'exception de certaines comme les essaims de particules et l'électromagnétisme.
- ✓ Elles sont inspirées par analogie avec la réalité : avec la physique (le recuit simulé), avec la biologie (les algorithmes génétiques) ou avec l'éthologie (les colonies de fourmis)...
- ✓ Les concepts de base des métaheuristiques peuvent être décrits de manière abstraite, sans faire appel aux problèmes traités. Elles peuvent aussi encapsuler les informations spécifiques à ces problèmes.
- ✓ Les métaheuristiques peuvent contenir des mécanismes qui permettent d'éviter d'être piégé dans des zones de l'espace de recherche.
- ✓ Elles partagent aussi les mêmes inconvénients : les difficultés de réglage des paramètres, et le temps de calcul élevé...

2.3.2 Classification des métaheuristiques

Malgré que les métaheuristiques ont plusieurs caractéristiques communes, il y'a des différences entre ces techniques par rapport à plusieurs critères de classification [Clerc 04], [Talbi 09], [Blum 08]...

Les métaheuristiques peuvent être classées selon leur principe de fonctionnement durant la recherche de la solution en deux catégories les métaheuristiques à solution unique (méthodes de recherche locale ou méthodes de trajectoire) et à base d'une population de solutions. Les métaheuristiques qui ne manipulent qu'une seule solution à la fois, tentent itérativement de la transformer ou de l'améliorer, le recuit simulé et la recherche tabou sont des exemples de cette catégorie. Les métaheuristiques de la deuxième catégorie construisent un ensemble de solutions dans l'espace de recherche afin de pouvoir se diriger vers des solutions optimales. Des exemples des métaheuristiques à population de solutions sont les algorithmes génétiques, les colonies de fourmis...

De nombreux chercheurs préfèrent classer les métaheuristiques selon leur origine. Donc il y'a une différence entre les métaheuristiques qui s'inspirent de phénomènes naturels et celles qui ne s'en inspirent pas. Les colonies de fourmis et le recuit simulé s'inspirent respectivement du comportement de fourmis et de phénomène physique du recuit. Par contre, la méthode tabou n'a semble-t-il pas été inspirée par un phénomène naturel.

Certaines métaheuristiques font usage de l'historique de la recherche au cours de l'optimisation, alors que d'autres n'ont aucune mémoire du passé. Les métaheuristiques qui font usage de l'historique de la recherche peuvent le faire de diverses manières. On différencie généralement les méthodes ayant une mémoire à court terme de celles qui ont une mémoire à long terme.

Les métaheuristiques peuvent également être classées selon leur manière d'utiliser la fonction objectif. Étant donné un problème d'optimisation consistant à minimiser une fonction f sur un espace S de solutions, certaines métaheuristiques dites statiques travaillent directement sur f alors que d'autres, dites dynamiques, font usage d'une fonction g obtenue à partir de f en ajoutant quelques composantes qui permettent de modifier la topologie de l'espace de solutions, ces composantes additionnelles peuvent varier durant le processus de recherche.

Une autre façon est de classer les métaheuristiques en deux classes itératives et gloutonnes. Dans les algorithmes itératifs, on commence par une solution complète (ou population de solutions) puis on la transforme à chaque itération en utilisant les opérateurs de recherche. Les algorithmes gloutons commencent à partir d'une solution vide et à chaque étape une variable de décision du problème est affectée jusqu'à l'obtention d'une solution complète. La plupart des métaheuristiques sont de type itératif.

On peut classer les métaheuristiques en fonction du nombre de structures de voisinages utilisées. Étant donné qu'un minimum local relativement à un type de voisinage ne l'est pas forcément pour un autre type de voisinage, il peut être intéressant d'utiliser des métaheuristiques basées sur plusieurs types de voisinages.

On peut aussi distinguer les métaheuristiques déterministes et stochastiques. Les métaheuristiques déterministes utilisent de décisions déterministes (exemple recherche locale ou recherche tabou). Par contre dans la deuxième famille d'algorithmes, certaines règles aléatoires sont appliquées durant la recherche (algorithmes évolutionnaires, recuit simulé). Dans les algorithmes déterministes, le même état initial mènera à la même solution finale, alors que dans les métaheuristiques stochastiques, différentes solutions finales peuvent être obtenues à partir de la même solution initiale.

2.3.3 Concepts principaux de la modélisation des métaheuristiques

En pratique, il y'a une diversité de problèmes d'optimisation avec une évolution continue de leurs modèles liée au modèle lui-même, les objectifs, les contraintes des problèmes. Toutes ces circonstances et les inconvénients des métaheuristiques telles que leur sensibilité au paramétrage et le manque d'une garantie d'optimalité rendent leur adaptation en vue d'aboutir à une solution efficace une tâche qui n'est pas aussi simple. En générale, une résolution efficace d'un problème d'optimisation a besoin de tester plusieurs méthodes, le réglage de paramétrage de la métaheuristique utilisée... Les enjeux des métaheuristiques groupées par Meignan [Meignan 08] peuvent être présentés comme suit :

- ✓ La performance : tout comme les heuristiques, l'objectif d'une métaheuristique est de fournir une méthode de résolution performante en termes de qualité de résultat et de temps de résolution.
- ✓ La robustesse : une métaheuristique doit être capable de résoudre aussi efficacement que possible différentes instances d'un même problème. Il s'agit non seulement de pouvoir traiter de manière efficace des instances de différentes tailles, mais aussi de traiter des instances dont la configuration est différente, tout cela en évitant à l'utilisateur d'intervenir sur les paramètres de la méthode de résolution.
- ✓ La simplicité de mise en œuvre : l'utilisation d'une métaheuristique doit permettre de simplifier le développement par rapport à la mise en œuvre d'une heuristique spécifique au problème traité.

- ✓ La flexibilité : elle se définit par la capacité d'une métaheuristique de traiter différents problèmes en conservant ses performances.

Généralement, l'utilisation d'une métaheuristique pour résoudre un problème d'optimisation nécessite de sélectionner le schéma de la métaheuristique proprement dit, puis l'adapter en prenant en considération les caractéristiques de ce problème. Selon Talbi [Talbi 09] il y'a deux questions de conception liées à toutes les métaheuristiques itératives : la représentation de solutions traitées et la définition de la fonction objectif qui guidera la recherche.

2.3.3.1 La représentation de la solution

L'encodage ou la représentation de solutions est l'une des étapes importantes de l'adaptation de métaheuristique dont l'efficacité nécessite un système de codage permettant la représentation de solutions d'une façon claire, unique, sans redondance, facile à évaluer en permettant à l'algorithme de trouver la meilleure en un temps raisonnable et assurant un compromis entre la quantité d'informations intégrées dans le codage et la complexité des opérateurs (voisinage, reproduction...).

On peut classer le codage en deux catégories principales, le codage direct où les informations de la structure de données du problème sont traitées directement par l'algorithme, ou indirect qui nécessite un décodeur chargé de transformer la structure de données en ajoutant ou modifiant des informations. Le codage indirect peut être utilisé par exemple lorsque les données du problème sont représentées d'une façon non manipulable par les opérateurs de l'algorithme, difficile à évaluer... Plusieurs types de représentations peuvent être appliqués pour la résolution des problèmes d'optimisation tels que le codage binaire, vecteur de valeurs réelles ou entières, permutation avec ou sans répétition...

2.3.3.2 La fonction objectif

La fonction objectif qui peut être définie comme une fonction qui fait correspondre à chaque solution une valeur du coût, est un concept fondamental d'implémentation d'une métaheuristique. Puisqu'elle représente l'élément d'évaluation de la qualité de la solution, elle est utilisée pour guider la recherche vers de bonnes solutions de l'espace de recherche. Pour cette raison, si elle est mal définie, le processus de recherche peut aboutir à de mauvaises ou inacceptables solutions.

En plus des concepts liés à la représentation de solutions et la fonction objectif, deux critères contradictoires doivent être pris en compte durant la conception d'une métaheuristique, la diversification qui met en place des stratégies qui permettent d'explorer un plus grand espace de solutions ce qui permet d'éviter de rester bloqué dans des régions de l'espace de recherche et de s'échapper aux minima locaux, l'intensification qui permet de rechercher des solutions de plus grande qualité en exploitant les solutions trouvées. Un équilibre entre les deux concepts est très important, car le manque de diversification peut conduire à une convergence vers des minima locaux et le manque d'intensification peut rendre l'exploration trop longue due à la non concentration de la recherche dans les zones prometteuses.

2.3.4 Aperçu sur les métaheuristiques les plus répandues

Dans cette section, nous donnons un aperçu sur les principales métaheuristiques. Comme il a été montré dans la section (2.3.2), celles-ci peuvent être regroupées selon plusieurs critères. Dans ce qui suit, ces techniques sont classifiées selon le nombre de solutions utilisées simultanément.

En effet, notre intérêt va se porter sur des métaheuristiques basées sur la recherche locale qui sont le recuit simulé et la recherche tabou, et d'autres basées sur une population de solutions qui sont les algorithmes génétiques, les algorithmes de colonies de fourmis et la méthode d'optimisation par essaim particulaire.

2.3.4.1 Les métaheuristiques à solution unique

2.3.4.1.1 Le recuit simulé

La méthode de recuit simulée a été conçue en 1983 par Kirkpatrick et al. [**Kirkpatrick 83**] qui étaient des spécialistes de physique. Depuis son apparition, elle a eu un impact majeur dans le domaine de la recherche heuristique à cause de sa simplicité et son efficacité dans la résolution de problèmes d'optimisation combinatoire et son extension pour résoudre d'autres types de problèmes.

Kirkpatrick et al. [**Kirkpatrick 83**] ont proposé de traiter ces problèmes en s'inspirant du phénomène physique du recuit utilisé par les métallurgistes pour obtenir un état solide bien ordonné de basse énergie. Le principe de cette expérience consiste à porter le matériau à une haute température T puis baisser lentement celle-ci par paliers suffisamment longs pour que le corps atteigne l'équilibre thermodynamique à chaque palier de température.

Ainsi, pour qu'un métal retrouve une structure proche du cristal parfait, après qu'on chauffe celui-ci à une haute température pour lui donner une énergie élevée, on le refroidit lentement de manière à ce que les atomes aient le temps de s'ordonner régulièrement car si la descente de température est trop rapide, il apparaît des défauts et on obtient dans ce cas une structure métastable.

L'idée d'utiliser la technique du recuit en vue de traiter un problème d'optimisation a donné naissance au recuit simulé qui a exploité une analogie entre un problème d'optimisation et un système physique, illustrée dans le tableau 2.2.

Tableau 2.2 : Analogie entre un problème d'optimisation et un système physique [Dréo 03], [Talbi 09]

Problème d'optimisation	Système physique
Solution	État du système
Fonction objectif	Énergie libre (E)
Paramètres du problème	Coordonnées des particules
Trouver une bonne configuration	Trouver les états à basse énergie
Optimum global	État stable ordonné
Optimum local	État métastable
Recherche locale	Trempe rapide
Le paramètre T	La température

Ce tableau montre bien que cette méthode d'optimisation simule le changement de l'énergie et du comportement d'un système soumis à des processus de réchauffement et refroidissement jusqu'à ce qu'il converge vers un état solide bien ordonné. Les travaux qui permettent de décrire ce phénomène ont été réalisés par Metropolis en 1953 [**Metropolis 53**].

L'exploitation du procédé du recuit pour la résolution d'un problème d'optimisation consiste à considérer la fonction objectif, à minimiser, comme étant l'énergie E du matériau. Chaque solution S représente un état du système correspondant à une énergie $f(s)$ avec l'introduction de la température T comme un paramètre de contrôle de l'algorithme.

Le principe de cet algorithme est simple. Il commence par une température initiale élevée T et une solution initiale qui peut être choisie aléatoirement. A chaque itération de l'algorithme on génère une autre solution par une modification élémentaire de manière aléatoire de la solution courante, ce qui entraîne une variation de l'énergie (ΔE) du système donc de la fonction objectif. Selon ces mouvements, deux scénarios peuvent être considérés :

- ✓ S'il y a une amélioration de la fonction objectif, cette dernière solution est automatiquement acceptée.
- ✓ Si ce mouvement dégrade la fonction objectif, la nouvelle solution n'est pas forcément rejetée, et peut être acceptée avec une probabilité dépendante de la variation de la fonction objectif et de la température. Cette particularité d'acceptation de ces solutions permet de mieux explorer l'espace de recherche et ainsi la probabilité de trouver des solutions satisfaisantes.

Une fois l'équilibre thermodynamique atteint, on diminue lentement la température du système avant de passer à la prochaine itération. La fonction de diminution de la température est très importante, car une faible décroissance de la température peut entraîner une convergence lente de l'algorithme, alors qu'une forte décroissance risque de piéger l'algorithme dans un minimum local. Le processus itère jusqu'à un critère d'arrêt est atteint.

2.3.4.1.2 La recherche tabou

La recherche tabou a été formalisée par Glover en 1986 [Glover 86]. La particularité principale de cette méthode développée pour résoudre des problèmes combinatoires tient dans la mise en œuvre de mécanismes inspirés de la mémoire humaine. Contrairement au recuit simulé totalement dépourvu de mémoire, et donc incapable de tirer les leçons du passé, la méthode tabou utilise la notion de mémoire pour surmonter les optimaux locaux.

Comme le recuit simulé, la méthode tabou est une métaheuristique qui fonctionne avec une seule solution. Mais, à l'inverse du recuit simulé qui génère d'une manière aléatoire une seule solution voisine à chaque itération, dans la recherche tabou, le voisinage $V(s)$ de la solution courante s est examinée en vue de retenir la meilleure solution voisine.

Le principe de base de la méthode tabou est simple, partant d'une solution initiale, son processus itératif, tente de converger vers la solution optimale en remplaçant à chaque itération la solution courante par la meilleure solution trouvée dans son voisinage.

Ce passage d'une solution à une autre se fait en deux étapes, la première consiste à engendrer un ensemble de solutions voisines de la solution courante en un seul mouvement élémentaire, pour ensuite en choisir la meilleure après une évaluation de la fonction objectif f du problème en chacune des configurations construites, ce choix est adopté même si elle est moins bonne que la solution actuelle, c'est le cas lorsque tous les points du voisinage ont une valeur plus élevée; c'est grâce à ce mécanisme d'acceptation de la détérioration de la fonction objectif que la méthode tabou permet d'éviter des minimums locaux de f .

Le danger est alors de revenir à une configuration déjà retenue ou de cycles entre deux solutions. Pour éviter ce phénomène, le mécanisme consiste à interdire, d'où le nom de tabou, l'accès aux dernières solutions explorées dont les informations sont conservées dans une liste taboue qui est une mémoire à court terme et va servir à empêcher tout déplacement vers les dernières solutions visitées.

Cependant, la liste taboue peut restreindre l'espace de recherche ou interdire des mouvements qui peuvent améliorer la fonction objectif. Pour palier à ces inconvénients, certaines conditions appelées critère d'aspiration qui peuvent être définies de plusieurs manières sont mises en place pour lever l'interdiction d'utilisation d'un mouvement si par exemple ce dernier conduit à une solution de qualité meilleure à celle de la solution trouvée.

De même, plusieurs stratégies peuvent être introduites afin d'améliorer l'efficacité de la méthode tabou, comme les deux concepts complémentaires l'intensification et la diversification. L'organigramme de cet algorithme est représenté sur la figure suivante :

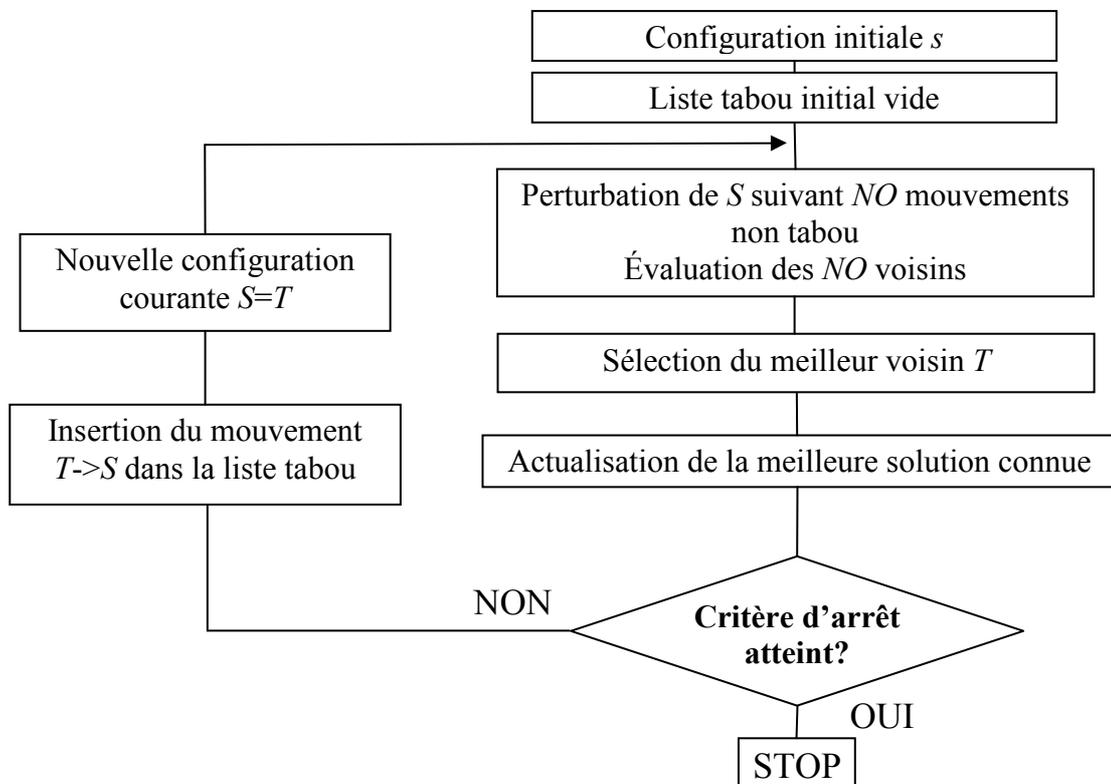


Figure 2.1 : L'organigramme de la recherche tabou [Dréo 03].

2.3.4.2 Les métaheuristiques à population de solutions

2.3.4.2.1 Les colonies de fourmis

Les algorithmes de colonies de fourmis forment une classe de métaheuristiques proposées pour les problèmes d'optimisation difficile. L'idée de base de ces algorithmes est d'imiter des comportements collectifs de fourmis réelles pour la résolution des problèmes d'optimisation. Une colonie peut être considérée comme un système multi agents dont chaque agent correspond à une fourmi réelle capable de communiquer avec les autres agents via une substance volatile chimique appelée « phéromone », elles perçoivent cette matière à laquelle elles sont très sensibles grâce à des récepteurs situés dans leurs antennes.

Grâce à ce moyen de communication, les fourmis arrivent à résoudre collectivement des problèmes trop complexes, notamment les problèmes de choix du plus court chemin entre une source de nourriture et leur nid.

Au début, les fourmis explorent différents chemins en effectuant des déplacements aléatoires. En se déplaçant du nid à la source de nourriture et vice-versa, toutes les fourmis déposent leurs phéromones sur leur trajectoire. À cet effet, le chemin le plus court finira par avoir la densité de phéromones la plus élevée ce qui permet d'augmenter le nombre de fourmis qui suivent cette trajectoire. En plus, puisque, la phéromone s'évapore au fil du temps, le chemin le plus long est de moins en moins emprunté et sa trace finit par disparaître presque complètement.

L'algorithme original des colonies de fourmis (Ant system (AS)) qui a été proposé par Dorigo [Dorigo 92] a été principalement implanté pour le problème du voyageur de commerce, et depuis cette application, il a considérablement évolué pour résoudre d'autres problèmes d'optimisation. Ce problème consiste à trouver le trajet le plus court reliant n villes données, chaque ville ne devant être visitée qu'une seule fois.

Pour résoudre ce problème, à chaque itération, chaque fourmi k ($k = 1$ à m (nombre de fourmis)) est positionnée sur une ville et parcourt le graphe pour construire un trajet complet qui relie toutes les villes, en se déplaçant d'une ville i à une autre ville j appartenant à son voisinage N_i^k à l'aide de la règle de transition qui dépend de l'inverse de la distance entre les deux villes appelée la visibilité $\eta_{ij}(t)$ et l'intensité de la trace $\tau_{ij}(t)$ qui représente la quantité de la phéromone déposée sur l'arrête (i, j) . Cette règle est comme suit [Dorigo 00] :

$$p_{ij}^k(t) = \frac{(\tau_{ij}(t))^\alpha \cdot (\eta_{ij}(t))^\beta}{\sum_{i \in J_i^k} (\tau_{ij}(t))^\alpha \cdot (\eta_{ij}(t))^\beta} \quad \text{Si } j \in N_i^k \quad (2.1)$$

Où α et β sont des paramètres contrôlant respectivement l'importance de la trace de phéromone et à la visibilité.

Une fois la tournée complètement construite, chaque fourmi laisse une trace $\Delta\tau_{ij}(t)$ de phéromone sur les arêtes de son parcours $Tournée_k(t)$ qui dépend de la longueur du chemin trouvé $L_k(t)$, ce qui est modélisé par la relation suivante [Dorigo 00] :

$$\Delta\tau_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{1}{L^k(t)} & \text{si } (i, j) \in Tournée^k(t) \\ 0 & \text{si } (i, j) \notin Tournée^k(t) \end{cases} \quad (2.2)$$

Pour éviter les pièges des solutions locales et encourager la diversification, une décrémentation de la quantité de phéromone qui simule le processus d'évaporation est effectuée comme suit [Dorigo 00] :

$$\tau_{ij}(t+1) = (1 - \rho) \cdot \tau_{ij}(t) + \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{ij}^k(t) \quad (2.3)$$

Où ρ est le taux d'évaporation compris entre 0 et 1.

Le pseudo code de l'algorithme peut être résumé comme suit :

Initialisation de la quantité de phéromones

Tant que (critère d'arrêt est non atteint)

Pour chaque fourmi $k = 1$ à m

Positionner la fourmi à une ville au hasard i ;

S_1 : l'ensemble de villes.

Répéter

Choisir une ville j , dans la liste des villes restantes, selon la formule (2.1)

$i=j$

$S_1 = S_1 - \{j\}$

until $S_1=0$.

Déposer une piste sur le trajet de la fourmi k conformément à l'équation (2.2)

Fin Pour

Évaporer les pistes selon la formule (2.3)

Fin Tant que

2.3.4.2.2 Les algorithmes génétiques

La génétique est une branche de la biologie qui étudie la transmission des caractères héréditaires chez les êtres vivants. Les algorithmes génétiques sont des méthodes itératives de recherche probabiliste qui s'inspirent de cette science et plus précisément de l'évolution naturelle des espèces en exploitant la simulation des mécanismes de variation et de sélection effectués dans les processus évolutifs naturels pour résoudre des problèmes.

La première description du processus des algorithmes génétiques qui sont le type d'algorithme le plus connu et le plus utilisé des algorithmes évolutionnaires a été donnée par Holland en 1975 [Holland 75], puis approfondie par Goldberg [Goldberg 89]. Dans cet algorithme, l'analogie entre la théorie de l'évolution consiste à considérer les solutions appartenant à l'espace de recherche du problème à optimiser comme des chromosomes et des individus soumis à l'évolution. L'ensemble des individus traités simultanément par l'algorithme génétique constitue une population, ceux-ci sont manipulés par un ensemble d'opérateurs pour engendrer la nouvelle population de la génération suivante. Le processus itère et passe d'une génération à l'autre jusqu'à ce qu'un critère d'arrêt soit satisfait.

Le principe d'un algorithme génétique est simple. On part d'une population de solutions du problème représentées par des individus. Cette population choisie aléatoirement constitue la population initiale. Chaque individu x de la population qui est codé sous forme d'une représentation génétique du problème, possède une fonction coût $f(x)$ utilisée pour exprimer son degré d'adaptation à l'environnement ou à l'objectif visé, on dit qu'un individu est d'autant mieux adapté à son environnement ou plus performant que le coût de la solution qu'il représente est plus faible.

Les algorithmes génétiques génèrent de nouveaux individus pour faire évoluer progressivement la population par générations successives, de telle sorte que ces individus soient plus performants que leurs prédécesseurs et en maintenant la taille de la population constante. Pour former la nouvelle génération à partir de la population courante, ils interviennent un certain nombre d'opérations, un opérateur de sélection proportionnelle (la chance de sélection d'un individu est

proportionnelle à sa fitness), les opérateurs de variation ou de reproduction classés en deux catégories la mutation et le croisement, les opérateurs de mutation, qui modifient un ou plusieurs individus pour former d'autres, les opérateurs de croisement, qui engendrent un ou plusieurs enfants à partir de la combinaison de deux parents, à l'inverse de la mutation appliquée avec un faible taux, le croisement est considéré comme l'opérateur de recherche essentiel afin de garder une certaine diversité dans la population, l'évaluation des individus, et un remplacement générationnel c'est-à-dire que la population des enfants remplace complètement celle des parents. L'itération du processus permet de produire une population plus riche en individus mieux adaptés.

Le schéma d'un algorithme génétique est présenté dans la figure 2.4.

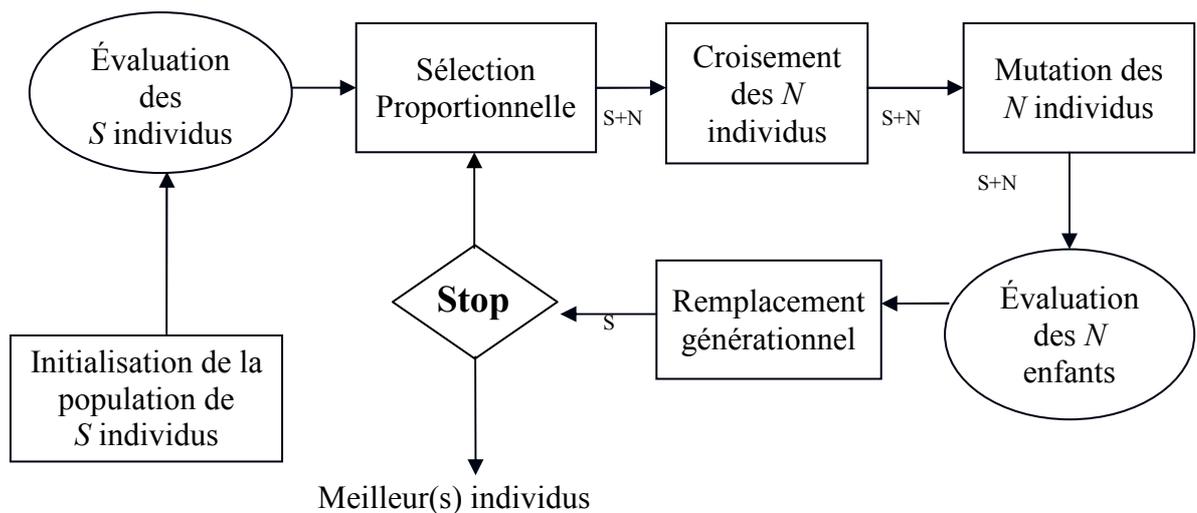


Figure 2.2 : Schéma d'un algorithme génétique [Dréo 03].

2.3.4.2.3 Les essais particuliers (Particle Swarm Optimization : PSO)

L'optimisation par essaims particuliers (OEP) est une métaheuristique d'optimisation, inventée par Russel Eberhart (ingénieur en électricité) et James Kennedy (socio-psychologue) en 1995 [Eberhart 95]. Cette métaheuristique s'appuie notamment sur les observations effectuées lors de simulations informatiques des comportements sociaux des animaux devant atteindre un objectif donné dans un espace de recherche commun et évoluant en essaim tels que le déplacement collectif d'un banc de poissons ou d'un groupe d'oiseaux, par Reynolds [Reynolds 87] et Heppner et Grenander [Heppner 90].

Ils ont observé que malgré le fait que chaque individu a une intelligence limitée, le groupe possède une organisation globale, des dynamiques de déplacement relativement complexes et peuvent produire des solutions à des problèmes non triviaux grâce à la collaboration des individus entre eux. Ceci, sans avoir de chef d'orchestre et sans qu'aucun agent n'ait une connaissance globale sur le système, mais seulement des connaissances locales auxquelles il peut accéder sur le déplacement de ses plus proches voisins, afin de pouvoir prendre des décisions de son propre déplacement. L'intelligence globale de l'essaim résulte, donc, des interactions entre ses différentes particules.

Selon Tfaili [Tfaili 08] ce type de stratégies collectives qui caractérise un système où le travail collectif des entités (non complexes) interagissant entre elles fait "émerger" un comportement

complexe global, a donné lieu à d'autres métaheuristiques comme les colonies de fourmis et possède plusieurs avantages liés à leur utilisation :

- ✓ la production d'une performance collective supérieure à celle des individus;
- ✓ une plus grande adaptation et flexibilité aux environnements réels (en général dynamiques);
- ✓ la fiabilité du système dans son ensemble (la perte d'un agent ne met pas en cause le processus général) ;
- ✓ le faible coût des "unités".

a. Le principe de fonctionnement

L'OEP présente quelques similarités avec les algorithmes génétiques car elle fonctionne avec une population de solutions afin de trouver la meilleure solution possible dans un espace de recherche pour un problème d'optimisation. Mais, contrairement aux algorithmes génétiques où les solutions les moins performantes sont éliminées, l'OEP ne possède pas d'opérateur d'évolution. En outre, une population de solutions interagissant entre eux afin de faire évoluer chacun est utilisée dans la recherche sans éliminer aucun individu.

L'OEP repose sur un ensemble de solutions. Chaque solution est appelée particule et le groupe devient un essaim. Chaque particule est modélisée par sa position dans l'espace de recherche et par sa vitesse de déplacement et dotée d'une mémoire pour conserver sa meilleure position visitée.

L'OEP est un algorithme itératif qui commence par une répartition au hasard de l'essaim dans l'espace de recherche, chaque particule ayant également une vitesse aléatoire. Ensuite, à chaque itération de l'algorithme chaque particule ajuste sa position et vitesse pour le prochain déplacement en utilisant son expérience et les connaissances que ses voisines possèdent du milieu, donc à chaque pas du temps elle est capable de :

- ✓ évaluer la qualité de sa position et de garder en mémoire sa meilleure performance (sa meilleure position atteinte et sa qualité);
- ✓ obtenir la meilleure performance trouvée par tout le groupe auquel elle appartient.

b. L'algorithme de base

L'idée de base de cet algorithme est qu'un groupe d'individus dont chacun est peu intelligent puisse avoir une organisation globale complexe permettant aux particules de converger vers un minimum local grâce à des règles de déplacement simples, malgré qu'aucun de ces oiseaux ne connaît où se trouve exactement la nourriture. D'après Cooren [Cooren 08], des règles simples, telles que : aller à la même vitesse que les autres, se déplacer dans la même direction ou encore rester proche de ses voisins sont des exemples de comportements qui suffisent à maintenir la cohésion de l'essaim, et qui permettent la mise en oeuvre de comportements collectifs complexes et adaptatifs. En plus, la performance du système entier est supérieure à la somme des performances de ses parties.

Selon Clerc et Siarry [Clerc 04] ce modèle présente quelques propriétés intéressantes, qui en font un bon outil pour de nombreux problèmes d'optimisation :

- ✓ Il est facile à programmer, quelques lignes de code suffisent dans n'importe quel langage évolué.
- ✓ Il est robuste (de mauvais choix de paramètres dégradent les performances, mais n'empêchent pas d'obtenir une solution).

Contrairement aux autres algorithmes d'origines discrets. Le premier algorithme de cette métaheuristique a été conçu pour fonctionner pour des espaces en variables continues. À chaque itération de l'algorithme, chaque particule possède une valeur de fitness (distance par rapport à la solution) qui peut être évaluée afin de mettre à jour les meilleures positions connues et se déplace dans l'espace de recherche selon sa vélocité qui représente la vitesse utilisée pour guider le mouvement de la particule et sa position dans l'espace de recherche. La structure de base de ce déplacement est illustrée par le schéma de la figure 2.3.

Chaque itération fait bouger chaque particule, en fonction de sa vitesse actuelle; sa meilleure solution P_i ; la meilleure solution obtenue dans son voisinage P_g . En effet, en plus de la vitesse actuelle de la particule, le déplacement de la particule est influencé par deux autres forces best local et global. La première l'attire à la position qui a donné la meilleure fitness pour la particule et l'autre c'est la meilleure position trouvée par la particule et ses voisins. A chaque instant t , la vélocité $V_i(t)$ et la position $X_i(t)$ sont mises à jour comme suit :

$$V_i(t) = V_i(t - 1) + C_1 r_1 (P_i + X_i(t - 1)) + C_2 r_2 (P_g + X_i(t - 1)) \quad (2.4)$$

$$X_i(t) = X_i(t - 1) + V_i(t) \quad (2.5)$$

Le coefficient cognitif C_1 et le coefficient social C_2 qui représentent les coefficients de confiance sont des constantes qui pondèrent respectivement les tendances de la particule à vouloir aller vers sa meilleure position connue, ou suivre la meilleure position de ses voisins. Ces constantes qui sont des paramètres de la méthode sont à définir d'une façon empirique. Cependant, les coefficients d'accélération r_1 et r_2 sont deux nombres aléatoires compris entre 0 et 1 suivant une distribution uniforme.

Le pseudo algorithme de OEP est le suivant :

n : nombre d'individus

Initialiser la population

Initialiser les paramètres

Tant que (critère d'arrêt est non atteint)

Pour $i = 1$ à n (pour chaque particule)

Évaluer fonction objectif

Si $f(x_i) > f(P_i)$ alors : (mise à jour du best local)

$$P_i = x_i$$

Finsi

Si $f(x_i) > f(P_g)$ alors : (mise à jour du best global)

$$P_g = x_i$$

Finsi

Fin pour

Pour $i = 1$ à n

 On met à jour la particule à l'aide des formules (2.4) et (2.5)

Fin pour

Fin tant que.

Malgré que cette méthode est récente par rapport à plusieurs métaheuristiques, elle a connu beaucoup d'intérêt par la communauté d'optimisation à cause de son application avec succès dans

différentes applications, sa simplicité et sa facilité d'hybridation avec d'autres métaheuristiques..., ce qui a conduit à développer plusieurs variantes de son algorithme de base pour améliorer sa convergence (l'introduction d'un facteur d'inertie [Shi 98], [Kennedy 01], [Shi 99] d'une vitesse maximale V_{max} [Eberhart 1996], d'un facteur de construction [Clerc 02]...) en plus de différentes hybridations avec d'autres approches. Un exemple d'un état de l'art complet sur cette méthode est celui développé en deux parties par Banks et al. [Banks 07], [Banks 08].

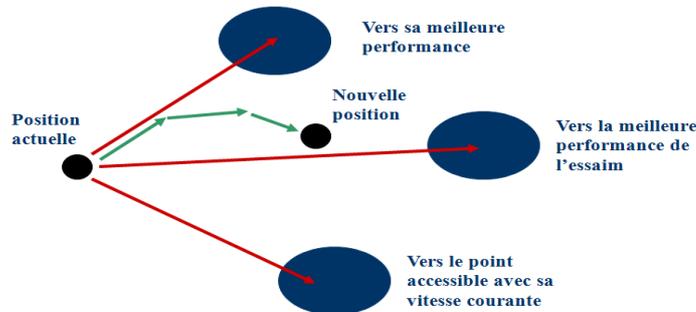


Figure 2.3 : Schéma de principe du déplacement d'une particule [Cooren 08]

Malgré l'obstacle majeur de ses applications pour résoudre avec succès les problèmes combinatoires, à cause de sa nature continue, plusieurs auteurs l'ont récemment adapté aux problèmes discrets, tels que le problème du voyageur de commerce [Shi 06], des tournées de véhicules [MirHassani 11], des problèmes d'ordonnancement [Lei 08], [Zhang 09]... Ceci peut être dû à ses avantages, qui incluent, selon Pan et al. [Pan 08a], sa structure simple, immédiatement accessible pour des applications pratiques, sa facilité d'implémentation, sa rapidité d'acquérir des solutions et sa robustesse. Cependant, en raison des caractéristiques des problèmes discrets, les algorithmes adaptés à ces problèmes se différencient par la structure de l'essaim ainsi que par le comportement de ces algorithmes, c-à-d par la manière d'associer une solution combinatoire à une particule en plus des modèles de déplacement ou de vitesse adoptés.

Anghinolfi et Paolucci [Anghinolfi 09] ont distingué diverses approches combinatoires à base des essais particuliers. Ils pensent qu'il existe trois manières pour représenter une solution discrète, à savoir la représentation binaire, par valeurs réelles et la représentation à base de permutation. En plus, trois types de modèles de vitesse ont été proposés, qui sont les modèles à valeurs réelles, les modèles stochastiques et les modèles à base de liste de déplacements. Parmi les modèles discrets à variables binaires, on peut citer celui proposé par Kennedy et Eberhart [Kennedy 97], qui représente la première version discrète de l'OEP, avec des variables binaires à n dimensions. Dans leur travail, la vitesse décrite par une modélisation stochastique, représente la probabilité pour chaque composante de la solution de prendre la valeur 1. La représentation binaire est aussi introduite dans de nombreux travaux d'ordonnancement comme celui proposé par Liao et al. [Liao 07]... D'autres investigations d'ordonnancement ont été basées sur la représentation et le modèle de vitesse par valeurs réelles, comme celles effectuées sur le Job Shop [Sha 06], le Flow Shop [Liu 05], [Tasgetiren 07], l'Open Shop [Sha 08]... En outre, les solutions à bases de représentations par permutations sont largement implantées pour la résolution des problèmes d'ordonnancement, dans les machines parallèles [Kashan 09], le Flow Shop [Lian 08], le Job Shop [Zhang 09]...

Un des algorithmes récemment utilisés pour résoudre les problèmes combinatoires est celui proposé par Pan et al. [Pan 05], [Pan 08a], pour résoudre efficacement le problème d'ordonnement dans un Flow Shop. Cet algorithme utilise les opérateurs génétiques de mutation et de croisement souvent utilisés pour les problèmes discrets. Dans ce modèle, la vélocité qui représente un simple opérateur de mutation, est intégrée directement pour mettre à jour la position de la particule. Il présente l'avantage d'être simple, combiné facilement avec d'autres métaheuristiques pour donner naissance à d'autres solutions d'ordonnement comme son hybridation avec le recuit simulé et la recherche locale, proposée dans [Pan 08b]. En outre, chaque solution est représentée par permutation, ce qui semble bien adapté à notre problème de sélection de routages de pièces. Pour ces raisons, nous avons opté pour cet algorithme dont l'adaptation sera détaillée dans le chapitre suivant.

2.4.Conclusion

Ce chapitre a décrit des généralités sur les métaheuristiques et a montré leurs multiples facettes proposées depuis plusieurs années pour la résolution approchée des problèmes d'optimisation difficile. Le succès de la démarche ne doit pas masquer les difficultés auxquelles est confronté l'utilisateur, en présence d'un problème d'optimisation concret tels que le choix d'une méthode efficace, capable de produire une solution de qualité acceptable en un temps de calcul raisonnable et le réglage optimal des divers paramètres d'une métaheuristique qui font généralement appel au savoir faire et à l'expérience de l'utilisateur, plutôt qu'à l'application fidèle de règles bien établies en raison de l'inexistence des théorèmes de convergence applicables pour les différents types de problèmes.

L'OEP est une métaheuristique qui s'est fait récemment connaître dans le domaine de l'optimisation. La méthode était conçue initialement pour l'optimisation continue, mais elle a été appliquée avec succès pour la résolution de nombreux problèmes combinatoires ou mixtes.

Le chapitre suivant est consacré à l'adaptation de cette métaheuristique pour la résolution du problème de routages de pièces dans un système flexible de production (FMS) avec flexibilité de routage où le temps opératoire est supposé déterministe, en présentant son étude de sensibilité afin de définir son meilleur paramétrage, et à son interaction avec les autres décisions d'ordonnement basées sur les règles de priorité...

Chapitre 3

Un algorithme à base des essaims particulaires pour les décisions de routages de pièces

3.1.Introduction

Actuellement, les compromis entre les coûts, les délais, la qualité de production, le grand choix d'options et le besoin de flexibilité en termes de produits peuvent être instaurés au niveau des systèmes flexibles de production qui fournissent des avantages divers comme l'augmentation de l'utilisation des ressources, l'augmentation de la productivité, la réduction des en-cours...

Pour justifier leur investissement relativement élevé, il est très important de faire pleinement usage des flexibilités offertes par ces systèmes. La flexibilité de routage est l'une de ces flexibilités. Ce type de flexibilité qui peut être trouvé, dans chaque système qui comprend des machines identiques, alternatives ou redondantes offre plusieurs avantages en balançant mieux les charges de machines, en permettant au système de continuer à fonctionner, et de maintenir ses performances élevées malgré l'occurrence de certains événements inattendus tels que les pannes de machines...

En raison de son importance, de nombreux travaux se sont intéressés aux problèmes d'ordonnancement dans les FMS avec flexibilité de routage. Mais, selon Saygin et al. [Saygin 01] la majorité d'entre eux se concentrent sur le problème de sélection de routages des pièces avant le début de la production.

Cependant, les FMS peuvent changer rapidement de produits et de séquences de produits sans perdre leur productivité, à condition qu'il soit possible d'obtenir le bon produit, palette, support, ou outil, à la bonne place au bon moment. C'est pour cette raison que l'ordonnancement prévisionnel limite les capacités de ces systèmes et ne permet pas de répondre aux attentes de leurs responsables. L'une des conditions nécessaires pour tirer pleinement partie de la flexibilité offerte par ces systèmes est de proposer un système de gestion souple, capable de les piloter en temps réel, permettant de prendre dynamiquement et à très court terme les décisions d'allocation et d'ordonnancement des opérations et des plans de processus, en fonction de l'état du système de production, des objectifs de production...

En effet, la plupart des problèmes d'ordonnancement sont classés NP-difficiles [Rinnooy Kan 1976]. De plus, les problèmes liés à la technologie des FMS sont relativement complexes comparés aux systèmes de production traditionnels. Donc les méthodes exactes sont inutiles dans ces problèmes, et il s'avère nécessaire d'utiliser des méthodes heuristiques pour les résoudre en un temps raisonnable.

Les métaheuristiques sont une famille d'algorithmes de types stochastiques destinés à résoudre des problèmes d'optimisation difficile. Malgré que ces méthodes ne fournissent aucune garantie d'optimalité, elles permettent de trouver une ou plusieurs solutions proches de l'optimum pour plusieurs types de ces problèmes.

Devant le succès rencontré par ces techniques dans le cadre de la résolution des autres problèmes NP-difficiles et sachant que les problèmes de production sont complexes, tout au long de ce chapitre, nous nous intéressons à l'adaptation de l'une de ces techniques, à savoir les essais particuliers, pour résoudre le problème de sélection de routages alternatifs en temps réel des pièces dans un FMS qui se compose de sept machines, une station de chargement, une station de déchargement, et six types des pièces différentes. En raison de l'existence des centres d'usinage identiques dans ce système, les types de pièces ont des routages alternatifs.

Une autre approche permettant de gérer en temps réel la flexibilité des ateliers, est celle basée sur la gestion des files d'attente par règles de priorité. Ces règles sont des approches directes non optimales, permettant de déterminer l'ordre de traitement ou de passage aux ressources des opérations (ou pièces) en attente dans une file. Un deuxième objectif de ce chapitre est l'investigation de l'interaction de décisions de routages alternatifs basées sur les essais particuliers, avec celles de séquençement de machines et de lancement de pièces au niveau de la station de chargement. Ces décisions sont basées sur différentes règles de priorité à portée locale (Shortest Processing Time (SPT), Longest Processing Time (LPT)), FIFO (First In First Out (FIFO)) et de règles à portée globale (Shortest Total Operation Time (STOT), Longest Total Operation Time (LTOT)).

Le reste de ce chapitre s'articule autour de six sections. Dans la première, nous présentons les caractéristiques du contexte du travail présenté. Dans la deuxième, nous proposons dans un premier temps de nouvelles formulations mathématiques sous forme de programmes linéaires en nombres entiers pour la modélisation du problème, et dans un second temps une résolution du problème de routages des pièces en temps réel basée sur un algorithme discret à base des essais particuliers. La troisième section est consacrée à la présentation d'une framework software conçue pour analyser les performances de plusieurs métaheuristiques appliquées pour résoudre le problème de sélection de routages alternatifs dans plusieurs configurations des FMS. La quatrième section est une analyse de sensibilité de l'algorithme proposé à la variation de ses paramètres. Dans la cinquième et la sixième, nous étudions l'interaction de l'algorithme proposé avec les différentes décisions de séquençement de machines et de lancement de pièces basées sur les règles de priorité.

Les résultats présentés dans ce manuscrit jugés par plusieurs indicateurs de performance (le taux de production, le taux d'utilisation des machines et du système de transport, le temps de cycle, les en-cours) sont obtenus après des simulations de 20000 heures et un régime transitoire (warm-up time) de 3000 heures, avec 10 répliques pour chaque cas. Ces tests sont effectués en un Core(TM) 2Duo CPU avec 2.2 GHZ et 1 G de RAM. Les résultats de simulation sont obtenus lorsque le système est saturé, caractérisé par de grandes et rapides variations de plusieurs paramètres et événements. Certains d'entre eux qui affectent les performances du système sont comme suit :

- ✓ La variation et la rapidité de l'arrivée des pièces, ou des demandes.
- ✓ La capacité et la disponibilité des machines.
- ✓ La capacité et la disponibilité du véhicule autoguidé...

Dans notre étude deux scénarios sont pris en compte sans et avec présence de pannes. Il a été supposé que :

- ✓ Une distribution exponentielle est utilisée pour la modélisation des occurrences de pannes avec un MTBF (Mean time between failures) = 100 heures.
- ✓ Pour le temps de maintenance, une distribution exponentielle avec un MTTR (Mean time to repair) = 2 heures est utilisée.
- ✓ Le temps entre deux pannes ne sera considéré que lorsque la ressource est occupée.

3.2.La présentation du modèle FMS étudié

Ce système flexible de production extrait de la littérature [Saygin 01], [Saygin 04] contient sept machines et deux stations : une station de chargement et une de déchargement. Six types de pièces différentes sont traités dans le système.



(a) Une fraiseuse horizontale



(b) Une fraiseuse verticale



(c) Une tour



(d) Un étai limeur

Figure 3.1 : Photographie des machines qui composent 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).
- ✓ Un étai limeur (EL).
- ✓ Une station de chargement (SC).
- ✓ Une station de déchargement (SD).

Ces machines sont présentées dans la figure 3.1. Chacune d'entre elles comporte une file d'attente d'entrée et une file d'attente de sortie avec une capacité de deux pièces, la station de chargement contient aussi une file d'attente d'entrée d'une capacité égale à deux. La station de déchargement a une capacité d'une seule pièce. La configuration du système flexible de production est donnée dans la figure suivante :

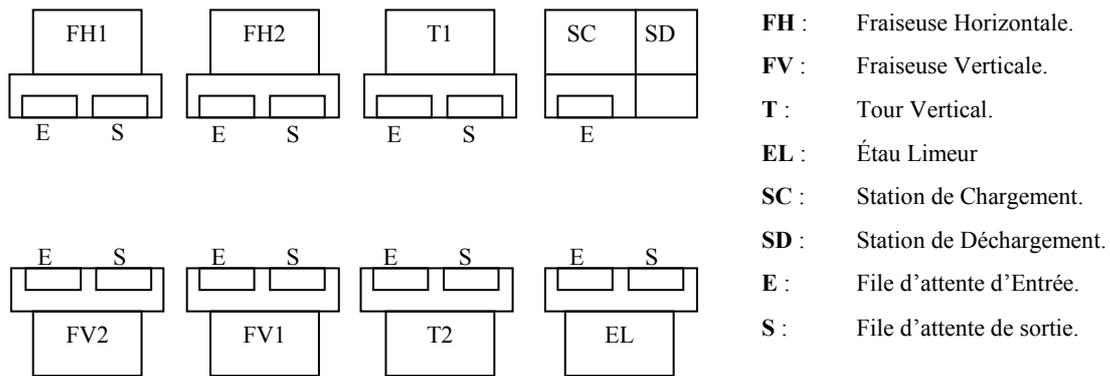


Figure 3.2 : Configuration du modèle FMS étudié [Saygin 01]

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.
- ✓ Aucune annulation des ordres.
- ✓ Les routes de l'AGV dépendent des routages alternatifs sélectionnés en temps réel et de la topologie de l'atelier.
- ✓ Le temps de traitement est déterministe et il comprend le temps de changement des outils, le temps d'exécution de l'opération dans la machine, et le temps de transfert de la pièce de la file d'entrée à la machine ou de la machine à sa station de sortie.
- ✓ Le temps de traitement d'une opération est le même sur les machines alternatives identifiées pour cette opération.
- ✓ Chaque machine ne peut traiter qu'une seule pièce à la fois.

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

Type de pièces et nombre de routages	Taux d'arrivée	Routage et (durées opératoires (min))
A (4)	17 %	SC – T _{1,2} (30) – FV _{1,2} (20) – SD
B (4)	17 %	SC – T _{1,2} (20) – EL (1) – FV _{1,2} (15) – SD
C (4)	17 %	SC – T _{1,2} (40) – FV _{1,2} (25) – SD
D (8)	21 %	SC – T _{1,2} (40) – EL (1) – T _{1,2} (20) – FH _{1,2} (35) – SD
E (8)	20 %	SC – T _{1,2} (25) – EL (1) – T _{1,2} (35) – FH _{1,2} (50) – SD
F (2)	8 %	SC – FH _{1,2} (40) – SD

En raison de l'existence de machines identiques (T₁ et T₂, FH₁ et FH₂, FV₁ et FV₂) dans cet FMS, les pièces peuvent avoir des routages alternatifs. Ces routages et les temps de traitement de chaque type de pièce sont donnés dans le tableau 3.1. Par exemple, une pièce de type A qui a un taux d'arrivée à la file infinie (la file qui contient les pièces qui attendent leur entrée au système) égale à 17%, et traité par deux types de machines (T₁ ou T₂ et FV₁ ou FV₂) peut suivre quatre routages :

SC – T₁ (30) – FV₁ (20) – SD
 SC – T₁ (30) – FV₂ (20) – SD
 SC – T₂ (30) – FV₁ (20) – SD
 SC – T₂ (30) – FV₂ (20) – SD

À cet effet, selon le nombre de machines alternatives existantes dans les séquences du traitement, les pièces de types A, B, C, D, E et F possèdent respectivement 4, 4, 4, 8, 8 et 2 possibilités de routages alternatifs. Ces routages sont numérotés de 1 à 4 pour le type A, de 5 à 8 pour les pièces B, une pièce de type C peut suivre les routages de 9 à 12, les routages de 13 à 20 et de 21 à 28 sont réservés respectivement aux pièces D et E. Puisque, les pièces de types F ne sont traitées que dans les machines FH_1 et FH_2 , elles ne peuvent suivre que deux routages 29 et 30.

Dans le FMS étudié, les pièces arrivent dynamiquement de manière aléatoire selon le taux d'arrivée donné dans le tableau précédent. Ces pièces sont groupées dans la file infinie ou la file des ordres (order queue). S'il y a des places libres dans la station de chargement, ces pièces seront transférées dans cette station à l'aide d'une règle de lancement. Après, ces pièces sont routées vers les machines en utilisant un algorithme basé sur le principe d'optimisation par les essais particuliers (OEP). Les pièces contenues dans chaque file d'entrée d'une machine sont sélectionnées pour le traitement par une règle de séquençement. Donc, les décisions d'ordonnancement incorporées dans le modèle FMS sont prises en terme de comment les pièces (les ordres de fabrication) arrivent au système (part launching decision), comment ces pièces sont routées vers les diverses machines alternatives (les décisions de routage des pièces ou part routing decision), et le séquençement des pièces aux niveaux des files d'entrée des machines (machine sequencing decision).

3.3. Les décisions de routages des pièces

Tout au long de cette thèse, les décisions de routages des pièces sont prises à l'aide d'un algorithme discret à base des essais particuliers. Avant de présenter son adaptation il est nécessaire de présenter le modèle mathématique proposé pour modéliser ces décisions.

3.3.1 Un modèle mathématique pour les décisions de routages des pièces

L'amélioration des performances du système avec flexibilité de routage est le facteur de motivation de ce travail. Particulièrement, les objectifs primaires considérés sont l'amélioration de la productivité, le taux d'utilisation des machines, et du système de transport. Pour ce faire, les pièces doivent circuler rapidement dans le système.

En raison des différentes caractéristiques du système étudié liées aux pièces à produire dans le système telles que : le changement rapide de la demande, l'entrée aléatoire de nouveaux produits à usiner dynamiquement et de façon continue..., ont par conséquent un impact sur la limite de surcharge du système et ses performances. Les principaux objectifs sont donc, étroitement liés aux décisions prises lors de la phase de chargement en fonction de divers objectifs secondaires en tenant compte de ces pièces (les pièces qui arrivent et attendent leur entrée au système). Un de ces objectifs est que les charges de travail affectées à chaque machine doivent être équilibrées pour éviter les goulets d'étranglement, afin de diminuer les inter-blocages dans les systèmes.

Le transfert de la charge de travail des ressources congestionnées à celles qui sont moins encombrées implique certains inconvénients parce que les machines sont dépendantes, et il y'a des relations de précédence entre elles. En effet, l'état de la machine évalué par sa charge de travail à faire ne donne qu'une vision locale sur le système. Donc, il semble plus avantageux de se concentrer sur une portée globale du système évaluée par les quantités de travail à réaliser dans chacun des différents routages.

Une autre motivation de l'utilisation de cet objectif secondaire est liée aux particularités des métaheuristiques, qui sont généralement des algorithmes de type itératif, tentant d'améliorer une ou plusieurs solutions (une solution dans le cas des méthodes à solution unique, et plusieurs dans le cas des méthodes à population de solutions) au cours des itérations. Donc, il est très difficile de trouver la solution optimale dès la première itération, ce qui peut justifier l'échec d'adaptation de ces techniques pour la résolution des problèmes complexes nécessitant la prise de décisions en temps réel.

Pour cette raison, et afin de résoudre notre problème qui consiste à trouver le meilleur routage pour chaque pièce entrante au système en ligne, il semble nécessaire de prendre en considération à chaque instant des critères concernant l'état du système qui affectent ses performances et peuvent être mesurés à chaque moment.

Par conséquent, l'objectif est d'équilibrer les quantités de travail existantes au niveau de routages pas en terme de nombre de pièces, mais en terme du temps opératoire. Pour implémenter ce concept, le produit des quantités de travail de routages doit être maximisé (les mathématiciens ont prouvé que plus des valeurs sont proches plus leur produit est grand (la moyenne géométrique)). Donc, le but étant de maximiser cette fonction, afin d'équilibrer les quantités de travail au niveau des routages.

Pour ce faire, nous avons pris en considération les types des premières pièces existantes (le nombre de ces pièces égale à la taille de la station de chargement) dans la file infinie (avant qu'ils passent à la station de chargement), en essayant d'affecter chaque pièce à un routage selon son type. Les routages de ces pièces sont modifiés à chaque itération selon le principe de la métaheuristique utilisée, et pour chaque routage nous avons calculé sa quantité de travail en vue de maximiser le produit de l'ensemble des routages.

De cette façon, le travail peut être distribué sur différents routages. Donc, le but est de trouver la meilleure séquence de pièces qui correspond au maximum de produit des travaux des routages. Dans ce chapitre, nous nous intéressons uniquement aux pièces existantes dans la file infinie car les autres pièces (qui sont à l'intérieur du système) doivent suivre leurs routages déterminés précédemment. Concernant la métaheuristique utilisée une solution est constituée par les routages des premières pièces contenues dans la file infinie.

Dans ce champ d'application, un modèle mathématique a été développé dans le but de la réduction de la congestion dans le système; et d'éviter les inter-blocages causés par les mauvaises séquences. La formulation du modèle mathématique utilisé dans ce système est comme suit :

C_i : la quantité du travail du routage est calculée comme suit :

$$C_i = \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^M X_{ij} Y_{ik} P_{jk} \quad (3.1)$$

La fonction objectif est la maximisation du produit des quantités de travaux dans les routages.

$$\text{Max} \prod_{i=1}^Q C_i \quad (3.2)$$

Contraintes :

$$\sum_{i=1}^Q X_{ij} = 1 \quad \text{Pour chaque pièce } j=1, \dots, N \quad (3.3)$$

L'équation (3.3) permet de garantir qu'il y'a un seul routage pour chaque pièce.

N : le nombre de pièces (les premières pièces qui sont dans la file des ordres et les pièces contenues à l'intérieur du système).

Q : le nombre des routages (dans notre problème $Q=30$).

M : le nombre des machines ($M=7$).

$X_{ij}=1$, si la pièce j est sur le routage i (elle est dans une machine de ce routage ou elle sera transférée à une machine qui le compose), sinon $X_{ij}=0$.

$Y_{ik}=1$, si le routage i contient la machine k , sinon $Y_{ik}=0$.

P_{jk} : le temps restant de la pièce j dans la machine k , (ce temps est compté lorsque la pièce est dans la machine k ou elle sera transférée à cette machine (elle est dans la station de chargement si k est la première machine de son routage, ou elle est dans la file de sortie de la machine précédente dans le routage pour les autres machines)), sinon $P_{jk}=0$.

Il est clair que la fonction objectif peut avoir une valeur nulle. Cette situation peut être rencontrée lorsqu'il existe un routage qui n'a aucune quantité du travail, c'est-à-dire que toutes les machines qui le composent sont libres ce qui est très peu arrivé dans notre champ d'étude (lorsque le système est saturé). Dans ce cas, la pièce sera affectée au routage dont la quantité de travail est minimale.

Cette proposition a été implémentée dans le but de la réduction de la congestion dans le système; L'objectif de la prise en compte d'une séquence de pièces est de garantir que ces pièces suivent des routages différents, ce qui permet de minimiser les impasses dans le système et d'éviter les inter-blocages causés par les mauvaises séquences.

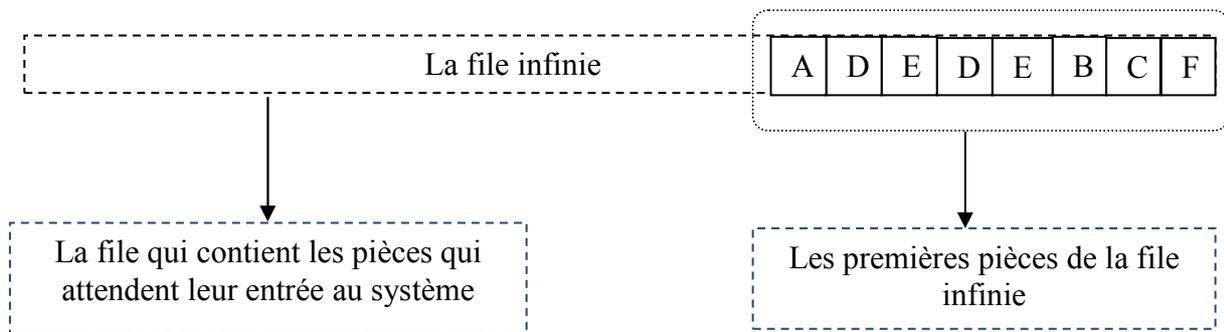


Figure 3.3 : Un exemple de 8 premières pièces contenues dans la file infinie

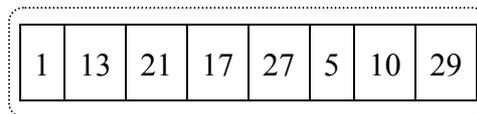


Figure 3.4 : Un exemple d'une solution

Pour optimiser la fonction objectif, si le processus sélectionne juste un routage pour la première pièce, il y'aura entre 2 et 8 possibilités, donc il n'est pas recommandé d'utiliser les métaheuristiques mais on ne peut pas éviter les inconvénients concernant les impasses, la congestion..., car les routages sont dépendants en raison de la présence de machines communes entre les routages; en plus, les séquences de pièces sont imprévisibles, et on peut avoir des cas où les pièces qui suivent des routages différents partagent les mêmes machines. Donc la prise en

compte d'une séquence de pièces est nécessaire afin de pouvoir garantir un bon équilibre. Les figures 3.3 et 3.4 présentent des exemples d'une séquence de 8 pièces et un exemple de la solution correspondante (les routages sélectionnés pour ces pièces).

3.3.2 La description de l'algorithme OEP discret

À l'origine, le premier algorithme OEP a été conçu pour résoudre les problèmes d'optimisation continus, mais il peut être adapté aux problèmes discrets comme notre problème de sélection de routage, et pour ce faire, nous avons proposé un OEP discret qui suit la procédure générale de l'OEP décrite précédemment. Il s'avère évidemment nécessaire d'effectuer une conversion de l'algorithme original conçu pour le domaine continu vers le domaine discret pour la résolution du problème de routage des pièces. Notre conversion consiste à créer une structure de particules relative à notre problème, puis à proposer une démarche pour les mettre à jour à chaque itération de l'algorithme. Les diverses caractéristiques de cet algorithme sont comme suit :

- ✓ La structure de la particule : la représentation par permutation avec répétition est utilisée pour codifier la structure de la particule ou la solution, ce qui permet de décrire les routages sélectionnés pour les premières pièces de la file infinie (voir la figure 3.4). Puisqu'il peut être rencontré que plusieurs pièces dans la séquence peuvent avoir le même type (par exemple il y'a deux pièces D et deux pièces E dans la séquence montrée dans la figure 3.3) et par conséquent elles peuvent avoir le même routage, donc un élément de la solution (un routage) peut apparaître plus d'une fois.
- ✓ La génération de la population initiale : la population initiale dont la taille doit être fixée au début, est obtenue d'une façon aléatoire, c'est-à-dire pour chaque particule les routages des pièces sont initialisés aléatoirement en respectant les contraintes présentées dans le tableau 3.1.
- ✓ La fonction objectif : à chaque itération de l'algorithme, les particules sont évaluées en terme de produit de quantités des travaux des routages défini dans la section précédente.
- ✓ Le critère d'arrêt : la mise en œuvre d'un temps fini d'exécution de l'algorithme implique l'utilisation de ce critère, qui peut être dépendant ou indépendant de la fonction objectif... Notre algorithme itère jusqu'à ce que le nombre des itérations atteigne une valeur maximale fixe.
- ✓ La mise à jour de la particule : en raison de l'aspect discret du problème, les opérateurs de mutation et de croisement sont utilisés pour mettre à jour chaque particule présentée sous forme d'un vecteur en nombres entiers. Cette mise à jour s'effectue en transformant ce vecteur selon l'équation suivante proposée par Pan et al. [Pan 05], [Pan 08a], et appliquée pour résoudre les problèmes d'ordonnement dans un Flow Shop :

$$X_i(t) = C_2 \oplus F_3(C_1 \oplus F_2(w \oplus F_1(X_i(t-1)), P_i(t-1)), G(t-1)) \quad (3.4)$$

Étant donné que $\lambda_i(t)$ et $\delta_i(t)$ sont des individus temporaires, l'équation (3.4) se compose de trois composantes :

La première composante est $\lambda_i(t) = w \oplus F_1(X_i(t-1))$ qui représente la vitesse de la particule. F_1 représente un opérateur qui modifie la particule avec une probabilité w , un nombre aléatoire uniforme r est généré entre 0 et 1. Si r est inférieur à w alors F_1 est appliqué pour produire une permutation perturbée de la particule par $\lambda_i(t) = F_1(X_i(t-1))$, sinon la permutation courante est gardée. De la même manière, la deuxième composante qui est la partie cognitive de la particule $\delta_i(t) = C_1 \oplus F_2(\lambda_i(t), P_i(t-1))$ et la troisième composante qui représente la partie sociale de la

particule $X_i(t) = C_2 \oplus F_3(\delta_i(t), G(t - 1))$ ont été modifiées par F_2 et F_3 , qui représentent les croisements avec les bests local et global selon les probabilités C_1 et C_2 .

En effet, le croisement F_2 dont les parents utilisés sont $\lambda_i(t)$ et $P_i(t - 1)$ peut donner $\delta_i(t) = \lambda_i(t)$ ou $\delta_i(t) = F_2(\lambda_i(t), P_i(t - 1))$, en dépendant de la valeur du nombre aléatoire choisi. En outre, les parents de la partie sociale $\delta_i(t)$ et $G(t - 1)$ génèrent selon la valeur sélectionnée aléatoirement après l'application de F_3 l'enfant $X_i(t) = F_3(\delta_i(t), G(t - 1))$, ou la même configuration $X_i(t) = \delta_i(t)$ est gardée si la valeur aléatoire générée est inférieure à C_2 .

Comme les algorithmes évolutionnaires les opérateurs de mutation et de croisement sont utilisés pour parcourir l'espace de recherche. Généralement, l'opérateur F_1 peut être vu comme un opérateur de mutation, qui consiste à modifier un ou plusieurs routages de certaines pièces choisies parmi les pièces constituant la solution d'une façon aléatoire. Un exemple de la mutation est donné dans la figure 3.5, où le routage 3 a été remplacé par le routage 1.

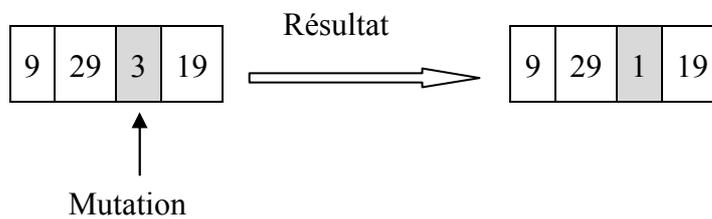


Figure 3.5 : Exemple de mutation d'une solution construite des routages des premières pièces de la file infinie (n=4)

F_2 est un opérateur de croisement qui consiste à combiner deux individus parents, qui sont le résultat de l'opérateur F_1 et le best local de la particule. Cet opérateur peut transformer la solution courante en un autre état, qui va hériter certaines caractéristiques de ses parents, donc les caractéristiques de son état actuel et celles de son best local. Dans ce travail, un croisement à un point est utilisé. Un exemple de cette opération est illustré dans la figure 3.6.

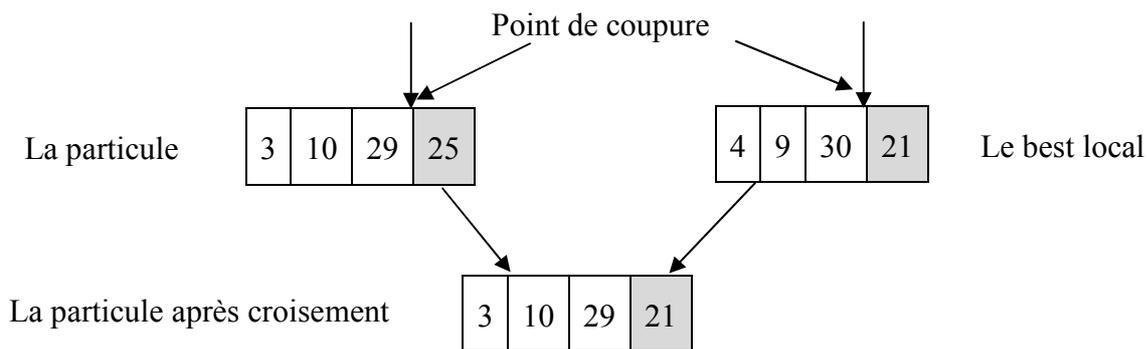


Figure 3.6 : Exemple de croisement de deux solution formées des routages des premières pièces de la file infinie (n=4)

Le croisement F_3 entre le résultat de F_2 et le best global s'effectue en gardant le même principe de F_2 . Contrairement aux algorithmes évolutionnaires qui favorisent le croisement par rapport à la mutation, et les taux de ces opérateurs sont généralement fixés d'une manière restrictive, les opérateurs F_1 , F_2 , et F_3 sont dépendants de variables dont les valeurs sont générées aléatoirement, ce qui permet de rendre le nombre de leur utilisation variable.

Le pseudo code de l'algorithme de cette métaheuristique adapté pour résoudre notre problème est le suivant :

Si il y'a une place libre dans la station de chargement alors

Initialiser la population.

Initialiser les paramètres.

Tant que (critère d'arrêt est non atteint)

Pour chaque particule x_i

Calculer le produit des quantités des travaux des routages de cette particule.

Si $f(x_i) > f(P_i)$ alors : (mise à jour du best local de la particule i (P_i))

$$P_i = x_i$$

Finsi

Si $f(x_i) > f(G)$ alors : (mise à jour du best global (G))

$$G = x_i$$

Finsi

Fin pour

Pour chaque particule x_i

$$X_i(t) = C_2 \oplus F_3(C_1 \oplus F_2(w \oplus F_1(X_i(t-1)), P_i(t-1)), G(t-1))$$

Fin pour

Fin tant que

Finsi.

La configuration de l'OEP proposé nécessite le réglage de divers paramètres qui ont un impact direct sur les performances de l'algorithme tels que la taille de la population, le coefficient d'inertie w , le coefficient cognitif C_1 et le coefficient social C_2 .

3.4. Un système logiciel pour l'évaluation des performances de métaheuristiques

Avec les progrès de la recherche, la conception et le fonctionnement des systèmes flexibles de production qui sont conçus pour produire une variété de types de pièces différentes avec des courts délais, une très grande personnalisation, une bonne qualité..., de nouvelles exigences telles que l'efficacité élevée de modélisation, la validité de modèles, la crédibilité, l'analyse correcte de résultats sont définies.

La simulation est une étape essentielle de la conception et l'implémentation de différentes structures mécaniques. Elle est aussi actuellement un outil efficace pour l'évaluation de différentes configurations, le test de différentes stratégies de contrôle...

Selon Berchet [Berchet 00] le potentiel de la simulation est très vaste, car elle est applicable à tous les flux de l'industrie et même des services, à tous les niveaux hiérarchiques et à toutes les phases du cycle de vie d'un système de production. Bien que de nombreux simulateurs soient disponibles, nous avons préféré pour diverses raisons développer notre propre outil de simulation. Dans cette section, une framework logicielle est présentée pour simuler le comportement des FMS avec flexibilité de routage, qui comprennent plusieurs centres d'usinage flexibles dont chacun a une file d'attente d'entrée et une file de sortie. Il existe aussi dans chaque système une station de

chargement, une station de déchargement, un système de transport et plusieurs types de pièces qui ont des routages alternatifs à cause de la présence de machines identiques.

Cet outil offre toutes les informations nécessaires pour le produit et aide l'utilisateur à mettre à jour la configuration du système et des paramètres. Le modèle proposé permet également d'étudier des familles des pièces multiples, les différents types de stations d'usinage avec et sans présence de pannes, un nombre différent de tampons de stockage... Pour chaque configuration, il est possible d'analyser l'état actuel du système. Les décisions de sélection de routages alternatifs des pièces sont prises en temps réel à base de métaheuristiques. Donc, il est aussi un outil utile pour l'évaluation de performances des métaheuristiques appliquées pour les décisions de routages des pièces en temps réel, et pour sélectionner le meilleur paramétrage de chaque technique.

Dans la framework proposée, la qualité d'ordonnancement est évaluée à travers quelques indicateurs de performances liés à la productivité, l'utilisation du système,... Les programmes sont écrits en Java et incluent une bibliothèque pour simuler des événements stochastiques. Cette bibliothèque contient différents packages qui offrent la possibilité de générer des valeurs aléatoires, d'effectuer les différents calculs liés aux lois de probabilité et les tests d'ajustement...

3.4.1 La philosophie du système

L'outil logiciel développé a pour objectif de simuler le comportement des FMS avec des machines flexibles dont certaines sont identiques, ce qui permet aux différents types de pièces qui sont traitées par ces machines de suivre des routages alternatifs. Les pièces existantes à l'intérieur du système sont soit en cours de traitement au niveau des centres d'usinage ou contenues dans un tampon de stockage, qui peut être une file d'entrée ou de sortie d'une machine, ou de la station de chargement ou de déchargement du système. Les pièces sont transportées à l'aide d'un véhicule autoguide. Les opérations de chaque FMS simulé doivent être basées sur les hypothèses suivantes :

- ✓ Les routages alternatifs de chaque type de pièce sont dépendants de la séquence d'usinage de la pièce qui est connu avant le début de la production.
- ✓ Le déplacement de l'AGV est dépendant des routages des pièces à transporter et de la configuration physique du système.
- ✓ Le temps opératoire qui peut être déterministe ou stochastique comprend le temps de changement des outils, le temps d'installation, le temps de traitement...
- ✓ Chaque machine a une capacité limitée égale à 1, donc elle ne peut traiter qu'une seule pièce à la fois.
- ✓ Dans le cas où le temps opératoire est déterministe, il sera le même sur les machines alternatives identifiées pour cette opération.
- ✓ Pour chaque machine, deux scénarios peuvent être considérés avec et sans présence de pannes qui sont modélisées par des lois de probabilité. Le simulateur offre la possibilité de choisir la loi appropriée, mettre à jour ses paramètres...
- ✓ Les pièces contenues au niveau des tampons de stockage peuvent être ordonnancées pour le traitement par des règles de priorité.
- ✓ Chaque opération est sécable car son exécution doit continuer aussitôt que la machine qui l'exécute est de nouveau disponible après une occurrence d'une panne sans recommencer le traitement.
- ✓ Le niveau de la flexibilité de routage est dépendant du nombre de machines alternatives identifiées pour les opérations...

Ce simulateur est un outil à usage général orienté visuel, conçu pour aider l'utilisateur à la sélection de routages alternatifs en temps réel. En plus d'offrir toutes les informations nécessaires sur le produit et le système, il facilite également la mise à jour de la configuration du système et de

ses paramètres en changeant la taille du tampon de stockage, la distribution de la probabilité des pannes de machines, et du taux d'arrivée des pièces... Ce système modulaire a été développé sur la base des concepts de design suivants :

- ✓ La modularité : il est constitué d'un ensemble de modules différents pour chaque type d'événement ou d'activité dans le système. Ces modules distincts sont reliés entre eux pour fonctionner comme un système complet.
- ✓ Facilité d'utilisation : le simulateur est un package piloté par menu et permet une interaction visuelle.
- ✓ La distribution statistique : modèles de distribution statistique pour certains indicateurs de performances peuvent être intégrés pour l'analyse.
- ✓ La considération des techniques de décision : une large gamme de techniques de décisions sont fournies dans ce package et utilisées pour chaque point de décision.

Grâce à cet outil logiciel, pour chaque configuration et état du système les décisions de routages alternatifs des pièces sont prises en temps réel à base d'un groupe de métaheuristiques, qui comprend en particulier le recuit simulé, la recherche tabou, les algorithmes génétiques, les colonies de fourmis, les essais particulaires ainsi que électromagnétisme métaheuristique, afin de pouvoir trouver des solutions satisfaisantes pour le modèle présenté dans la section précédente.

L'objectif de base du développement de cet outil est l'évaluation des performances de métaheuristiques, l'analyse de leur sensibilité et la sélection du meilleur paramétrage de chaque technique, lorsqu'elle est appliquée pour le routage des pièces. La fonction d'évaluation principale utilisée exprime le taux de production du système. Cette dernière a une grande relation avec les encours qui est un critère très important dans la mesure des performances des systèmes de production. Autres indicateurs de performance sont également nécessaires afin de fournir plus de perspicacité sur les performances du système, tels que l'utilisation des machines et du système de transport...

3.4.2 Le design du système

Ce simulateur est conçu pour simuler une variété de configurations de systèmes. Les principales entités de leurs modèles sont : les types de pièces, les routages et les machines. La capacité de stockage, le temps du traitement, les paramètres des pannes sont considérés comme des attributs des machines.

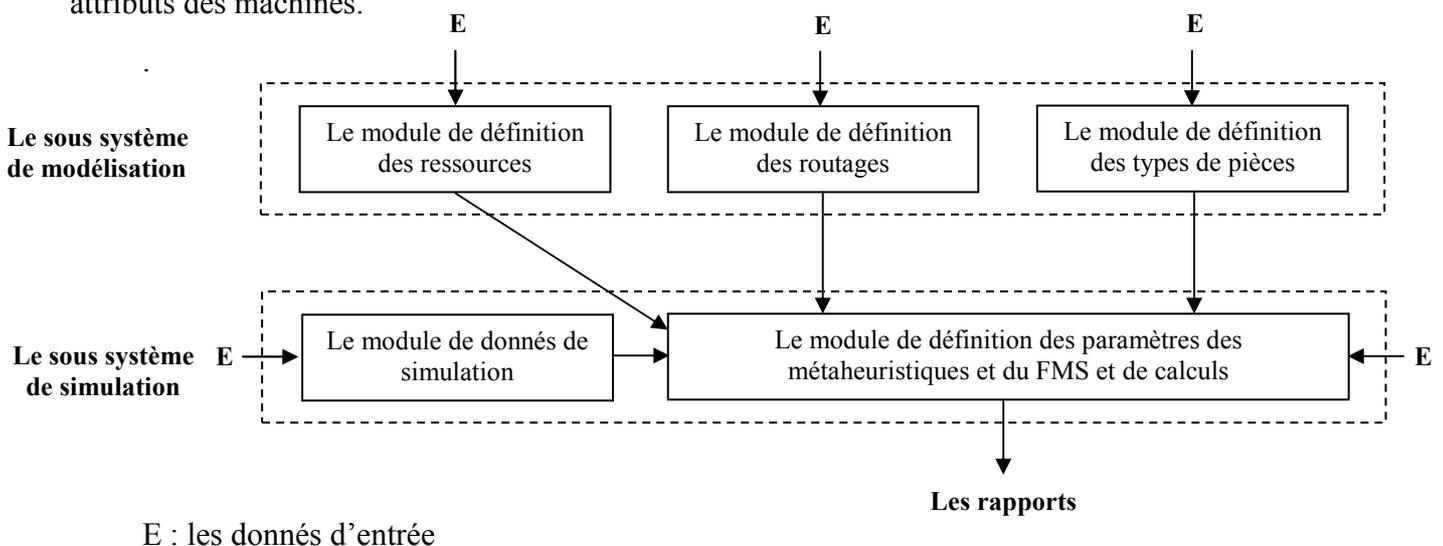


Figure 3.7 : La configuration du système logiciel

Notre système (voir la figure 3.7) est subdivisé en deux sous systèmes nommés : le sous système de modélisation et le sous système de simulation. Cette sous section présente ces sous systèmes et les modules qui les composent.

3.4.2.1 Le sous système de modélisation

Ce sous système est utilisé pour compiler toutes les informations nécessaires à la construction du modèle. Il permet à l'utilisateur d'entrer les diverses données en un mode interactif pour les fournir au sous système de simulation, afin de définir et construire le modèle du système à étudier.

Grâce à ce sous système, l'utilisateur fournit une description complète du FMS à simuler. Cette description inclut les informations nécessaires pour la configuration physique du FMS concernant les machines, les tampons de stockages, les stations de chargement et de déchargement... L'utilisateur peut ajouter aussi les données liées aux types de pièces à produire par le système, leurs routages, les temps opératoires...

Après la description du système par l'utilisateur d'une façon interactive, il peut réorganiser, mettre à jour, supprimer n'importe quel objet du FMS, visualiser toutes ses informations et les sauvegarder pour les prochaines utilisations. Ce sous système comprend trois modules :

- ✓ Le module (ou la frame) de la définition des ressources qui permet à l'utilisateur d'entrer toutes les données concernant les machines, il peut aussi ajouter, supprimer une machine et visualiser toutes ses informations. Pour ce faire, une classe Java nommée `resource_frame` est ajoutée pour mettre à jour l'objet ressource qui sauvegarde toutes les données liées aux ressources.
- ✓ Le module de la définition des types des pièces, qui est utilisé pour identifier les types de pièces, les supprimer, les mettre à jour, décrire comment ces pièces arrivent au système (la loi de distribution de leur arrivée), et visualiser toutes ces informations en utilisant la classe `pièce_frame`.
- ✓ Le module de définition des routages qui offre à l'utilisateur la possibilité d'introduire, mettre à jour et supprimer les routages de chaque type de pièces, en tenant compte de sa composition en terme de machines, leurs séquences, les temps opératoires, ... Comme il a été montré dans la table 3.1, un routage dépend des types de pièces et comprend différentes machines. Donc, si l'utilisateur supprime une machine, ou un type de pièce tous les routages qui ont une relation avec eux doivent être supprimés automatiquement.

Ce sous système permet de réduire le temps de modélisation et d'arrangement du FMS, et assure que toutes les données du modèle sont consistantes avec la configuration physique.

3.4.2.2 Le sous système de simulation

Le sous système de simulation est constitué de deux modules reliés entre eux qui représentent le corps principal du simulateur. Les fonctions principales de ce programme permettent à l'utilisateur de :

- ✓ Entrer toutes les données concernant la simulation (le temps de simulation, le temps d'échauffement...).
- ✓ Mettre à jour les paramètres du FMS (l'intervalle du temps entre deux arrivées de pièces, la taille des tampons de stockage, l'occurrence de pannes...).
- ✓ Sélectionner une métaheuristique pour les décisions de routages de pièces, et mettre à jour ses paramètres.
- ✓ Lancer les simulations, visualiser les résultats, générer les rapports afin de pouvoir évaluer les performances du système et avoir une idée sur l'efficacité de chaque métaheuristique, déterminer la plus efficace pour chaque configuration...

Le module de données de simulation permet d'introduire, mettre à jour et visualiser toutes les données liées au temps de simulation, le temps d'échauffement, le taux d'arrivée de pièces, le nombre de réplifications de chaque test, la taille de files d'attente. Pour ce faire, une classe java dite `simulation_frame` est ajoutée pour mettre à jour l'objet qui sauvegarde les données de simulation.

Grâce au module de paramètres du système et de métaheuristiques et de calculs, l'utilisateur ajuste, met à jour les informations concernant les paramètres du système tels que l'occurrence de pannes (Mean Time between Failures, Mean Time to Repair et leur distribution de probabilité), les métaheuristiques utilisées pour le routage de pièces (choix de la méthode et mettre à jour ses paramètres...). Ce module appelle toutes les données conservées dans les autres objets pour charger la structure du FMS et les paramètres de simulation, lance les simulations et génère automatiquement les résultats à la fin de chaque simulation pour les analyser.

Ce package de simulation est basé sur les événements. Si un événement apparaît pendant ou à la fin de chaque activité, il conduit le début d'une ou plusieurs activités. La plupart des événements suivants peuvent changer l'état d'une ou de plusieurs composantes du système :

- ✓ L'arrivée d'une nouvelle pièce au système.
- ✓ L'entrée d'une pièce à une file d'entrée ou de sortie d'une machine.
- ✓ Une machine a terminé le traitement.
- ✓ La panne d'une machine.
- ✓ La fin de la réparation d'une machine...

Pour chaque évènement, il est possible de diagnostiquer l'état actuel du système par un sous programme de contrôle qui met à jour les données liées aux activités. Selon ces données, les décisions de routages des pièces sont prises automatiquement en temps réel à l'aide de la métaheuristique utilisée.

3.5.L'analyse de sensibilité de l'algorithme OEP proposé

Reconnues depuis quelques décennies pour leur efficacité et leurs applications avec succès dans de nombreux problèmes d'optimisation difficile, les métaheuristiques partagent des défauts qui rebutent encore certains utilisateurs. Il n'existe pas de relation d'ordre quant à l'efficacité ou la convergence d'un algorithme ou d'un autre, cela dépend plutôt du réglage des paramètres des algorithmes.

Le réglage des paramètres est toujours une étape délicate dans l'utilisation d'une métaheuristique car un changement de paramètre pouvant induire un comportement complètement différent du système. Donc, il est important, pour chaque problème posé de trouver le meilleur paramétrage de la métaheuristique utilisée. Cependant, cette tâche se fait généralement de façon plus ou moins empirique qui pourrait être fastidieuse et coûteuse en temps.

L'optimisation par essais particuliers est comme la majorité des métaheuristiques d'une efficacité dépendante du jeu de paramètres. L'objectif de cette section est d'analyser la sensibilité de cette métaheuristique en gardant la configuration de l'atelier fixe et en variant les valeurs de ses paramètres et les données d'entrée du FMS afin de pouvoir comprendre leur impact sur l'optimisation. Plus précisément, notre but est d'avoir une idée sur l'influence de la structure de l'essaim définie par la taille de population et son comportement caractérisé par les différents paramètres qui contrôlent le déplacement de chaque particule sur les performances de notre système.

Cette analyse est jugée par plusieurs indicateurs de performances qui incluent le taux de production, le taux d'utilisation des machines et du système de transport et caractérisent respectivement la productivité et l'utilisation du système. D'autres mesures basées sur le temps de cycle et les en-cours sont aussi investiguées pour donner un aperçu sur l'efficacité de cette métaheuristique.

Cette partie expérimentale comprend deux analyses, la première concerne l'effet de la taille de population, et la deuxième consiste à tester la variation des performances du système en fonction du paramètre d'inertie w qui contrôle l'influence de l'ancienne vitesse sur la vitesse courante, C_1 et C_2 qui contrôlent respectivement le comportement de la particule dans sa recherche autour de sa meilleure position ou celle de l'essaim.

3.5.1 L'effet de la structure de l'essaim (taille de population)

Afin de pouvoir analyser la sensibilité de la métaheuristique étudiée, et d'évaluer ses performances en fonction de la variation de sa taille de population, lorsqu'elle est utilisée pour la sélection de routages alternatifs en temps réel et le système est en état de saturation, nous avons réalisé plusieurs études en simulation avec des variations des niveaux de surcharge du système, en terme du taux d'arrivée des pièces à la file des ordres et de la taille de la population, dont les valeurs choisies sont 2, 4, 8, 16 et 32 et les autres paramètres ont été fixés à 0.5.

Cette section est réservée à la présentation et l'interprétation de certains résultats trouvés, et jugés par plusieurs indicateurs de performance (taux de production, taux d'utilisation des machines T et du système de transport, temps de cycle, en-cours). Les machines T représentent les machines goulots du système. C'est pour cela que nous avons sélectionné leur taux d'utilisation comme un des critères de performance du système.

Afin de pouvoir étudier l'effet des facteurs expérimentaux, nous avons utilisé la méthode d'analyse statistique (Analyse de la variance : ANOVA (ANalysis Of VAriance)), définie dans l'annexe, avec deux facteurs (la taille de la population (1) et l'état du système (2) caractérisé par les différents taux d'arrivée de pièces qui varient de 1/20 à 1/5), tous les tests ont été effectués à un niveau de signification $\alpha=0.05$.

Tableau 3.2 : Les valeurs F concernant les mesures de performances pour les effets taille de population, état du système et leur interaction

Présence de pannes	Les effets	Le taux de production	Le taux d'utilisation des machines T	Le taux d'utilisation du système de transport	Les en-cours	Le temps de cycle	Le point critique
Sans	1	1549,19	1668,13	1669,26	888,14	16,87	2,42
	2	2185963,31	0,87	0,88	0,44	0,39	2,65
	Interaction	104,88	0,88	0,88	0,6	1,11	1,81
Avec	1	782,51	889,36	889,44	931,41	9,67	2,42
	2	1082149,72	0,33	0,33	1,55	0,35	2,65
	Interaction	56,17	1,37	1,37	1,17	1,38	1,81

Le tableau 3.2 présente les différentes valeurs statistiques de F pour le taux de production, le taux d'utilisation des machines T et de l'AGV, les en-cours et le temps de cycle obtenues pour les effets taille de population, état du système et leur interaction.

On peut remarquer que la valeur F statistique est supérieure à son point critique pour l'effet taille de la population, mais elle n'a pas de valeurs significatives pour l'effet état du système et l'interaction entre les deux effets, sauf pour le taux de production car la variation de la durée entre deux arrivées de pièces influent sur le nombre de pièces à usiner. À cet effet, on peut conclure que la variation de la taille de la population a une influence significative sur les performances du système.

Dans cette étude, la méthode least significant difference (LSD) (voir l'annexe) est utilisée pour effectuer les différentes comparaisons multiples, afin de pouvoir déterminer les moyennes qui sont différentes des autres. Pour chaque indicateur de performance, les valeurs qui ne sont pas significativement différentes sont groupées dans le même groupe.

Tableau 3.3 : Les résultats concernant l'effet de taille de population sur le taux de production, le taux d'utilisation des machines T et de l'AGV

Scénario	Sans présence de pannes			Avec présence de pannes		
	Le taux de production	Le taux d'utilisation des machines T	Le taux d'utilisation du système de transport	Le taux de production	Le taux d'utilisation des machines T	Le taux d'utilisation du système de transport
32	59,59 a	95,1 a	32,99 a	57,66 a	91,99 a	31,91 a
16	59,57 a	95,08 a	32,98 a	57,67 a	92,03 a	31,93 a
8	59,36 b	94,73 b	32,86 b	57,51 b	91,78 b	31,84 b
4	58,94 c	94,07 c	32,63 c	57,13 c	91,18 c	31,63 c
2	57,43 d	91,65 d	31,79 d	55,57 d	88,7 d	30,77 d

Les résultats concernant le taux de production, le taux d'utilisation des machines T et le taux d'utilisation du système de transport obtenus par le test de comparaisons multiples, pour l'effet taille de population, sont présentés dans le tableau 3.3. On peut remarquer de ce tableau que quatre groupes sont formés de a à d. Donc, il y a des différences significatives dans le taux de production, le taux d'utilisation des machines T₁ ou T₂, et le taux d'utilisation de l'AGV entre les résultats obtenus après modification de la taille de population.

En plus, il est aussi observé que l'augmentation de la taille de population a conduit à celle du taux de production et d'utilisation des équipements. Il n'y a plus d'amélioration si cette valeur dépasse 16 car les valeurs 16 et 32 forment un seul groupe.

L'augmentation du taux de production, de l'utilisation des machines et du système de transport, lorsque la taille de la population est supérieure ou égale à 16 peut être due à la répartition de toutes ces particules dans l'espace de recherche, car cette taille de population est assez suffisante pour bien explorer l'espace de solutions.

Les résultats concernant l'effet de la taille de population sur le temps de cycle et les en-cours obtenus par la méthode LSD, sont présentés dans le tableau 3.4. Il est montré dans ce tableau que les valeurs du temps de cycle sont classées en trois groupes, et que les niveaux 2 et 32 correspondent respectivement à la plus faible et la plus grande valeur du temps de cycle. La

diminution du temps de cycle dans le cas où la taille de la population est égale à 2 peut être interprétée par le faible nombre de pièces à l’intérieur du système, causé par les mauvaises décisions de routages.

Tableau 3.4 : Les résultats concernant le temps de cycle et les en-cours obtenus par le test de comparaisons multiples pour l’effet taille de population

Présence de pannes	Sans	Avec	Sans	Avec
La taille de population	Le temps de cycle	Le temps de cycle	Les en-cours	Les en-cours
32	181,31 a	184,84 a	7,29 a	7,24 a
8	174,88 b	179,44 b	7 b	7 b
16	174,02 b	178,57 bc	7,04 b	7 b
4	173,19 bc	179,36 b	6,95 c	6,94 c
2	170,9 c	176,5 c	6,69 d	6,67 d

Le tableau 3.4 montre également que quatre groupes ont été formés pour les en-cours. À cet effet, on peut dire que la variation de la taille de la population influe sur les performances du système évaluées par les en-cours. La taille de population 2 appartient au groupe d qui mène au plus faible niveau des en-cours, ceci peut être causé par le choix de mauvaises séquences de routages, qui peuvent conduire à des impasses qui empêchent l’entrée des pièces à l’intérieur du système.

3.5.2 L’effet des paramètres comportementaux (w, C_1 et C_2)

Dans le but d’analyser l’effet du comportement de l’essaim sur ses performances, lorsque l’algorithme OEP est appliqué pour la résolution du problème de routage des pièces en temps réel dans un système saturé, plusieurs études en simulation ont été réalisées en variant l’état de saturation du système contrôlé par le taux d’arrivée de pièces à la file infinie, afin d’adapter au mieux le comportement de la méthode au problème posé.

Pour chaque instance, le comportement de la métaheuristique est décrit en termes des paramètres (w, C_1, C_2), dont les valeurs ont été fixées à (1, 1, 1), (0,5, 0,5, 0.5) et (0,1, 0,1, 0,1) pour tester les performances de l’algorithme, lorsqu’il y’a un compromis entre les trois composantes comportementales qui influencent le déplacement de chaque particule avec des probabilités supposées fortes, moyennes et faibles. De plus, pour donner une importance à la composante physique, la composante cognitive et la composante sociale, ces paramètres ont été testés pour les valeurs (1, 0,1, 0,1), (0,1, 1, 0,1) et (0,1, 0,1, 1). La taille de la population prend la valeur 16 pour trouver les paramètres comportementaux critiques, lorsque la structure de l’essaim augmente.

Les résultats trouvés dans les mêmes conditions de simulation de l’étude précédente ont été soumis à une analyse statistique ANOVA avec deux facteurs (les paramètres comportementaux (1) fixés aux six niveaux décrits précédemment et l’état du système (2) caractérisé par les quatre valeurs du taux d’arrivée 1/20, 1/15, 1/10 et 1/5), tous les tests ont été effectués à un niveau de signification $\alpha=0.05$.

Le tableau 3.5 présente les différentes valeurs statistiques de F pour les effets paramètres comportementaux, état du système et leur interaction sur les différents indicateurs de performance. De ce tableau, on peut observer que la valeur F statistique n’a pas de valeurs significatives pour l’effet état du système et l’interaction entre les deux effets, sauf pour le taux de production en raison de l’influence de la quantité de la demande sur le pourcentage des pièces produites. Mais, la valeur

F statistique est supérieure à son point critique pour l'effet paramètres comportementaux évalués en terme du temps de cycle et des en-cours. Cet effet influence aussi le taux de production, le taux d'utilisation des machines et de l'AGV évalués sans présence de panne, mais il n'a pas un impact significatif dans l'étude avec présence de pannes.

Tableau 3.5 : Les valeurs F concernant les mesures de performances pour les effets paramètres comportementaux, état du système et leur interaction

Présence de pannes	Les effets	Le taux de production	Le taux d'utilisation des machines T	Le taux d'utilisation du système de transport	Les en-cours	Le temps de cycle	Le point critique
Sans	1	106,514	132,65	132,39	86,62	6,58	2,26
	2	1681283,41	1,03	1,02	0,65	0,53	2,65
	Interaction	9,87	1,21	1,2	1,20	0,51	1,71
Avec	1	1,54	1,35	1,35	6,68	5,06	2,26
	2	7281,75	1,69	1,69	1,11	1,92	2,65
	Interaction	0,92	0,91	0,91	0,86	0,3	1,71

Tableau 3.6 : Les résultats concernant l'effet des paramètres comportementaux sur le taux de production, d'utilisation des machines T et de l'AGV

Scénario	Sans présence de pannes		
	Le taux de production	Le taux d'utilisation des machines T	Le taux d'utilisation du système de transport
(1, 1, 1)	59,62 a	95,14 a	33,00 a
(0,5, 0,5, 0,5)	59,57 a	95,08 a	32,98 a
(0,1, 0,1, 1)	59,28 b	94,61 b	32,82 b
(0,1, 0,1, 0,1)	59,08 c	94,3 c	32,71 c
(1, 0,1, 0,1)	58,97 d	94,13 d	32,65 d
(0,1, 1, 0,1)	58,93 d	94,06 d	32,63 d

Les résultats concernant le taux de production, le taux d'utilisation des machines T et du système de transport obtenus par la méthode LSD dans le cas sans présence de pannes sont présentés dans le tableau 3.6. On peut remarquer que quatre groupes sont formés de a à d en raison de l'existence de différences significatives entre ces résultats trouvés après la variation des paramètres (w , C_1 , C_2).

En plus, il est aussi observé que les niveaux (1, 1, 1) et (0,5, 0,5, 0,5) forment le groupe a qui conduit aux meilleurs taux de production et d'utilisation des machines. On peut donc dire que cet algorithme est plus performant en termes de ces indicateurs, lorsqu'il y a un équilibre entre les différentes stratégies de déplacement contrôlées par des moyennes ou fortes probabilités. En outre, il ne nous paraît pas intéressant de favoriser clairement chacune d'entre elles surtout celles effectuées à base d'une mutation ou un croisement avec le best local.

Les résultats concernant le temps de cycle et les en-cours obtenus par la méthode LSD sont présentés dans le tableau 3.7, qui montre que ceux du temps de cycle sont classés en trois groupes dans le cas sans pannes, et en deux groupes dans le cas avec pannes. Donc, la variation du

comportement de l'essai influe sur le temps de cycle. Dans les deux scénarios, le niveau (0,5, 0,5, 0,5) conduit aux plus faibles valeurs du temps de cycle qui correspondent respectivement aux classes c et b dans les cas sans et avec présence de pannes.

Tableau 3.7 : Les résultats concernant l'effet des paramètres comportementaux sur le temps de cycle et les en-cours

Présence de pannes	Sans	Avec	Sans	Avec
Les paramètres comportementaux	Le temps de cycle	Le temps de cycle	Les en-cours	Les en-cours
(0,1, 0,1, 1)	181,06 a	183,76 a	7,29 a	7,25 a
(1, 1, 1)	179,4 ab	185,78 a	7,21 b	7,22 b
(0,1, 0,1, 0,1)	179,04 ab	185,32 a	7,18 c	7,23 b
(0,1, 1, 0,1)	178,72 b	183,73 a	7,17 c	7,13 b
(1, 0,1, 0,1)	177,82 b	183,4 a	7,17 c	7,14 b
(0,5, 0,5, 0,5)	174,02 c	178,57 b	7,04 d	7 c

On peut aussi remarquer que les en-cours sont classés en quatre groupes dans le scénario sans pannes et trois groupes en cas de présence de pannes. Par conséquent, on peut dire que les performances du système évaluées par les en-cours sont sensibles à la variation du comportement de l'essai. De plus, il est observé que le niveau (0,5, 0,5, 0,5) forme le groupe d dans le cas sans pannes et c dans celui avec pannes, qui mènent aux plus faibles valeurs des en-cours.

De cette analyse, on peut dire qu'il est conseillé d'ajuster les paramètres comportementaux au niveau (0,5, 0,5, 0,5), qui correspond à un compromis entre les trois stratégies de déplacement (suivre la vitesse courante, le best local ou le best global) à une moyenne probabilité pour chacune d'entre elles, afin de conduire à une amélioration du taux de production et celle d'utilisation des différents équipements, sans une dégradation des performances liées au temps de cycle et aux en-cours.

3.6. Analyse de l'effet de règles de séquençement combinées avec l'algorithme OEP proposé

Une des approches permettant de gérer en temps réel la flexibilité des ateliers, est celle basée sur les règles de priorité proposées pour gérer les différentes files d'attente. L'objectif de cette section est l'investigation de l'interaction de décisions des routages alternatifs basées sur les essais particulières, et de séquençement de machines basées sur ces approches, lorsque les pièces passent au système selon leur ordre d'arrivée à la file infinie.

3.6.1 Les décisions de séquençement de machines

Les décisions de séquençement permettent de déterminer à chaque fois qu'une ressource se libère, parmi toutes les pièces en attente du traitement dans la file d'entrée de cette ressource, la prochaine pièce à traiter.

Selon Mebarki [Mebarki 95] la gestion des files d'attente par des règles de priorité constitue une des approches les plus simples et les plus utilisées pour ordonnancer en temps réel les opérations à traiter. À cet effet, on peut trouver plusieurs tentatives d'étudier le problème d'ordonnancement dans les FMS avec flexibilité de routages qui prennent en considération les décisions de séquençement de machines basées sur ces heuristiques. Saygin et Kilic [Saygin 04] ont

combiné trois règles de sélection de routages avec plusieurs règles de priorité. Chan [**Chan 03a**] a analysé l'effet de différentes règles de séquençement et de routages sur les performances d'un FMS, évaluées par plusieurs indicateurs de performance tels que le makespan, et le taux d'utilisation moyen des machines. Mahmoodi et al. [**Mahmoodi 99**] ont examiné par simulation les effets de la flexibilité de routage et des différentes règles de séquençement sur les performances d'un FMS. Joseph et Sridharan [**Joseph 11c**] ont analysé les effets de la flexibilité de routage, de séquence et de règles de séquençement sur les performances d'un système...

Pour prendre cette décision, les règles de séquençement sont utilisées pour assigner aux pièces existantes dans chaque file d'entrée d'une machine une valeur de priorité, la pièce ayant une priorité élevée sera sélectionnée pour le traitement. L'assignation de ces priorités est réalisée en fonction de plusieurs paramètres concernant les opérations (durée opératoire), les produits (date de fin au plus tard souhaitée), ou les ressources (taux d'utilisation)... Dans ce travail, en plus de la règle FIFO (First In First Out) ces décisions sont prises à l'aide de différentes règles de priorité utilisant le temps opératoire comme un paramètre de priorité, qui sont à portée locale (Shortest Processing Time (SPT), Longest Processing Time (LPT)) ou des règles à portée globale (Shortest total operation time (STOT), Longest total operation time (LTOT)). Ces règles dont les méthodes d'assignement de priorité sont décrites par les équations (3.5, 3.6, 3.7, 3.8) peuvent être définies comme suit :

- ✓ Shortest Processing Time (SPT) : Cette règle illustre le temps de traitement minimum dans la machine courante des pièces contenues dans sa file d'entrée, la pièce dont cette valeur est minimale est sélectionnée :

$$SPT = \min_{j \text{ appartient } E(k)} (P_{jk}) \quad (3.5)$$

P_{jk} : le temps de traitement de la pièce j dans la machine k .

$E(k)$: la file d'entrée de la machine k .

- ✓ Longest Processing Time (LPT) : La pièce avec le temps de traitement le plus long dans la machine courante est sélectionnée :

$$LPT = \max_{j \text{ appartient } E(k)} (P_{jk}). \quad (3.6)$$

- ✓ Shortest Total Operation Time (STOT) : Cette règle illustre le temps de traitement total des pièces contenues dans le tampon d'entrée de la machine courante, dans toutes les machines qui appartiennent à leurs routages, la pièce dont cette valeur est minimale est sélectionnée :

$$STOT = \min_{j \text{ appartient } E(k)} (\sum_l P_{jl}) \quad (3.7)$$

l : une machine qui appartient au routage de la pièce j .

- ✓ Longest Total Operation Time (LTOT) : la pièce dont le temps de traitement total est maximal est sélectionnée

$$LTOT = \max_{j \text{ appartient } E(k)} (\sum_l P_{jl}) \quad (3.8)$$

3.6.2 Résultats et interprétations

Afin de pouvoir analyser l'effet des règles de séquençement de machines étudiées, et d'évaluer leurs performances lorsqu'elles sont combinées avec l'algorithme à base des essais particuliers proposé pour le routage des pièces lorsque le système est en état de saturation, nous avons réalisé plusieurs études en simulation avec des variations sur les critères du système étudié (le taux d'arrivée de pièces à la file infinie). Cette section est réservée à la présentation de certains

résultats trouvés lorsque les paramètres de la métaheuristique étudiée sont fixés comme suit : la taille de population = 16, w , C_1 , et C_2 prennent la valeur 0.5. Ces valeurs ont été prises car il a été démontré dans la section de l'analyse de sensibilité, que ces valeurs conduisent à des résultats satisfaisants.

Dans cette étude, nous avons utilisé la méthode d'analyse statistique ANOVA avec deux facteurs (la politique de séquençement (1) et l'état du système (2) caractérisé par les différents niveaux de surcharge définis par le taux d'arrivée de pièces qui varient de 1/20 à 1/5), tous les tests ont été effectués à un niveau de signification $\alpha=0.05$.

Tableau 3.8 : Les valeurs F concernant les mesures de performances pour les effets politique de séquençement, état du système et leur interaction

Présence de pannes	Les effets	Le taux de production	Le taux d'utilisation des machines T	Le taux d'utilisation du système de transport	Les en-cours	Le temps de cycle	Le point critique
Sans	1	532,99	575,42	575,67	3,45	2,76	2,42
	2	1804189,96	0,79	0,79	1,80	1,83	2,65
	Interaction	34,74	0,69	0,69	0,79	1,43	1,81
Non	1	292,11	389,25	361,29	5,53	13,87	2,42
	2	844939,67	0,61	0,61	0,12	1,53	2,65
	Interaction	20,85	0,53	0,58	0,71	1,12	1,81

Le tableau 3.8 présente les différentes valeurs statistiques de F concernant les différentes mesures de performances obtenues pour les effets : politique de séquençement, état du système et leur interaction. Il est clair dans ce tableau, que la valeur F statistique est supérieure à son point critique pour l'effet politique de séquençement de machines, mais elle n'a pas de valeurs significatives pour les autres effets sauf pour le taux de production. Donc, on peut conclure que les règles de séquençement ont un impact significatif sur les performances du système.

Tableau 3.9 : Les résultats concernant l'effet de règles de séquençement sur le taux de production, d'utilisation des machines T et de l'AGV

Scénario	Sans présence de pannes			Avec présence de pannes		
	Le taux de production	Le taux d'utilisation des machines T	Le taux d'utilisation du système de transport	Le taux de production	Le taux d'utilisation des machines T	Le taux d'utilisation du système de transport
SPT	60,66 a	96,82 a	33,59 a	58,85 a	93,91 a	32,58 a
STOT	59,92 b	95,63 b	33,17 b	58,08 b	92,71 b	32,16 b
LTOT	59,89 b	95,60 b	33,16 b	58,02 b	92,61 b	32,13 b
FIFO	59,57 c	95,08 c	32,98 c	57,67 c	92,03 c	31,93 c
LPT	59,03 d	94,22 d	32,69 d	57,15 d	91,18 d	31,64 d

Le tableau 3.9 illustre les résultats obtenus par la méthode LSD pour le taux de production, le taux d'utilisation des machines T et le taux d'utilisation du système de transport. Ce tableau montre

que quatre groupes sont formés de a à d. Donc, il y' a des différences significatives dans le taux de production, le taux d'utilisation des machines T_1 ou T_2 , et le taux d'utilisation de l'AGV entre les différentes règles de séquençement étudiées. En plus, il est observé que les règles SPT et LPT forment les groupes a et d, qui correspondent respectivement aux meilleure et mauvaise valeurs obtenues pour les différents indicateurs de performance.

L'augmentation du taux de production, de l'utilisation des machines et du système de transport, lorsque la règle SPT est utilisée pour le séquençement de machines peut être due au mode de fonctionnement de cette règle, car elle favorise la pièce dont le temps de traitement est minimal, ce qui permet de passer et de sortir rapidement du système. Par conséquent, la productivité augmente ainsi que l'utilisation du système évaluée en fonction de celles des machines et du système de transport.

Tableau 3.10 : Les résultats concernant l'effet de règles de séquençement sur le temps de cycle

Présence de pannes	Sans	Avec	Sans	Avec
Les règles de séquençement	Le temps de cycle	Le temps de cycle	Les en-cours	Les en-cours
LPT	175,62 a	183,15 a	7,06 a	7,04 a
FIFO	174,02 ab	178,57 b	7,04 b	7 b
LTOT	172,97 b	177,25 b	7,05 ab	7,02 ab
STOT	172,35 b	177,05 b	7,05 ab	7,03 a
SPT	171,98 b	174,19 c	7,06 a	7,04 a

Le tableau 3.10 présente les résultats obtenus par la méthode LSD concernant le temps de cycle, qui sont classés en deux groupes dans le cas sans pannes et trois groupes dans le cas avec pannes. Ce tableau montre que les règles SPT et LPT correspondent respectivement au plus faible et plus grande valeurs du temps de cycle. Ces observations peuvent être interprétées par les caractéristiques des règles SPT et LPT, qui donnent respectivement des priorités élevées aux pièces avec le temps de traitement le plus faible ou le plus élevé dans la machine courante. Ceci a conduit à accélérer le processus de production dans le cas de l'utilisation de la règle SPT comme une heuristique de séquençement, et à l'alourdir lors de l'utilisation de la deuxième règle. Ce tableau présente également les résultats concernant les en-cours. Malgré que ces résultats soient classés en deux groupes, on ne peut pas vraiment observer de grandes différences entre ces résultats.

En conclusion, on peut dire qu'il est préférable de combiner l'algorithme à base des essais particuliers proposé, comme une approche de sélection en temps réel de routages alternatifs de pièces, avec les décisions de séquençement des pièces contenues dans les files d'entrée des machines basées sur la règle SPT, afin de pouvoir améliorer le taux de production et l'utilisation des différents équipements, sans dégrader les performances du système liées au temps de cycle et les en-cours.

3.7. Analyse de l'effet de la combinaison de l'algorithme OEP avec les décisions de lancement de pièces

Un des paramètres qui influent sur les performances de systèmes est le mode de lancement des ordres de fabrication, qui peuvent être classés suivant plusieurs critères (la priorité, la date de livraison, la date de commande...).

Cette section a pour but d'analyser par simulation l'effet de décisions de lancement de la production basées sur les règles de priorité sur les performances du système étudié, lorsque les décisions de routages alternatifs sont basées sur les essais particulières, et la règle FIFO est utilisée pour le séquençement de machines (les pièces contenues dans les files d'entrée des machines passent au traitement selon leur ordre d'arrivée à ces files).

3.7.1 Les décisions de lancement de pièces

Les systèmes de production actuels sont caractérisés par de fortes perturbations qui peuvent être liées à un changement de la demande d'un client, à l'arrivée d'une commande urgente,... En effet, en pratique, toutes ces données ne sont pas toujours connues à l'avance. Malgré que ces ordres puissent prendre du retard, ils influent sur les décisions du pilotage de l'atelier, et peuvent provoquer des surcharges à court terme, surtout si la quantité de ces demandes dépasse la capacité de l'atelier. Dans cette situation, l'atelier serait incapable de les résorber dans de meilleurs délais.

Selon Mebarki [Mebarki 95] pour éviter une telle situation on ne doit pas se limiter à accélérer les ordres urgents, mais on doit simultanément retarder les ordres devenus entre-temps moins urgents. Dans ce cas, il ne faut pas que les responsables des lancements raisonnent en terme de capacité mais de priorité. Il peut être donc nécessaire de définir la priorité des ordres arrivant dans l'atelier pour suivre l'évolution de ces priorités.

Les décisions permettant de déterminer, parmi toutes les pièces en attente du début du traitement (dans notre système, les pièces contenues dans la station de chargement), la prochaine pièce à traiter, sont appelées les décisions de lancement de pièces.

Par rapport aux décisions de séquençement, la littérature indique qu'il y'a pas assez de travaux, qui se sont intéressés à la prise en compte simultanée des décisions de lancement et de routages de pièces. On peut citer comme exemple les travaux de Joseph et Sridharan, ils ont analysé dans [Joseph 08] l'effet de différentes règles de lancement sur les performances d'un FMS évaluées par le temps de cycle moyen, le retard moyen et l'utilisation moyenne des machines, mais ils ont supposé dans [Joseph 11a] et [Joseph 11c] que FIFO est utilisée pour le lancement de pièces...

Dans ce travail, en plus de la règle FIFO (First In First Out) les décisions de lancement de pièces sont prises à l'aide des mêmes règles de priorité utilisées pour le séquençement dans la section précédente. Mais, cette fois, elles sont appliquées pour assigner les priorités aux pièces contenues dans la station de chargement, selon les formules décrites par les équations (3.9, 3.10, 3.11, 3.12). Leurs modes de fonctionnement lorsqu'elles sont adoptées comme règles de lancement des ordres de fabrication peuvent être définis comme suit :

- ✓ Shortest Processing Time (SPT) : La pièce parmi les pièces contenues dans le tampon de chargement, et dont le temps de traitement dans la première machine de son routage est minimal, est sélectionnée :

$$SPT = \min_{j \text{ appartient } SC} (P_{jk}) \tag{3.9}$$

- ✓ P_{jk} : Le temps de traitement de la pièce j dans la machine k , qui est la première machine de son routage.
- ✓ Longest Processing Time (LPT) : La pièce avec le temps de traitement le plus long dans la première machine de son routage est sélectionnée

$$LPT = \max_{j \text{ appartient } SC} (P_{jk}). \tag{3.10}$$

- ✓ Shortest Total Operation Time (STOT) : Cette règle illustre le temps de traitement total, de chaque pièce contenue dans la station de chargement, dans toutes les machines qui appartiennent à leurs routages, la pièce dont cette valeur est minimale est sélectionnée :

$$STOT = \min_{j \text{ appartient SC}} (\sum_l P_{jl}) \quad (3.11)$$

l : Une machine qui appartient au routage de la pièce j .

- ✓ Longest Total Operation Time (STOT) : La pièce dont le temps de traitement total est maximal est sélectionnée

$$LTOT = \max_{j \text{ appartient SC}} (\sum_l P_{jl}) \quad (3.12)$$

3.7.2 Résultats et interprétations

Cette section est réservée à la présentation de certains résultats trouvés après plusieurs simulations avec des variations sur les critères du système étudié en état de saturation, effectuées pour analyser l'impact des règles de lancement de pièces, lorsque les décisions de routages des pièces sont basées sur l'algorithme à base des essais particuliers et FIFO est utilisée comme une règle de séquençement de machines. Dans cette étude, les paramètres de la métaheuristique étudiée sont fixés comme suit : la taille de population = 16, w , C_1 , et C_2 prennent la valeur 0.5.

La méthode d'analyse statistique ANOVA a été utilisée pour étudier l'effet des facteurs expérimentaux. Deux facteurs sont ainsi analysés à un niveau de signification $\alpha=0.05$, la politique de lancement (1) définie par les différentes règles de lancement et l'état du système (2) caractérisé par les différents taux d'arrivée de pièces qui varient de 1/20 à 1/5).

Tableau 3.11 : Les valeurs F concernant les mesures de performances pour les effets politique de lancement, état du système et leur interaction

Présence de pannes	Les effets	Le taux de production	Le taux d'utilisation des machines T	Le taux d'utilisation du système de transport	Les en-cours	Le temps de cycle	Le point critique
Sans	1	422,25	554,55	555,62	128,58	2,28	2,42
	2	2452650,8	0,22	0,22	1,86	0,10	2,65
	Interaction	28,34	1,79	1,79	1,30	1,03	1,81
Avec	1	177,02	202,32	202,17	146,84	2,38	2,42
	2	955871,4	0,47	0,47	0,30	0,13	2,65
	Interaction	11,91	0,67	0,67	0,45	1,76	1,81

Les différentes valeurs statistiques de F pour les différentes mesures de performances concernant les effets : politique de lancement, état du système et leur interaction, sont présentées dans le tableau 3.11. D'après ce tableau, on peut observer que la valeur F statistique est supérieure à son point critique pour l'effet politique de lancement de pièces évalué en termes du taux de production, d'utilisation des machines T et de l'AGV et les en-cours mais elle n'a pas de valeurs significatives pour le temps de cycle et les autres effets sauf pour le taux de production. Donc, on peut conclure que l'effet des règles de lancement a un impact significatif sur les performances du système.

Tableau 3.12 : Les résultats concernant l'effet de règles de lancement sur le taux de production, le taux d'utilisation des machines T et de l'AGV

Scénario	Sans présence de pannes			Avec présence de pannes		
	Le taux de production	Le taux d'utilisation des machines T	Le taux d'utilisation du système de transport	Le taux de production	Le taux d'utilisation des machines T	Le taux d'utilisation du système de transport
STOT	60,76 a	96,96 a	33,64 a	58,84 a	93,9 a	32,57 a
LPT	60,38 b	96,40 b	33,44 b	58,57 b	93,47 b	32,42 b
LTOT	60,37 b	96,34 b	33,42 b	58,47 b	93,3 b	32,36 b
SPT	59,94 c	95,65 c	33,18 c	58,06 c	92,68 c	32,15 c
FIFO	59,57 d	95,08 d	32,98 d	57,67 d	92,03 d	31,93 d

Le tableau 3.12 illustre les résultats obtenus par la méthode LSD pour le taux de production, le taux d'utilisation des machines T et le taux d'utilisation du système de transport, dans les deux cas avec et sans présence de pannes. Ces résultats sont classés en quatre groupes qui varient de a à d. Donc, il y a des différences significatives dans la productivité et l'utilisation du système entre les différentes règles de lancement étudiées, sauf entre les règles LPT et LTOT qui font partie du même groupe b. En plus, il est observé que les règles STOT et FIFO forment les groupes a et d, qui correspondent respectivement à la meilleure et la plus mauvaise valeurs obtenues pour ces indicateurs de performance.

On peut dire que toutes les règles de lancement ont donné de meilleures performances jugées par le taux de production et d'utilisation des différents équipements par rapport à la règle FIFO. Donc, il est préférable de gérer les ordres de fabrication au niveau de la station de chargement mieux que les faire passer au système selon leur ordre d'arrivée.

L'augmentation du taux de production, de l'utilisation des machines et du système de transport, lorsque la règle STOT est utilisée pour le lancement de pièces peut être due à ses caractéristiques de fonctionnement. Cette règle favorise la pièce dont le temps de traitement total est minimal, donc la pièce qui ne reste pas longtemps dans l'atelier va passer en priorité, et sortir rapidement. Par contre, les autres pièces dont le temps de traitement total est important vont être bloquées au niveau de la station de chargement. Ceci conduit à augmenter le nombre des pièces sortantes du système et aussi son utilisation évaluée en fonction de celles de ses machines et de son système de transport.

Tableau 3.13 : Les résultats concernant l'effet de règles de lancement sur les en-cours

Scénario	Sans présence de pannes	Avec présence de pannes
	Les en-cours	Les en-cours
STOT	7,30 a	7,26 a
LTOT	7,23 b	7,20 b
LPT	7,23 b	7,19 b
SPT	7,18 c	7,14 c
FIFO	7,04 d	7 d

Le tableau 3.13 présente les résultats obtenus par la méthode LSD concernant les en-cours qui sont classés en quatre groupes. Ce tableau montre que les règles STOT et FIFO correspondent respectivement à la plus grande et plus faible valeur des en-cours. Ces observations peuvent être interprétées par l'augmentation du nombre de pièces qui circulent à l'intérieur du système dans le cas de l'utilisation de la règle STOT, qui peut être due à la minimisation des inter-blocages causés par les ordres qui nécessitent des durées de traitement importantes.

De cette étude, il nous semble intéressant de gérer les ordres de fabrication au niveau de la station de chargement, dont l'impact sur la surcharge du système et ainsi ses performances est important, par des règles de priorité. En plus, il est préférable d'utiliser l'algorithme à base des essais particuliers comme une approche de sélection en temps réel de routages alternatifs de pièces, et la règle STOT comme une heuristique de lancement de pièces au niveau du tampon de chargement afin de pouvoir améliorer la productivité et l'utilisation du système.

3.8.Conclusion

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés à l'adaptation des essais particuliers pour résoudre le problème de sélection de routages alternatifs dans un FMS en temps réel. Premièrement, nous avons présenté le modèle FMS étudié. La deuxième section de ce chapitre a été consacrée à la présentation d'un modèle mathématique développé pour les décisions en temps réel de routages des pièces, et les différentes mises à jour et formulations nécessaires pour l'adaptation de l'optimisation par essais particuliers à ce problème. La troisième section a été réservée à la présentation d'une framework logicielle, conçue pour analyser les performances de plusieurs métaheuristiques, appliquées pour résoudre le problème de choix de routages de pièces dans plusieurs configurations des FMS. La quatrième section est une étude de l'influence des différents paramètres structurels et comportementaux sur les performances du système, afin de trouver le jeu de paramètres qui conduit à des solutions de qualité acceptable.

Les deux dernières sections ont analysé respectivement par simulation, l'effet des différentes règles de séquençement de machines et de lancement de pièces sur les performances du système, lorsque l'algorithme à base des essais particuliers proposé est appliqué pour la prise de décisions de routages des pièces. De ces études, nous avons constaté que cet algorithme est plus performant lorsqu'il est combiné avec la règle de séquençement SPT, car cette règle favorise la pièce qui a le plus faible temps de processus, ce qui permet aux pièces de circuler rapidement à l'intérieur du système. Il nous paraît aussi intéressant d'utiliser la règle STOT pour les décisions de lancement de pièces au niveau de la station de chargement, mieux que les faire passer au système selon leur ordre d'arrivée (selon la règle FIFO).

L'algorithme proposé présente l'avantage qu'il offre la prise de décisions de routages des pièces en temps réel dans un contexte avec des perturbations de différentes origines, liées aux pannes de machines ou d'autres incertitudes dues au non déterminisme des demandes de fabrication. Mais, les données du problème liées au temps opératoire sont supposées connues. Alors qu'en réalité il existe plusieurs sortes d'aléas qui vont perturber le plan de production basé sur ces données. Le chapitre suivant présente une approche de ré-ordonnancement en temps réel de pièces en cours de traitement basée sur les essais particuliers, dans le but d'améliorer les performances du système étudié, en palliant aux aléas concernant les variations du temps opératoire.

Chapitre 4

Un algorithme à base des essais particuliers pour le ré-ordonnement en temps réel dans un environnement incertain avec flexibilité de routages

4.1.Introduction

Dans un contexte industriel largement ouvert à l'étranger caractérisé par une concurrence exigeante et un perpétuel changement, l'objectif principal de la production industrielle est d'apporter une valeur ajoutée à ses produits, pour répondre aux besoins de ses clients tout en minimisant les coûts, les délais de production...

Pour y arriver, ces principaux critères de satisfaction de clients doivent être pris en compte, non seulement lors de la phase de planification, mais aussi lors de la phase d'ordonnement qui nécessite la prise en compte de plusieurs autres critères, dont certains sont contradictoires entre eux, tels que la minimisation des retards, du temps de cycle, l'augmentation des taux d'utilisation des équipements.

Beaucoup de travaux qui concernent l'ordonnement d'un FMS ont été réalisés depuis le début des années 80, où les ateliers flexibles ont commencé à gagner l'acceptation par les pays industrialisés, et ce domaine continue à attirer les intérêts des secteurs académiques et industriels. Plusieurs travaux dans ce domaine reposent sur des modèles avec hypothèses déterministes, souvent jugées trop restrictives et peu adaptées à la réalité de l'ordonnement du système de production.

En effet, l'ordonnement dépend de données internes liées au système qui assurent sa réalisation (l'état et les capacités des équipements, les durées opératoires,...) ou externes correspondantes généralement à son environnements (les fournisseurs, les clients...). Ces données du problème ne sont pas toujours connues à l'avance, et susceptibles de changer au moment ou avant le début de la production d'une façon imprévisible, ce qui conduit à une incompatibilité entre le plan planifié et le plan réel, donc la probabilité qu'un ordonnancement défini a priori soit exécuté tel qu'il a été prévu est très faible. De plus, les ateliers de production sont généralement soumis à un certain nombre d'incertitudes, qui vont perturber le plan de production et par conséquent peuvent dégrader les performances prédites par les méthodes déterministes. Ces incertitudes peuvent être de différentes sources tels que les pannes de machines, la modification de commandes, l'augmentation ou la diminution des capacités des ressources...

Ces incertitudes peuvent avoir une influence importante dans l'ordonnancement d'atelier. Pour cette raison, il faut développer pour ces systèmes des solutions capables de résister faces à ces événements imprévisibles avec le maintien des performances de ces systèmes élevées.

Dans ce chapitre, en plus des incertitudes considérées précédemment liées à la variété des commandes et des pannes de machines, les durées opératoires sont supposées incertaines et suivent une loi exponentielle. Celle-ci est très utilisée pour la modélisation des fortes perturbations qui peuvent avoir des conséquences sur les performances du système, en raison de la modification de l'occupation et la disponibilité des machines, du décalage des dates de début de plusieurs opérations, du changement dans la séquence de réalisation... Pour faire face à cette situation, nous avons proposé un algorithme de ré-ordonnancement en temps réel basé sur les essaims particuliers capable de s'intégrer à cet environnement, de travailler en continu sur de longues périodes de temps, et d'intervenir à chaque arrivée d'une nouvelle pièce au système. Ce processus de ré-ordonnancement ne concerne que les décisions de routages des pièces, contributeur majeur de notre travail. Cependant, les autres décisions sont toujours prises à l'aide de règles de priorité, qui sont des approches réactives simples et garantissant des décisions suffisamment rapides pour réagir aux changements de l'environnement...

Ce chapitre qui met l'accent sur un algorithme de ré-ordonnancement en temps réel dans un FMS incertain avec flexibilité de routage présente dans un premier temps un bref aperçu sur l'ordonnancement avec présence d'incertitudes, la notion d'incertitude, les sources d'incertitudes et les approches de résolution d'un ordonnancement dans un environnement avec présence d'incertitudes sont alors décrites. Ensuite, la deuxième section est consacrée à la présentation de la mise en œuvre de l'algorithme proposé pour modifier en ligne l'ordonnancement initial, afin de palier au problème de la déviation de la durée opératoire avec les contraintes citées précédemment. Après, la troisième section concerne son évolution en fonction de la variation de ses paramètres. L'efficacité de cet algorithme, développé pour faire face à des données qui viennent à changer de façon imprévisible, des ressources qui tombent en panne, des ordres de fabrications aléatoires, d'autres critères et contraintes multiples, est testée dans la quatrième section par rapport à l'algorithme proposé dans le chapitre 3, et un autre algorithme de ré-ordonnancement de la station de chargement [Souier 12b], [Souier 10a], appliquées dans les mêmes conditions opératoires. Enfin, ce chapitre met en évidence l'interaction de l'algorithme proposé avec les décisions de séquençage de machines et de lancement de pièces prises à l'aide des règles de priorité.

4.2.L'ordonnancement sous incertitude

Cette section a pour objectif d'introduire au lecteur le domaine de l'ordonnancement sous incertitudes. Pour plus de détails sur ce domaine, le lecteur pourra se référer à plusieurs revues de la littérature telles que celles données dans [Chaari 10], [Davenport 00], [Ouelhadj 09], [Aytug 05]...

4.2.1 La notion de l'incertitude (sources et définition)

Selon Chaari [Chaari 10] l'incertitude concerne le doute quant à la validité de la connaissance ou le fait de ne pas savoir si une proposition est vraie ou pas. En ordonnancement, les incertitudes ont été définies de plusieurs manières. Nous prendrons comme définition celle proposée par Esswein dans [Esswein 03] et adoptée par Pinot [Pinot08] :

On parle d'incertitudes pour désigner les modifications potentielles des données d'un problème d'ordonnancement qui peuvent intervenir entre le calcul d'un ordonnancement et la fin de sa mise en oeuvre réelle dans l'atelier.

En effet, les données d'un problème d'ordonnancement sont soumises à des incertitudes si leurs valeurs obtenues pendant le calcul de l'ordonnancement sont susceptibles de changer par des modifications imprévisibles pendant son exécution. Donc, selon Pinot [Pinot 08] les incertitudes correspondent à la différence entre les prévisions effectuées durant la phase prédictive (avant l'exécution de l'ordonnancement) et les données réelles obtenues après la phase réactive (pendant l'exécution de l'ordonnancement).

En réalité, dans le cas de l'ordonnancement d'atelier, le plan de production prédit peut être perturbé par plusieurs types d'incertitudes de différentes sources. Parmi ces incertitudes et leurs sources, nous pouvons citer [Davenport 00], [Herroelen 05], [La Hoang 05], [Pinot 08] :

- ✓ La variation de la durée d'une opération relativement à celles estimées : c'est le cas des opérations en retard, mais également de celles en avance.
- ✓ La panne ou l'indisponibilité d'une ou plusieurs machines ou des outils, on peut considérer l'indisponibilité d'un ou plusieurs opérateurs comme une panne machine si la machine est commandée par cet opérateur.
- ✓ Variation de la capacité d'une ressource.
- ✓ L'insertion ou la suppression d'une opération. Cela arrive fréquemment, généralement sous la forme d'une commande urgente à traiter. En plus, une tâche peut arriver ou être annulée aléatoirement.
- ✓ La différence entre le modèle et la réalité. Par exemple, la non présence des temps de transport entre ressources dans le modèle alors que dans la réalité, ce temps n'est pas négligeable.
- ✓ Changements des informations données par les fournisseurs et les sous-traitants participants indirectement à sa mise en oeuvre.
- ✓ L'arrivée en retard de la matière première, le manque de cette matière ou d'outils qui peuvent être rencontrés dans les ateliers ne disposant pas de stock, ou d'une livraison adéquate et régulière.

En plus de leurs différentes origines, les incertitudes peuvent avoir des conséquences importantes dans l'ordonnancement d'atelier. Voici quelques exemples tirés de la thèse de Ghezail [Ghezail 10] :

- ✓ Les pannes de machines peuvent provoquer un arrêt de la production durant le temps de réparation et de remise en marche.
- ✓ Les incertitudes sur les données du problème (durée opératoire, dates de début au plus tôt,...) peuvent avoir de conséquences sur l'occupation de machines.
- ✓ La modification des commandes (commande urgente, nouvelle commande, commande annulée...) entraîne la modification dans la séquence de réalisation.
- ✓ La non disponibilité de certaines ressources peut décaler les dates de début...

4.2.2 La classification et la modélisation des incertitudes

Une caractéristique importante de l'environnement dans lequel s'applique un ordonnancement réside dans son caractère incertain, en raison de plusieurs sortes d'aléas qui vont perturber le plan de production. En effet, selon le système de production considéré et son environnement, plusieurs types d'incertitudes peuvent arriver en cours de l'exécution du plan de production.

Ces incertitudes sont classées de plusieurs manières. Mehta et Uzsoy [**Mehta 99**] ainsi que Cowling et Johansson [**Cowling 02**] ont considéré essentiellement deux classes d'incertitudes : celles liées aux ressources (les pannes de machines, changement et/ ou manque de ressources...) et celles liées aux travaux (l'ajout et/ ou l'annulation d'un travail, changement de la priorité des travaux...). Une autre classification est donnée par Brautigam et al. [**Brautigam 03**] qui distinguent des incertitudes endogènes et exogènes. L'incertitude endogène se réfère à l'incertitude propre aux caractéristiques techniques de l'entreprise et les incertitudes exogènes sont liées au marché.

D'autres comme Artigues et al. [**Artigues 02**] ont proposé de classer les différents types d'incertitudes en fonction de leur niveau de connaissance. Cette classification qui consiste à considérer jusqu'à quel point les incertitudes peuvent être connues ou prévues, a identifié trois catégories d'incertitudes : des incertitudes complètement ou totalement inconnues qui sont liées à des événements imprévisibles pour lesquels aucune information n'est connue à l'avance, par exemple une grève ou l'absence des ouvriers, un accident ou une catastrophe naturelle dans l'atelier... Des suspicions du futur qui sont issues de l'intuition et l'expérience du décideur, sont généralement des incertitudes difficilement modélisable et fortement liées au décideur, par exemple il peut suspecter l'annulation d'une commande par un client..., et des incertitudes partiellement connues ou connus qui sont prévisibles et pour lesquelles un modèle d'information peut être déterminé.

Bonfill [**Bonfill 06**] a présenté une autre classification qui distingue trois niveaux d'incertitudes : les incertitudes stratégiques, tactiques et opérationnelles. Les incertitudes stratégiques sont celles dont les sources ont un effet principal sur les décisions prises à long terme. Elles incluent les incertitudes externes ou exogènes venant des conditions environnementales, des changements de technologie, les concurrents et les réglementations gouvernementales. Les incertitudes tactiques couvrent plusieurs sources d'incertitudes qui peuvent influencer la prise de décision à moyen terme, par exemple des paramètres du marché, des perturbations dans l'information et les flux des matières. Les incertitudes opérationnelles comprennent celles qui affectent principalement les décisions prises à court terme, par exemple la variation des durées opératoires, l'absentéisme de l'opérateur, la disponibilité d'équipements...

Dans la littérature, une distinction est faite sur les types de modélisation des incertitudes prises lors de la construction de l'ordonnancement : selon leur formalisme, mode de fonctionnement, niveaux de connaissance de l'incertitude cités précédemment... Selon Bonfill [**Bonfill 06**] les principales approches envisagées pour une représentation formelle de l'incertitude associée aux paramètres du modèle et des contraintes impliquent des méthodes probabilistes et la théorie des ensembles flous. En plus de ces deux approches, Chaari [**Chaari 10**] a présenté un troisième mode de modélisation basé sur la construction d'un ensemble de scénarios (appelés aussi instances ou jeux de données) pour le reflet d'hypothèses concernant l'incertain. Dans [**Billaut 05**] quatre types de modèles sont distingués : les modèles stochastiques ou aléatoires, les modèles flous, les modèles par intervalles et les modèles par scénarios.

- ✓ La modélisation aléatoire ou stochastique consiste à modéliser les incertitudes du problème par des variables aléatoires ou des distributions de probabilité, en les associant aux données et aux paramètres du problème d'ordonnancement. Cette modélisation peut être utilisée lorsque l'on dispose d'informations sur l'effet des incertitudes sur les données du problème. Mais, selon Chaari [**Chaari 10**] elle présente l'inconvénient de l'incapacité de déterminer avec précision la distribution de probabilité appropriée.

- ✓ La modélisation floue est souvent préférée pour éviter le problème de la densité de probabilité, et représenter les connaissances imprécises tel que des informations recueillies en langage naturel..., surtout lorsque les incertitudes ne sont pas de nature aléatoire. Elle offre une représentation plus intuitive en associant aux paramètres des ensembles flous.
- ✓ La modélisation par scénarios énumère pour le problème P , un ensemble de scénarios (appelés aussi instances ou jeux de données) contenant des valeurs numériques relatives aux paramètres du problème. À chaque scénario (un problème d'ordonnancement distinct) une probabilité peut éventuellement être associée, sinon ils sont équiprobables.
- ✓ La modélisation par intervalles où chaque paramètre du problème prend sa valeur dans un intervalle continu de valeurs possibles, selon une densité de probabilité uniforme. Les paramètres auxquels est associé un modèle par intervalles sont généralement, les dates de disponibilité ou de début au plutôt des tâches, les dates échues et les temps opératoires...

4.2.3 Classification des approches d'ordonnancement en présence d'incertitudes

Depuis ces dernières années et en raison de l'influence importante des incertitudes dans l'ordonnancement d'atelier, de nombreuses approches d'ordonnancement sous incertitudes ont été proposées pour faire face à leurs conséquences. Plusieurs classifications de ces méthodes ont alors été décrites. Par exemple, celles présentées dans [Suresh 93], [O'Donovan 99], [Mehta 99], [Yang 08] ...

Une classification proposée par Suresh et Chaudhuri [Suresh 93] distingue trois types d'approches d'ordonnancement dans un environnement dynamique : les approches conventionnelles, les approches à base de connaissances et les approches distribuées. O'Donovan et al. [O'Donovan 99] ont classé les approches d'ordonnancement en présence d'incertitudes en quatre catégories principales : les approches complètement réactives, les approches prédictives-réactives, les approches robustes et les approches à bases de connaissances. Cette classification est similaire à celle proposée par Mehta et Uzsoy [Mehta 99], Yang et Geunes [Yang 08] ont ajouté une catégorie à cette classification pour qu'elle puisse intégrer les approches à priori proposées pour déterminer les séquences d'opérations à l'avance.

Une autre classification décrite par Herroelen et Leus [Herroelen 05] comporte cinq types d'approches d'ordonnancement de projet en présence d'incertitudes : les approches réactives, les approches stochastiques, les approches floues, les approches proactives et les approches basées sur l'analyse de sensibilité. La même classification existe dans [Herroelen 02] mais elle intègre une autre catégorie nommée les réseaux de projets stochastiques. Sans décrire les caractéristiques de chaque catégorie, on peut observer que certaines approches de modélisation des incertitudes sont supposées comme des approches de résolution. Ghezail [Ghezail 10] a classé les méthodes de résolution d'ordonnancement, selon la nécessité de réviser ou non l'ordonnancement de départ en deux catégories : méthodes sans ou avec révision de l'ordonnancement de départ.

Malgré la diversité des classifications, il est accepté que l'ordonnancement sous incertitudes puisse se découper en deux phases principales :

- ✓ La phase prédictive (la phase hors ligne), c'est une phase effectuée avant l'exécution de l'ordonnancement dans l'atelier, repose intégralement sur un modèle qui permet de calculer l'ordonnancement en se basant sur des données estimées, sans tenir compte de contraintes relatives au temps de réponse.
- ✓ La phase réactive (la phase en ligne) qui a lieu pendant l'exécution de l'ordonnancement, calcule l'ordonnancement en temps réel en prenant en compte tout type d'incertitudes

pouvant surgir et l'apparition de différents événements. Les décisions de cette phase doivent être prises dynamiquement et avec un temps de réaction prédéfini.

La classification de référence des méthodes d'ordonnancement sous incertitudes a été proposée par Davenport et Beck [**Davenport 00**], et reprise dans d'autres travaux [**Billaut 05**], [**Pinot 08**], [**Ouelhadj 09**]... est maintenant la classification la plus utilisée dans la littérature, car ses catégories se distinguent essentiellement par les deux phases (hors-ligne et en-ligne) au cours desquelles les incertitudes sont prises en compte, et permet de couvrir les approches d'ordonnancement dans plusieurs types de problèmes incertains (ordonnancement de projet, ordonnancement d'atelier, ...), avec la possibilité de combiner les approches en-ligne et hors-ligne afin de tirer partie des avantages offerts par chacune d'entre elles. Cette classification comporte trois types d'approches : les approches proactives, les approches réactives et les approches proactives-réactives.

4.2.3.1 Les approches proactives

Les approches proactives tentent de prendre en compte l'incertain, lors de la formation de l'ordonnancement original prédictif calculé seulement durant la phase prédictive (hors ligne). Les incertitudes sont prises en compte a priori en utilisant par exemple la notion de scénarios, ou encore de données probabilistes avec la possibilité d'évaluation du comportement d'ordonnancement dans ces conditions prédits. Ces approches sont généralement adaptées aux modèles avec faible degré d'incertitudes.

Selon Pinot [**Pinot08**] une méthode proactive offre un certain nombre d'avantages, comme l'indépendance aux contraintes du temps de calcul ou de réponse, la possibilité de prédire le futur et d'analyser les performances de l'ordonnancement. En revanche, elle possède quelques inconvénients liés à la concentration du travail sur le modèle qui peut être faux ou pas assez précis, la possibilité que les incertitudes réelles s'éloignent trop de leur modélisation, la modélisation des incertitudes sans prendre en compte des événements réels...

En effet, si l'environnement de l'ordonnancement est très dynamique et les incertitudes réelles peuvent s'éloigner de leurs modèles, ces méthodes ne sont pas les plus appropriées.

4.2.3.2 Les approches réactives

Les approches réactives prennent les décisions face à l'occurrence des événements aléatoires au moment de l'exécution de l'ordonnancement. Cette réaction est basée sur les données mises à jour en fonction de l'état du système et ses performances ou sur l'ordonnancement prédictif existant. On peut ainsi distinguer deux types d'approches d'ordonnancement réactif :

- ✓ Les *approches dynamiques* ou les *approches totalement réactives* qui offrent la possibilité de construire l'ordonnancement et de palier aux incertitudes en temps réel, sans utilisation de l'ordonnancement initial généré pendant la phase prédictive. Ces méthodes sont souvent utilisées dans des environnements fortement perturbés, pour lesquels ils n'existe pas un ordonnancement de référence, ou il peut conduire à des solutions non réalisables ou de mauvaise qualité. Selon Pinot [**Pinot 08**] ces approches présentent plusieurs avantages dont le principal réside dans l'utilisation des données réelles, et non des données modélisées ou calculées pour prendre des décisions rapides, qui prennent en compte directement les incertitudes afin d'aboutir à un ordonnancement réalisable. Cependant, elles possèdent l'inconvénient de l'impossibilité de prédire l'ordonnancement et de prévoir ses performances. De plus, certaines contraintes telles que les dates dues impératives ne peuvent pas être prises en compte.

- ✓ Les *approches prédictives- réactives* qui sont souvent utilisées pour palier aux différents aléas, s'effectuent en deux phases (hors ligne et en ligne). Durant la première phase ou la phase prédictive, un ordonnancement initial est construit en ne considérant que les événements prévisibles. La deuxième phase ou la phase réactive consiste à effectuer des ré-ordonnements, afin d'améliorer l'ordonnement statique existant pour qu'il puisse prendre en considération le nouvel état du système et la présence de différentes incertitudes. Ces approches diffèrent entre elles sur la base de deux questions Quand réordonner ? et Comment réordonner ?

En effet, il existe plusieurs moments et stratégies de ré-ordonnement [Ouelhadj 09], [Aytug 05]. Il peut s'effectuer d'une façon périodique ou à des intervalles de temps réguliers, d'une façon continue lorsqu'un nouveau ordonnancement est calculé à chaque occurrence d'un aléa, ou d'une façon hybride lorsque le ré-ordonnement intervient périodiquement ou suite à l'occurrence d'un événement. En outre, plusieurs algorithmes de ré-ordonnement ont été proposés, par exemple, ils ont été classés dans [Ouelhadj 09] en deux catégories. La réparation de l'ordonnement (scheduling repair) qui consiste à effectuer un ajustement local de l'ordonnement courant. Le ré-ordonnement complet consiste à considérer les opérations non encore exécutées et à construire un nouvel ordonnancement en tenant compte de l'état de l'atelier...

4.2.3.3 Les approches proactives- réactives

Une approche proactive- réactive traite les problèmes d'ordonnement sous incertitudes en combinant les deux approches précédentes de manière non triviale. Dans un premier temps, elle inclut une partie qui prend en compte certains événements, pour construire un ensemble d'ordonnements statiques de façon qu'il soit possible de passer de l'un à l'autre, en cas de présences d'aléas. Ensuite durant la phase réactive, ces ordonnancements sont adaptés en-ligne en fonction de l'état du système, grâce à un algorithme dynamique qui permet d'évaluer ces solutions possibles et de choisir la plus appropriée, sans effectuer aucun ré-ordonnement en temps réel. Ces approches tirent partie des avantages des approches proactives en offrant la possibilité de la prédiction, l'évaluation de solutions, l'exploitation des connaissances à priori des perturbations..., et ceux des approches réactives en permettant de gérer les incertitudes, réagir face aux événements imprévisibles...

4.3.Un algorithme de ré-ordonnement en temps réel basé sur les essais particuliers

Les décisions de routages des pièces sont toujours prises à l'aide d'un algorithme discret à base des essais particuliers, mais cette fois il intègre un mécanisme de ré-ordonnement en temps réel. Ceci consiste à réparer la séquence de routages des pièces qui sont à l'intérieur du système, à chaque fois qu'un nouveau ordre de fabrication arrive au système, afin de pouvoir faire face aux nouveaux changements de l'environnement, et de prendre en compte l'état actuel du système avec présence des incertitudes externes liées à la variété des commandes, et internes relatives aux pannes de machines et variations de durées opératoires, et ainsi éviter ou minimiser leurs conséquences sur les performances du système.

La présente section s'intéresse à la présentation de l'algorithme proposé pour la sélection de routages des pièces en permettant de modifier en ligne l'ordonnement initial. Tout d'abord, elle met en évidence l'intérêt de mettre à jour en temps réel les routages de certaines pièces et présente la stratégie de ré-ordonnement, en décrivant quand et comment ré-ordonner. Ensuite, elle décrit comment un algorithme à base des essais particuliers a été adapté au problème posé.

4.3.1 Une stratégie de ré-ordonnement en temps réel pour la sélection de routages des pièces

La proposition concernant les décisions de routages des pièces basées sur les métaheuristiques, présentée dans le chapitre précédent a été implémentée dans le but de la réduction de la congestion dans le système, par la recherche d'une ou plusieurs solutions permettant l'équilibre des charges affectées aux différents centres d'usinage, qui forment plusieurs routages pour éviter les goulets d'étranglement, afin de diminuer les inter-blocages dans le système... La minimisation de ces problèmes peut améliorer les performances du système en termes de la productivité, du taux d'utilisation des machines, et du système de transport, et permet de palier aux différentes difficultés telles que le changement rapide de la demande, l'entrée aléatoire de nouveaux produits à usiner dynamiquement et de façon continue..., qui influent sur la limite de surcharge du système et ses performances.

Bien qu'une ressource additionnelle pour absorber cette charge de travail ne soit pas toujours disponible et la dépendance des machines qui rend la probabilité, d'éviter ces problèmes par le transfert de la charge de travail d'une ressource congestionnée à une autre moins encombrée, faible. Nous avons proposé une autre manière de répartition de la quantité de travail basée sur celles des routages, qui offrent une vision globale du système au lieu de se concentrer sur une région locale du système.

L'implémentation de ce concept a été basée sur les premières pièces existantes dans la file des ordres. En effet, à chaque nouvelle entrée d'une pièce au système, seulement, les routages de ces pièces sont modifiés selon le principe de la métaheuristique utilisée. En outre, le processus affecte la pièce qui entre dans la station de chargement à un routage selon son type et l'état actuel du système. Mais, des qu'elle est dans la station de chargement, on ne peut pas changer son routage malgré que l'état du système peut changer, avant qu'elle passe à la première machine de son routage choisi, ce qui va influencer sur les performances du système de production.

En plus, le passage de chaque pièce de la station de chargement au système est conditionné par la présence d'une place libre dans la première machine de son routage. Donc, elle peut rester en attente pendant une longue période de temps, surtout en cas de saturation. En outre, avant son entrée au système, l'atelier peut être soumis à un certain nombre d'incertitudes ou à des trous dans l'ordonnement prévu, qui dégradent les performances prédites. Pour cela, il paraît avantageux de considérer toutes ces situations dans le processus décisionnel de routages des pièces, en prenant en compte toutes les pièces existantes à l'intérieur du système qui vont se déplacer après une courte période, et celles dont le déplacement peut aboutir à une situation d'inter-blocage, ou à une impasse qui retarde la circulation de pièces ... Ces pièces sont les pièces existantes dans la station de chargement et dans les tampons de sortie de différentes machines, ainsi que les pièces qui sont en cours de traitements au niveau de machines, et qui sont prévus d'être terminés dans quelques minutes...

Puisque les décisions sont en fonction des quantités des travaux des routages évaluées en termes de temps opératoire, le plan de production peut être perturbé en retardant ou en avançant par exemples quelques opérations, lorsque ces temps ne sont pas déterministes, et peuvent subir des variations imprévisibles durant son exécution. À cet effet, il est nécessaire de contrôler le chemin d'une pièce non seulement lorsqu'elle est en attente de lancement de la production, mais à chaque

pas de son parcourt guidé par la charge du système, qui est susceptible de changer dynamiquement et à très court terme.

L'idée consiste à intégrer avec le processus de sélection de routages des premières pièces qui attendent l'entrée au système, une stratégie de ré-ordonnement ou de réaffectation des routages aux pièces, dont le déplacement d'un centre d'usinage à un autre peut influencer les performances des systèmes (les pièces contenues dans la station de chargement, dans les tampons de sortie des différentes machines et dont le traitement aux niveaux des machines va être achevé dans quelques instants...), à chaque fois qu'une nouvelle pièce entre dans le système pour le traitement. Ces procédures s'exécutent d'une façon simultanée, en fonction de l'état actuel du système évalué par les quantités de travail des différents routages, afin de pouvoir mettre à jour la répartition de charges, à chaque occurrence d'un événement présenté par l'arrivée d'un nouveau ordre de fabrication, qui augmente la surcharge du système ce qui le rend exigeant d'une réponse immédiate.

Ce type de ré-ordonnement qui n'a lieu que lorsqu'une déviation des performances conséquentes peut être détectée en raison de l'ajout d'un nouveau travail a été adopté, car si l'ordonnement est recalculée tout le temps pour réagir à n'importe quel événement bien qu'il ne soit pas critique, on risque d'augmenter le temps de calcul sans améliorer la qualité de l'ordonnement initial. En outre, s'il est calculé périodiquement pour minimiser le temps de calcul, il peut ignorer les perturbations importantes qui surgissent entre deux instants de ré-ordonnement. De plus, il a été intégré avec l'ordonnement de départ afin de pouvoir améliorer la qualité de solutions trouvées, en permettant de prévoir les performances du système et en considérant tous les déplacements des pièces d'une machine à une autre, qui vont avoir lieu dans le futur proche, et aussi les pièces qui vont passer au traitement après la première pièce de la file des ordres.

Les figures 4.1 et 4.2 présentent respectivement un exemple d'une séquence de pièces qui regroupe deux pièces contenues dans la file infinie, une troisième au niveau de la station de chargement, et les autres stockées dans les différentes files de sortie des machines, ou en fin de traitement, et un exemple d'une solution correspondante (les routages sélectionnés pour ces pièces). Dans chaque figure, la séquence est représentée sous forme de deux lignes, dont la première indique l'ordre de la prochaine opération à réaliser pour chaque pièce, ce qui permet d'identifier la position de sa prochaine machine, qui ne sera pas mise à jour avant que le traitement dans cet endroit soit achevé, malgré que son routage puisse être changé.

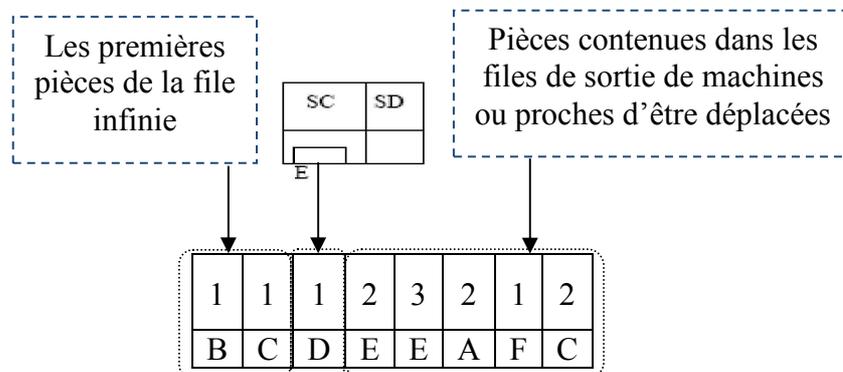


Figure 4.1 : Un exemple d'une séquence de pièces

1	1	1	2	3	2	1	2
5	10	13	21	27	4	30	11

Figure 4.2 : Un exemple d'une solution

Cette stratégie permet de réparer les décisions de routages de pièces sur une période de temps, la plus réduite possible, en prenant en compte les différents déplacements des pièces qui sont généralement dépendants entre eux, car le déplacement de chaque pièce est conditionné par la présence d'une place libre, et pour qu'il soit rapide il faut que la place destination soit vidée rapidement. De cette façon, la séquence des pièces choisie permet de garantir que ces pièces suivent des routages différents, ce qui permet de minimiser les impasses dans le système, donner une grande liberté au traitement des pièces et d'éviter les déplacements causés par les mauvaises décisions de routages, qui mènent à des mauvaises répartitions de charges de travail entre les différents machines identiques.

Par conséquent, on peut tirer les avantages offerts par l'algorithme proposé sans ré-ordonnement. Contrairement, à plusieurs algorithmes réactifs qui suivent les événements et réagissent, en construisant une solution au fur et à mesure de la réception des informations concernant les aléas sans pouvoir évaluer leurs performances, les approches proposées permettant de construire un ensemble de scénarios parallèles à l'aide des métaheuristiques, et de proposer un ensemble de solutions en se basant sur l'état et les contraintes du système, les hypothèses concernant les événements qui vont avoir lieu dans le futur proche et en utilisant des connaissances, à priori, sur les performances de chaque solution en vue de choisir la meilleure. Il est donc possible de prédire le futur et d'obtenir une prévision de la performance de l'ordonnement. En plus, une procédure réactive basée sur des données concernant l'état du système acquises en temps réel a été ajoutée, pour réviser rapidement l'ordonnement perturbé afin de réagir aux événements inattendus qui peuvent apparaître.

4.3.2 L'adaptation d'un algorithme OEP pour le ré-ordonnement en temps réel

L'OEP a été conçue pour fonctionner dans des espaces en variables continues. Mais, malgré son jeune âge par rapport à plusieurs métaheuristiques, elle possède différentes variantes dans les autres domaines discrets ou hybrides. Dans ce qui suit, un intérêt particulier est toujours donné à un algorithme OEP discret qui utilise les opérateurs évolutionnaires adaptés pour les problèmes combinatoires comme notre problème, à variables entiers de sélection de routages des pièces. Cet algorithme se base toujours sur la coopération des particules afin de faire évoluer chacune qui semble bien adaptée à notre problématique de routages des pièces avec adaptation à des conditions changeantes de l'environnement et à des événements qui peuvent surgir au niveau du système en proposant une approche d'ordonnement et ré-ordonnement intégrées basées sur la collaboration entre les particules dont chacune présente un scénario indépendant construit en prenant en compte l'état et les contraintes du système, les hypothèses concernant les événements qui vont surgir dans le futur proche... et décrit les routages des pièces contenus dans la file infinie qui vont dans le futur proche passer au système et la mise à jour des routages de pièces qui sont au cours de traitement et vont être transférées dans une courte période en fonction du nouveau état du système.

Puisque ces processus s'effectuent selon le principe de fonctionnement de la métaheuristique étudiée, la conversion de son algorithme de base vise toujours à créer une structure relative à notre problème de particules qui seront mises à jour à chaque itération selon une démarche adaptée à leurs configurations en prenant en considération leurs compositions en termes de nombre de pièces qui change selon l'état du système. L'évolution de la structure de l'essaim, le comportement adopté par chaque particule et les diverses caractéristiques de cet algorithme sont comme suit :

- ✓ La structure de la particule : la population est construite d'un certain nombre de particules dont chacune est représentée sous forme de permutation avec répétition qui permet de coder directement une solution qui décrit les routages sélectionnés pour les premières pièces de la file infinie, les pièces contenues dans la station de chargement, les pièces en cours de traitement stockées dans les files de sorties de machines ou elles vont être transférées à une de ces files dans quelques instants. La représentation d'une particule est illustrée par le schéma de la Figure 4.2.
Chaque particule est composée de trois parties. Les deux premières dont les tailles sont fixes concernent respectivement les pièces contenues dans la file des ordres et la station de chargement. La troisième est réservée aux pièces dont les traitements sont déjà commencés. Ces pièces ont la particularité d'être déjà affectées à des routages, donc ils vont subir un processus de ré-ordonnement. Puisque le nombre de ces pièces change au cours du temps en fonction de l'état du système, la taille de cette partie évolue dynamiquement en fonction de ce nombre. Cette adaptation structurelle doit s'effectuer à chaque fois qu'une nouvelle pièce va entrer dans le système. D'où la nécessité d'intégrer au niveau de l'algorithme une procédure de construction qui permet de créer les particules qui composent la population et seront initialisées en affectant les routages aux pièces d'une façon aléatoire en respectant les contraintes présentées dans le tableau 3.1 afin de donner une diversité aux scénarios qui changent d'une itération à l'autre. La taille de population reste toujours un paramètre statique fixé par l'utilisateur.
- ✓ La fonction objectif : à chaque itération de l'algorithme, les particules qui représentent les scénarios décrivant les routages de pièces sont évaluées en terme de produit de quantités de travail de routages pour aboutir à une bonne répartition de charges à l'intérieur du système. Il est accepté que la quantité de travail d'un routage soit la somme des travaux requis pour les pièces qu'il comprend mesurés en termes de temps opératoire restant dans la machine courante ou celui dans la machine suivante si la pièce est en fin de traitement ou dans une file de sortie de sa machine actuelle. Pour déterminer ce temps prévu qui doit être effectué sur la machine suivante, une variable est associée à la pièce qui représente sa position dans le routage. Si ce routage est susceptible de changer ce temps sera calculé par rapport à la machine qui occupe cette position dans le nouveau routage.
- ✓ Le critère d'arrêt : notre algorithme itère jusqu'à ce que le nombre d'itérations atteigne une valeur maximale fixe. Ce critère est choisi pour limiter le temps d'exécution de l'algorithme indépendamment de la fonction objectif ou de la structure de l'essaim qui change au cours du temps.
- ✓ La mise à jour de la particule : l'évolution de la particule doit prendre en compte les deux types d'opérations effectuées simultanément : l'affectation des pièces existantes dans la file des ordres et le ré-ordonnement de celles contenues à l'intérieur du système et vont être déplacées dans une courte période. Le fonctionnement de cet évolution est semblable à celui de l'OEP proposé pour la sélection de routages alternatifs et présenté dans le chapitre précédent basé sur l'utilisation des opérateurs de mutation et de croisement utilisés pour la mise à jour de chaque particule présentée sous forme d'un vecteur en nombres entiers, en fonction de sa position actuelle, sa meilleure solution et la meilleure solution obtenue par le groupe en utilisant la formule proposée par Pan et al. [Pan 05], [Pan 08a], mais ici nous intégrons la réaffectation des routages aux pièces qui sont à l'intérieur du système dont le

nombre varie au cours du temps dans un contexte où les incertitudes portent sur les durées d'exécution des travaux, la variété des demandes, les pannes de machines...

En plus de la taille de la particule dynamique, la seconde manière d'adapter le comportement de l'essaim à ces événements est de proposer différentes stratégies de déplacement des particules qui prennent en compte tous ces changements en considérant l'influence de la capacité de la particule d'exploration assurée par l'opérateur de mutation et son attirance par le best local et le best global décrite par les opérateurs de croisement.

L'opérateur de mutation consiste à modifier un ou plusieurs routages de certaines pièces constituant la solution d'une façon aléatoire en respectant les contraintes présentées dans le tableau 3.1 afin de garantir la faisabilité de la solution, le nombre de modifications ne dépasse pas la moitié de la taille de la particule pour maintenir la stabilité de la solution. Les pièces concernées par cette opération sont des pièces contenues dans toutes les parties de la particule pour garantir la mise à jour de l'affectation des routages de pièces qui attendent le traitement et le ré-ordonnancement des pièces qui sont à l'intérieur du système afin de construire un scénario différent et de mieux explorer l'espace de recherche. Un exemple de la mutation est donné dans la figure 4.3.

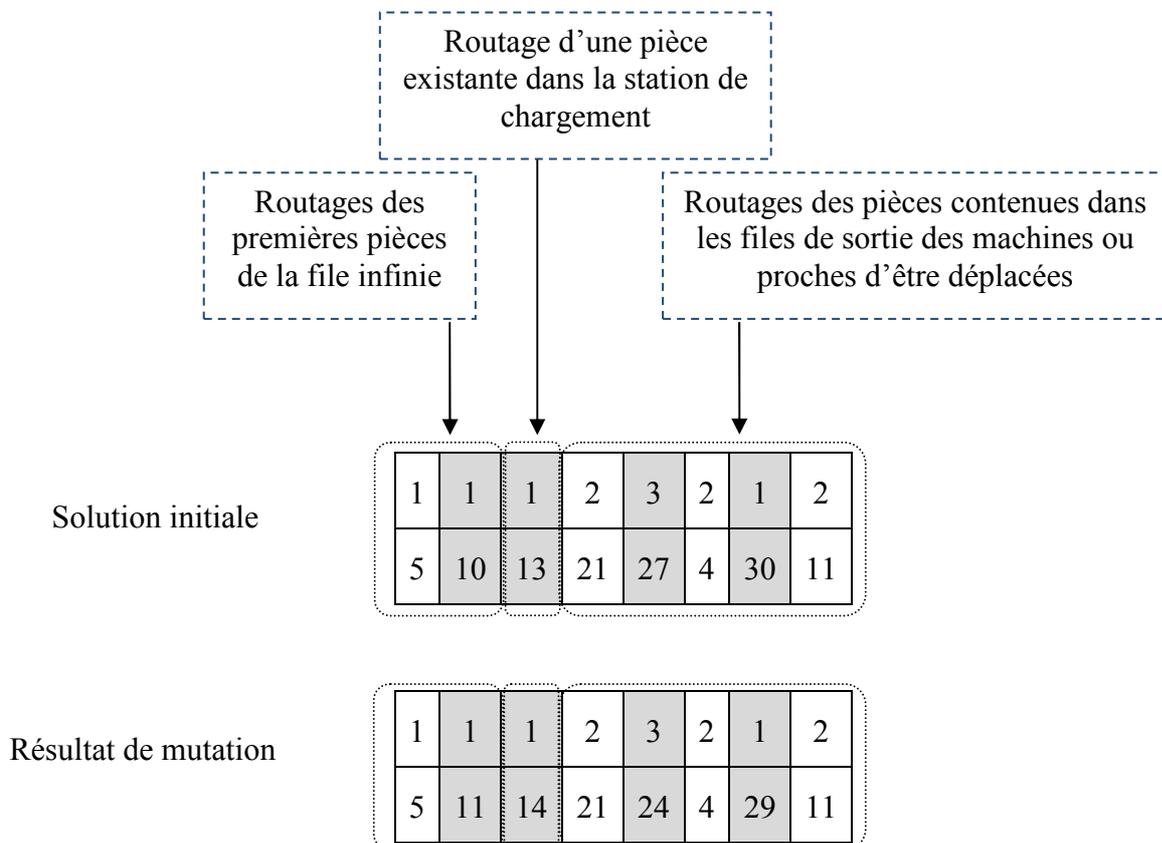


Figure 4.3 : Exemple d'une mutation

Les opérateurs de croisement avec le best local ou global sont appliqués pour rapprocher la particule de sa meilleure solution ou celle du groupe. Chacun d'entre eux consiste à combiner deux individus parents qui sont la particule et le best local ou global de la particule afin d'aboutir à une autre particule, en utilisant un point de coupure choisi au hasard pour chaque partie (la partie des premières pièces de la file infinie, les pièces de la station de chargement et les autres pièces qui vont être déplacées), en divisant chaque partie et son équivalent dans le best local ou global en deux sous-parties à la même position, puis en recopiant la sous-partie droite de la partie du best local ou global dans sa sous-partie équivalente de la particule. La figure 4.2 présente un exemple illustratif de ce type de

croisement, où les vecteurs (10), (13), et (3, 30, 11) qui représentent les sous-parties droites des trois points de coupures dans le best local ou global sont copiées dans leurs positions équivalentes dans la particule.

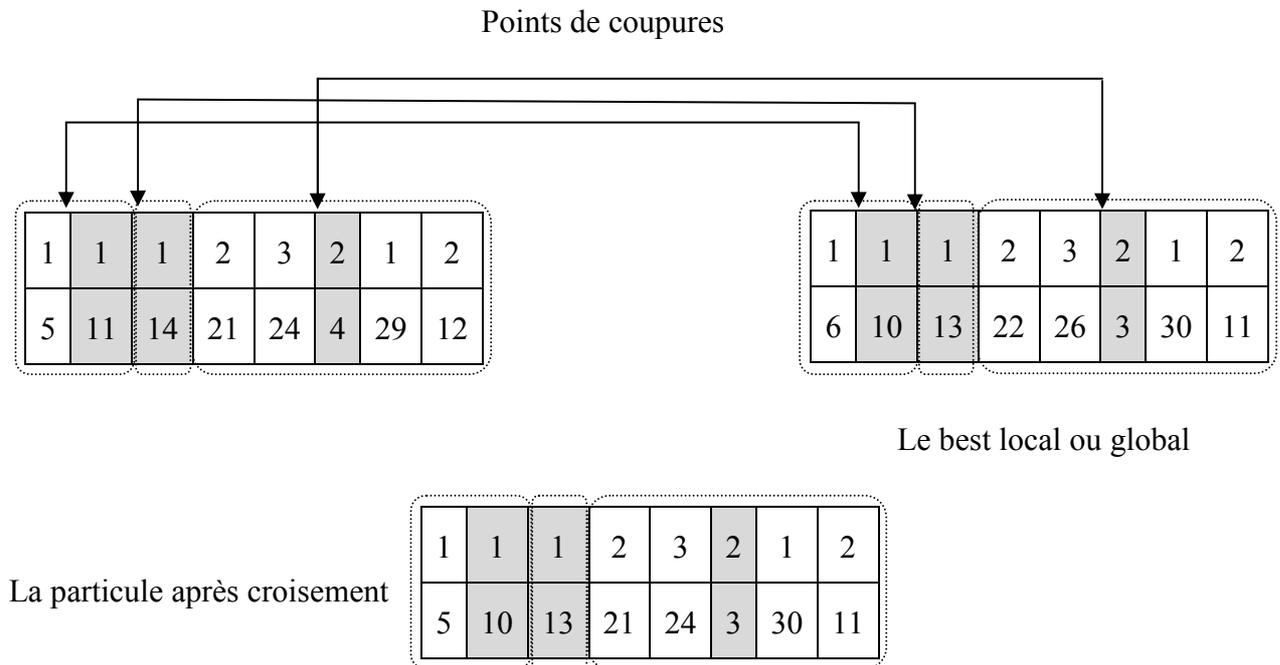


Figure 4.3 : Exemple d'un croisement

4.4. Analyse de sensibilité de l'algorithme OEP proposé

Cette section met l'accent sur l'analyse de la sensibilité de l'algorithme OEP proposé, pour la prise et la réparation des décisions de routages de la variation de ses paramètres, en gardant la configuration de l'atelier fixe et en variant leurs valeurs et les données d'entrée du FMS. Cette étude a pour but d'avoir une idée sur l'influence de la structure de l'essaim définie par la taille de la population, et les différents paramètres qui contrôlent le comportement de l'essaim au cours du déplacement de chaque particule sur les performances de notre système.

Cette étude expérimentale jugée par les mêmes indicateurs de performances utilisés précédemment, comprend deux analyses, la première s'intéresse à l'impact de la taille de la population, et la deuxième est consacrée à l'influence des paramètres comportementaux w , C_1 et C_2 , qui contrôlent respectivement la confiance de la particule à sa position actuelle, et son attirance par sa meilleure position ou celle de l'essaim.

4.4.1 L'effet de la taille de la population

La taille de la population est un paramètre important dans la conception des métaheuristiques à base d'un ensemble de solutions, car elle influe sur le temps de calcul et l'espace mémoire si elle augmente. Par contre, on risque de dégrader les performances d'exploration de l'espace de recherche si elle est très petite.

En raison de son importance et afin de trouver ses valeurs qui conduisent à obtenir des solutions de qualité satisfaisante, la présente partie est une analyse empirique pour évaluer les performances de l'algorithme en fonction de sa variation lorsque le système est soumis à plusieurs

sources d'incertitudes, telles que la variation de la demande de fabrication décrite par le pourcentage présenté dans le tableau 3.1, et de la durée opératoire. Celle ci modélisée par une lois exponentielle, souvent utilisée dans plusieurs types d'ateliers comme les machines parallèles [Nouri 12], le flow shop [Kamburowski 00], [Gourgand 03], le job shop [Horng 12], [Lei 11], une machine unique [Cai 07]... Pour y arriver, plusieurs études en simulation ont été réalisées avec des variations des niveaux de surcharge du système, en terme du taux d'arrivée de pièces à la file des ordres et de la taille de la population, dont les valeurs choisies sont 2, 4, 8 et 16 en fixant les valeurs de w , C_1 , C_2 à 0.5.

La méthode d'analyse statistique (ANOVA) a été utilisée afin de pouvoir étudier l'effet des facteurs expérimentaux, avec l'utilisation de deux facteurs qui représentent la taille de la population (1) et l'état du système (2) caractérisé par les différents taux d'arrivée de pièces qui décrivent les niveaux de la surcharge du système et varient de 1/20 à 1/5, tous les tests ont été effectués à un niveau de signification de 5%.

Tableau 4.1 : Les valeurs F pour les mesures de performances concernant les effets taille de la population, état du système et leur interaction

Présence de pannes	Les effets	Le taux de production	Le taux d'utilisation des machines T	Le taux d'utilisation du système de transport	Les en-cours	Le temps de cycle	Le point critique
Sans	1	51,14	685,32	61,05	2,27	2,39	2,67
	2	542198,77	1,27	0,16	1,13	0,29	2,67
	Interaction	3	0,73	0,52	0,24	1,5	1,95
Avec	1	42,69	226,55	54,08	1,11	0,49	2,67
	2	510739,57	1,73	0,27	1,78	0,49	2,67
	Interaction	4,5	1,33	1,90	0,39	0,48	1,95

Le tableau 4.1 présente les différentes valeurs statistiques de F pour le taux de production, le taux d'utilisation des machines T et de l'AGV, les en-cours et le temps de cycle obtenues pour les effets taille de la population, état du système et leur interaction, lors de l'utilisation de l'algorithme qui intègre le ré-ordonnement de pièces en cours de traitement. Ce tableau montre que les valeurs F statistiques concernant le taux de production, d'utilisation des machines et de l'AGV sont supérieures à leurs points critiques pour l'effet taille de la population. En revanche, elles ne sont pas significatives pour l'effet état du système et l'interaction entre les deux effets, sauf pour le taux de production car la variation de la durée entre deux arrivées de pièces influe sur le nombre des pièces à usiner. À cet effet, on peut conclure que la variation de la taille de la population a une influence significative sur les performances du système évaluées par ces trois indicateurs de performances.

Puisque les valeurs statistiques de F sont inférieures aux points critiques pour le temps de cycle et les en-cours, on peut dire que la variation de la taille de population n'a aucun impact significatif sur ces deux mesures.

La méthode least significant difference (LSD) est aussi utilisée pour déterminer les moyennes qui sont différentes des autres, en effectuant les différentes comparaisons multiples entre les différentes valeurs liées au facteur taille de la population.

Tableau 4.2 : Les résultats concernant l'effet de la taille de population sur le taux de production, le taux d'utilisation des machines T et de l'AGV

Scénario	Sans présence de pannes			Avec présence de pannes		
	Le taux de production	Le taux d'utilisation des machines T	Le taux d'utilisation du système de transport	Le taux de production	Le taux d'utilisation des machines T	Le taux d'utilisation du système de transport
16	60,06 a	97,55 a	33,26 a	58,74 ab	95,54 a	32,52 a
8	60,05 a	97,54 ab	33,24 ab	58,82 a	95,54 a	32,55 a
4	59,95 a	97,5 b	33,19 b	58,69 b	95,49 a	32,51 a
2	59,43 b	96,54 c	32,9 c	58,21 c	94,50 b	32,21 b

Les résultats obtenus pour le taux de production, le taux d'utilisation des machines T et du système de transport, lors de l'utilisation de l'algorithme qui intègre le ré-ordonnement de pièces, sont présentés dans le tableau 4.2. De ce tableau, on peut remarquer que deux groupes sont formés pour le taux de production pour le cas sans pannes, et le taux d'utilisation des machines et du système de transport lorsque les pannes sont prises en compte. En outre, trois groupes sont formés pour les autres analyses. En plus, il est aussi observé que les tailles 8 et 16 correspondent toujours aux meilleures performances jugées par ces trois indicateurs. Les mauvaises valeurs ont été obtenues pour une taille de file d'attente égale à 2. Ces augmentations lorsque la taille de la population est supérieure ou égale à 8, peuvent être dues par le fait que cette taille de population est assez suffisante pour bien explorer l'espace de solutions, et obtenir des résultats de qualité satisfaisante.

4.4.2 L'effet du facteur d'inertie w et les coefficients de confiance C_1 et C_2

Cette partie met l'accent sur l'effet des paramètres comportementaux sur les performances de l'algorithme OEP proposé, pour l'affectation et la réaffectation en temps réel des routages de pièces dans un système incertain et saturé. En effet, elle présente quelques résultats et leurs interprétations obtenues après plusieurs études en simulation effectuées dans les mêmes conditions de l'étude précédente, mais, en variant les valeurs des paramètres qui contrôlent la stratégie de l'exploration adoptée par l'essai.

Ces valeurs ont été fixées à (1, 1, 1), (0,5, 0,5, 0,5) et (0,1, 0,1, 0,1), pour représenter le cas, où il y'a un compromis entre les trois composantes comportementales, qui influencent le déplacement de chaque particule. En plus, afin d'analyser l'importance d'une seule composante (la composante physique, la composante cognitive et la composante sociale), ces paramètres ont été testés aux valeurs (1, 0,1, 0,1), (0,1, 1, 0,1) et (0,1, 0,1, 1). La taille de la population est fixée à 8 pour tester l'influence des paramètres étudiés, lorsque l'essaim est d'une taille supposée suffisante pour un bon parcours de l'espace de solutions. Cette valeur a été aussi choisie au lieu de 16 pour optimiser les performances en terme du temps de calcul et espace mémoire.

Dans cette étude, les résultats ont été soumis à une analyse statistique ANOVA avec deux facteurs (les paramètres comportementaux (1) fixés aux six niveaux décrits précédemment et l'état du système (2)), tous les tests ont été effectués à un niveau de signification $\alpha=0.05$. Les différentes valeurs statistiques de F obtenus par l'analyse ANOVA concernant les différents indicateurs de performances considérés lors de l'utilisation de l'algorithme qui intègre le ré-ordonnement de pièces, sont présentées dans le tableau 4.3.

Tableau 4.3 : Les valeurs F pour les mesures de performances concernant les effets paramètres comportementaux, état du système et leur interaction

Présence de pannes	Les effets	Le taux de production	Le taux d'utilisation des machines T	Le taux d'utilisation du système de transport	Les en-cours	Le temps de cycle	Le point critique
Sans	1	1,26	0,82	0,9	0,74	1,67	2,26
	2	54340,89	0,96	0,84	0,97	0,83	2,65
	Interaction	1,22	1,01	1,01	0,74	0,77	1,71
Avec	1	1,31	0,96	1,1	2,84	1,09	2,26
	2	13981,88	0,99	1,01	1,51	0,88	2,65
	Interaction	1,02	0,99	1	0,49	1,47	1,71

De ce tableau, on peut observer que F statistique concernant les différents indicateurs de performance n'a pas de valeurs significatives pour les effets considérés état du système, paramètres comportementaux et l'interaction entre les deux, sauf pour l'impact de l'état du système sur le taux de production, et l'influence sur les en-cours par la variation des paramètres w , C_1 et C_2 , lorsque les pannes sont prises en compte.

Tableau 4.4 : Les résultats concernant l'effet des paramètres comportementaux sur les en-cours

Scénario	Avec présence de pannes
Les paramètres comportementaux	Les en-cours
(1, 1, 1)	8,38 a
(0,1, 1, 0,1)	8,23 ab
(0,1, 0,1, 1)	8,21 ab
(1, 0,1, 0,1)	8,13 b
(0,1, 0,1, 0,1)	8,11 b
(0,5, 0,5, 0,5)	8,09 b

Puisque, l'impact de la variation du comportement de l'essaim sur les en-cours en présence de pannes est trouvé significatif, la méthode (LSD) est utilisée afin d'effectuer les différentes comparaisons multiples. Les résultats concernant cet indicateur, obtenues dans les différents niveaux de ces paramètres sont présentés dans le tableau 4.4.

On peut remarquer que deux groupes sont formés a et b, d'où l'existence des différences significatives entre certains niveaux comme (1, 1, 1) et (0,5, 0,5, 0,5). De cette analyse, on peut dire qu'il est recommandé de prendre le niveau (0,5, 0,5, 0,5) comme valeurs des paramètres comportementaux, afin de conduire à maintenir les performances de l'algorithme élevées sans une dégradation des performances liées aux en-cours en cas de présence de pannes.

4.5.Vérification de l'efficacité de l'approche proposée dans un contexte incertain

Afin de vérifier l'efficacité de l'approche proposée pour les décisions de routages de pièces, qui intègre simultanément la sélection de routages et la réaffectation dynamique de ces routages aux pièces, nous avons effectué plusieurs études en simulation avec des variations sur le taux d'arrivée

de pièces à la file infinie. Le système est toujours supposé en état de saturation avec les contraintes présentées dans la section 3.2, et en présence d'autres incertitudes sur les temps opératoires modélisées par une distribution exponentielle. Cette loi est souvent utilisée pour décrire les situations réelles qui s'éloignent trop de leur modélisation prévue, ce qui permet de tester l'aptitude de l'algorithme dans des environnements fortement perturbés.

Cette analyse de l'efficacité est basée sur les performances de l'algorithme à base d'essais particuliers décrit dans le chapitre précédent, dont l'efficacité a été démontrée dans [Souier 10b] par rapport à d'autres métaheuristiques (les colonies de fourmis, la recherche taboue, le recuit simulé et l'électromagnétisme) et les heuristiques DMM [Saygin 04] et DMM modifiée [Hassam 10]. Une autre base de test d'efficacité de l'approche proposée est présentée par un autre algorithme à base d'OEP [Souier 12b], qui intègre un mécanisme de ré-ordonnement des pièces de la station de chargement dont le nombre est supposée fixe. En revanche, les études précédentes ont été effectuées avec des hypothèses de déterminisme du temps opératoire.

Cette section présente certains résultats trouvés lorsque la taille de la population vaut 16 pour l'algorithme sans ré-ordonnement et avec ré-ordonnement de la station de chargement, et 8 pour l'algorithme avec ré-ordonnement des pièces en cours de traitement. En outre, les paramètres w , C_1 , et C_2 sont fixés à la valeur 0.5. Ces valeurs ont été prises car il a été démontré dans les études précédentes effectuées afin de déterminer le meilleur paramétrage à adopter, que ces valeurs conduisent à des résultats de qualité satisfaisante.

Tableau 4.5 : Les valeurs F pour les mesures de performances concernant les effets politique de sélection de routages, état du système et leur interaction

Présence de pannes	Les effets	Le taux de production	Le taux d'utilisation des machines T	Le taux d'utilisation du système de transport	Les en-cours	Le temps de cycle	Le point critique
Sans	1	8738,53	18662,66	7485,77	614,08	2,13	3,08
	2	356338,28	0,31	0,06	0,37	1,03	2,69
	Interaction	596,71	0,79	1,45	0,42	0,42	2,18
Avec	1	6205,89	19045,43	7473,49	1015,22	5,17	3,08
	2	222675,3	1,31	0,87	2,07	0,90	2,69
	Interaction	438,05	1,53	1,04	1,69	0,81	2,18

Dans cette étude, nous avons utilisé la méthode d'analyse statistique ANOVA avec deux facteurs, qui nous paraissent maîtrisables et peuvent influencer sur les conditions et les résultats de l'expérimentation. Le premier facteur est la politique de sélection de routage (1) qui peut être soit l'algorithme OEP sans ré-ordonnement, l'algorithme proposé avec la permission du ré-ordonnement du contenu de la station de chargement (Reordo_pièces_station_chargement), ou l'algorithme qui intègre la sélection de routages et le re-ordonnement de pièces qui sont au cours de traitement (Reordo_pièces_en_cours). Le second facteur est l'état du système (2) qui correspond aux différents niveaux de surcharge contrôlés par la variation du taux d'arrivée de pièces, tous les tests ont été effectués à un niveau de signification de 5%.

Le tableau 4.5 présente les différentes valeurs statistiques de F pour les différentes mesures de performances obtenues, pour les effets : politique de sélection de routages, état du système et leur

interaction. De ce tableau, il est clair que la valeur F statistique est supérieure à son point critique pour l'effet politique de sélection de routages, sauf pour le temps de cycle évalué sans présence de pannes. Mais, elle n'a pas de valeurs significatives pour les autres effets, sauf pour le taux de production. Ces résultats ne sont pas étonnants, car l'introduction des mécanismes de correction de l'ordonnancement initial en cas de changement de son environnement souvent incertain peut affecter les performances du système. D'où l'impact qui a été trouvé significatif de la stratégie de routage de pièces sur ces performances, qui sera vérifié en détail en utilisant la méthode LSD utilisée pour déterminer la stratégie la plus efficace, qui maintient les performances du système élevées malgré l'occurrence des perturbations prises en compte dans cette étude.

Tableau 4.6 : Les résultats concernant l'effet de politiques de sélection de routages sur le taux de production, d'utilisation des machines T et de l'AGV

Scénario	Sans présence de pannes			Avec présence de pannes		
	Le taux de production	Le taux d'utilisation des machines T	Le taux d'utilisation du système de transport	Le taux de production	Le taux d'utilisation des machines T	Le taux d'utilisation du système de transport
Reordo_pièces_en_cours	60,05 a	97,54 a	33,24 a	58,82 a	95,54 a	32,55 a
Reordo_pièces_station_chargement	54,54 b	88,66 b	30,2 b	53,03 b	86,22 b	29,37 b
Sans reordonnement	52,50 c	85,33 c	29,07 c	51,01 c	82,99 c	28,25 c

Le tableau 4.6 illustre les résultats obtenus par la méthode LSD pour le taux de production, le taux d'utilisation des machines T et le taux d'utilisation du système de transport dans les deux scénarios avec et sans présence de pannes. Ce tableau montre que trois groupes sont formés de a à c. Donc, il y a des différences significatives dans le taux de production, le taux d'utilisation des machines T_1 ou T_2 , et le taux d'utilisation de l'AGV, entre les différentes politiques de sélection de routages adoptées. Ces résultats montrent aussi que les algorithmes avec ré-ordonnement sont plus performants que celui sans ré-ordonnement qui forme le groupe c, ce qui peut s'expliquer par la nécessité de réviser l'ordonnement initial proposé dans une situation susceptible de changer dynamiquement et à très court terme. Il est aussi observé que la politique, qui intègre la sélection de routage avec leur ré-ordonnement si elles vont être déplacées d'un endroit à un autre dans le futur proche, est une méthode prometteuse, qui permet d'obtenir de bonnes performances dans ce contexte, où le temps de traitement est soumis à des incertitudes même en cas de présence de pannes. Ces résultats encourageants montrent la capacité de cette approche, à absorber toutes ces incertitudes et les défaillances de l'ordonnement de départ, qui peut être perturbé rapidement à cause de la configuration du système, ses contraintes techniques...

Tableau 4.7 : L'effet de politiques de sélection de routages sur le temps de cycle et les en-cours

Présence de pannes	Avec	Sans	Avec
Politique de sélection de routages	Le temps de cycle	Les en-cours	Les en-cours
Reordo_pièces_en_cours	202,9 a	8,09 a	8,09 a
Reordo_pièces_station_chargement	200,9 a	7,18 b	7,16 b
Sans reordonnement	196,59 b	6,83 c	6,80 c

Les résultats concernant le temps de cycle en prenant en compte les pannes de machines, et les en-cours dans les deux scénarios avec et sans présence de pannes, obtenus par la méthode LSD sont présentés dans le tableau 4.7. Ceux du temps de cycle sont classés en deux groupes a et b. À cet effet, on peut dire que dans ce contexte caractérisé par des incertitudes liées aux pannes de machines, aux travaux, aux durées opératoires..., le changement de la stratégie de sélection de routage influe sur le temps de cycle. Ce tableau montre aussi que les politiques avec ré-ordonnement de pièces forment la classe a qui correspond au temps de cycle le plus élevé. En revanche, la stratégie sans ré-ordonnement conduit au meilleur temps de cycle. De ces observations, on peut dire que l'augmentation de la productivité du système et de son utilisation a influé négativement sur le temps de cycle, en raison des caractéristiques dynamiques de cet FMS, qui empêchent l'amélioration de ses critères de performances devenus contradictoires.

De ce tableau, il est observé que les en-cours sont classés en trois groupes ce qui explique la présence de grandes différences entre ces résultats. On peut aussi remarquer que l'intégration de mécanismes de ré-ordonnement des pièces conduit à une augmentation des en-cours, surtout en utilisant celui qui autorise la réaffectation de routages aux pièces au cours de traitement qui forme le groupe a. En effet, on peut dire que l'amélioration du taux de production et d'utilisation des différents équipements n'implique pas la réduction des en-cours, en raison de l'existence de plusieurs paramètres qui affectent les performances du système, et perturbe les différents plans décisionnels établis comme l'arrivée dynamique et continu de pièces, la variation du temps opératoire, les pannes de machines, la non disponibilité de l'AGV. En plus, cette augmentation peut être due à l'ouverture des impasses et la minimisation des inter-blocages par les différentes stratégies de ré-ordonnement adoptées.

4.6. Analyse de l'effet de l'interaction de l'approche proposée avec des règles de séquencement.

Cette section est consacrée à l'analyse de l'effet de l'interaction des décisions de routage des pièces prises à l'aide de l'approche basée sur les essais particuliers, qui intègre simultanément l'affectation et la réaffectation des routages aux pièces, avec celles de séquencement basées sur les règles de priorité. Ces approches sont reconnues comme des heuristiques réactives, permettant de gérer en temps réel l'ordre de passage de différentes activités existantes dans les files d'entrée des machines selon certain critère. Dans cette étude, nous nous sommes toujours intéressés à la règle FIFO et les règles SPT, LPT, STOT et LTOT présentées dans le chapitre précédent. Ces heuristiques utilisent le temps opératoire comme un critère de priorité. Puisque, il est supposé non déterministe dans notre contexte de travail, le fonctionnement de ces méthodes est basé sur la moyenne du temps de traitement supposée connue et définie pour chaque opération dans le tableau 3.1.

Pour y arriver, plusieurs simulations ont été effectuées dans les mêmes conditions décrites précédemment, et lorsque les paramètres de la métaheuristique étudiée prennent les valeurs qui mènent à des performances acceptables (la taille de la population = 8, w , C_1 , et C_2 prennent la valeur 0.5). Les résultats obtenus sont soumis à une analyse statistique ANOVA avec des tests effectués à un niveau de signification de 5%, et la prise en compte de deux facteurs (la politique de séquencement (1) et l'état du système (2)).

Tableau 4.8 : Les valeurs F concernant les mesures de performances pour les effets politique de séquençement, état du système et leur interaction

Présence de pannes	Les effets	Le taux de production	Le taux d'utilisation des machines T	Le taux d'utilisation du système de transport	Les en-cours	Le temps de cycle	Le point critique
Sans	1	17,00	154,81	21,04	0,36	0,62	2,42
	2	661754	0,17	0,32	2,17	0,11	2,65
	Interaction	1,23	0,83	0,64	0,38	2,04	1,81
Avec	1	18,29	61,86	24,83	0,17	1,65	2,42
	2	502653,11	0,22	1,01	3,67	0,19	2,65
	Interaction	2,19	1,63	1,52	0,12	0,69	1,81

Le tableau 4.8 présente les différentes valeurs statistiques de F concernant les différentes mesures de performances obtenues, pour les effets : politique de séquençement, état du système et leur interaction, lors de l'utilisation de l'algorithme qui intègre le ré-ordonnancement de pièces. De ces comparaisons, on peut remarquer que la valeur F statistique dépasse son point critique pour l'effet politique de séquençement de machines sur le taux de production, le taux d'utilisation des machines et de l'AGV. Cependant, elle n'a pas de valeurs significatives pour les autres effets sauf pour le taux de production, l'effet de l'état du système sur les en-cours lorsque les pannes sont prises en compte, et l'effet interaction sur le temps de cycle lorsqu'elles sont ignorées.

Puisque, l'effet le plus important dans cette étude est celui de la politique de séquençement, on ne prend en compte que les comparaisons qui le concernent. De ces études comparatives, on peut conclure que l'effet politique de séquençement a un impact significatif sur les performances du système évaluées en terme de taux de production, d'utilisation des machines et de l'AGV.

Tableau 4.9 : Les résultats concernant l'effet de règles de séquençement sur le taux de production, d'utilisation des machines T et de l'AGV

Scénario	Sans présence de pannes			Avec présence de pannes		
	Le taux de production	Le taux d'utilisation des machines T	Le taux d'utilisation du système de transport	Le taux de production	Le taux d'utilisation des machines T	Le taux d'utilisation du système de transport
SPT	60,23 a	97,85 a	33,35 a	59,07 a	95,85 a	32,71 a
STOT	60,15 ab	97,75 b	33,30 ab	58,85 b	95,74 b	32,59 b
FIFO	60,05 bc	97,54 c	33,24 bc	58,82 b	95,54 c	32,55 bc
LTOT	59,98 c	97,34 d	33,22 c	58,69 c	95,32 d	32,5 c
LPT	59,77 d	97,29 d	33,09 d	58,52 d	95,29 d	32,40 d

Le tableau 4.9 présente les résultats trouvés par la méthode LSD concernant le taux de production, le taux d'utilisation des machines T_1 et T_2 et le taux d'utilisation du système de transport. Tout d'abord, la répartition de ces résultats en quatre groupes pour chaque cas d'étude, montre l'existence de différences significatives entre les valeurs liées à ces indicateurs de performances. Ensuite, la combinaison avec la règle SPT qui correspond à la classe a est la plus

performante en terme de ces trois mesures de performance. En revanche, celle avec la règle LPT qui forme toujours le groupe d conduit aux plus mauvais résultats.

Cette augmentation, lorsque la règle SPT est utilisée pour le séquençement de machines, s’explique par la favorisation des pièces dont le temps opératoire moyen est minimal, au niveau de chaque file d’entrée d’une machine. Ceci permet d’accélérer leur passage au traitement qui va se terminer rapidement, et ainsi de libérer leurs places dont l’occupation peut provoquer des inter-blocages à court terme, ce qui a influé sur le nombre des pièces sorties du système, et son utilisation qui est fortement dépendante de la quantité de travail réalisé.

4.7. Analyse de l’effet de la combinaison avec des règles de lancement

Cette section met l’accent sur l’effet de l’interaction de l’approche proposée pour le routage de pièces et leur ré-ordonnement en cas de changement de l’état du système, avec les décisions de lancement de pièces, sur les performances du système étudié. Dans cette analyse, le système est supposé en état de saturation et les pièces contenues dans les files d’entrée de machines passent au traitement selon les ordres d’arrivée à ces files.

Les règles utilisées pour gérer la priorité des ordres de fabrication qui arrivent à la station de chargement du système, sont celles présentées dans le chapitre précédent. Elles sont la politique FIFO et les règles STOT, LTOT, SPT, LPT, qui classent ces ordres suivant le temps opératoire total ou celui au niveau de la première machine de chaque routage affecté à une pièce contenue dans la station de chargement. Dans notre FMS, les données concernant le temps de traitement ne sont pas connues à l’avance car il est supposé incertain. Pour faire face à cette situation, il peut être nécessaire d’assigner la priorité des ordres arrivant dans l’atelier, en fonction de sa valeur moyenne supposée prévisible et présentée dans le tableau 3.1.

Le reste de cette section est réservée à la présentation de certains résultats trouvés après plusieurs simulations, effectuées dans les mêmes conditions opératoires et paramètres de la métaheuristique étudiée, et sur la base des mêmes mesures de performances définies précédemment. La méthode d’analyse statistique ANOVA a été utilisée pour étudier à un niveau de signification de 5% l’effet des facteurs expérimentaux qui incluent la politique de lancement (1) qui peut être une des règles adoptées et l’état du système (2).

Tableau 4.10 : Les valeurs F concernant les mesures de performances pour les effets politique de lancement, état du système et leur interaction

Présence de pannes	Les effets	Le taux de production	Le taux d’utilisation des machines T	Le taux d’utilisation du système de transport	Les en-cours	Le temps de cycle	Le point critique
Sans	1	11,81	128,47	14,22	3,31	3,47	2,42
	2	586658,35	0,98	1,4	1,31	2,91	2,65
	Interaction	1,11	1,02	0,55	0,36	1,09	1,81
Avec	1	15,41	161	30,71	2,34	6,77	2,42
	2	518971,8	54,99	12,12	1	0,85	2,65
	Interaction	2,93	74,78	11,37	0,16	1,35	1,81

Le tableau 4.10 montre les différentes valeurs statistiques de F pour les mesures de performance prises en compte dans les deux scénarios sans et avec présence de pannes. De ce tableau, on peut remarquer que la valeur F statistique est supérieure à son point critique pour l'effet politique de lancement de pièces évalué en termes des différents indicateurs de performance, sauf qu'elle n'a pas de valeurs significatives pour les en-cours en cas de présence de pannes. Par conclusion, on peut dire que les règles de lancement dont l'effet fait l'objet de cette étude, ont un impact significatif sur les performances du système.

Il est aussi noté que les autres effets ont des influences importantes sur quelques mesures, comme celui de l'état du système sur le taux de production. Il influe aussi sur le taux d'utilisation des machines et de l'AGV en cas de pannes et le temps de cycle dans le scénario sans pannes. En plus, l'interaction entre les deux effets est trouvée influençable sur le taux de production et d'utilisation des différents équipements, lorsque les pannes de machines sont prises en compte.

Tableau 4.11 : Les résultats concernant l'effet de règles de lancement sur le taux de production, le taux d'utilisation des machines T et de l'AGV

Scénario	Sans présence de pannes			Avec présence de pannes		
	Le taux de production	Le taux d'utilisation des machines T	Le taux d'utilisation du système de transport	Le taux de production	Le taux d'utilisation des machines T	Le taux d'utilisation du système de transport
STOT	60,21 a	97,68 a	33,32 a	59,01 a	96,19 a	32,77 a
LTOT	60,20 a	97,75 a	33,32 a	59,01 a	95,8 b	32,67 b
LPT	60,22 a	97,75 a	33,34 a	58,89 ab	95,72 b	32,61 bc
FIFO	60,05 b	97,54 b	33,24 b	58,82 b	95,54 c	32,55 c
SPT	59,86 c	97,23 c	33,13 c	58,56 c	95,25 d	32,43 d

Les résultats obtenus par la méthode LSD pour le taux de production, le taux d'utilisation des machines T et le taux d'utilisation du système de transport, dans les deux cas avec et sans présence de pannes sont illustrés dans le tableau 4.11. Pour chaque indicateur de performance, ces résultats sont classés en trois groupes qui varient de a à c, sauf ceux qui décrivent l'utilisation des équipements en cas de pannes qui forment quatre groupes. Donc, il y'a des différences significatives dans le taux de production, le taux d'utilisation des machines T_1 ou T_2 , et le taux d'utilisation de l'AGV entre certaines règles de lancement étudiées. On peut aussi remarquer que les règles STOT, LPT et LTOT font partie du même groupe « a » qui correspond aux meilleures valeurs de ces indicateurs, sauf pour le taux d'utilisation des équipements d'usinage et de transport en cas de présence de pannes, où la règle STOT semble la plus performante.

La non existence d'une règle qui superforme significativement les autres dans la majorité des études peut être due à leurs particularités, puisque elles gèrent la congestion à l'entrée du système en utilisant des critères déterministes dans un contexte fortement perturbé, et l'évolution des pièces est suivie par le même algorithme qui ré-ordonne ces pièces en cas d'un changement critique de l'état du système. En revanche, ce scénario est différent pour l'utilisation du système en cas de présence de pannes, ce qui peut s'expliquer par leurs occurrences d'une façon aléatoire, non contrôlée et même pas prise en compte par l'approche proposée, qui affectent clairement les performances du système.

En plus, il est observé que la règle SPT mène toujours aux mauvaises performances évaluées en termes de ces critères de performances, ce qui indique que la moyenne du temps opératoire dans la première machine ne caractérise pas son état actuelle, ce qui rend les décisions prises à base de sa valeur minimale par une règle à portée locale, incapables de palier aux problèmes de congestion qui surviennent tout au long du processus de traitement de pièces à court ou à long terme.

Tableau 4.12 : Les résultats concernant l'effet de règles de lancement sur le temps de cycle et les en-cours

Présence de pannes	Sans	Avec	Sans
Les règles de lancement	Le temps de cycle	Le temps de cycle	Les en-cours
LTOT	197,23 a	201,19 a	8,18 a
LPT	195,69 a	202,73 a	8,21 a
FIFO	195,03 a	202,9 a	8,09 a
STOT	194,63 a	199,82 a	8,18 a
SPT	192,15 b	195,65 b	7,93 b

Le tableau 4.12 présente les résultats obtenus par la méthode LSD concernant le temps de cycle et les en-cours. Ce tableau montre que ceux du temps de cycle sont classés en deux groupes dans les deux cas sans et avec pannes. En plus, on peut aussi observer que toutes les règles appartiennent au même groupe a, sauf pour la règle SPT qui forme le groupe b correspondant aux plus faibles valeurs du temps de cycle. Donc, nous pouvons constater que cette règle qui conduit à une dégradation de la productivité et l'utilisation du système mène à un temps de cycle minimal par rapport aux autres règles. Ceci peut s'expliquer par la contradiction entre les différents critères de performances, la complexité du système, la présence d'incertitudes sur les temps de traitements, l'arrivée aléatoire de pièces, l'occurrence de pannes des machines, la capacité limitée des tampons de stockage... En outre, Les résultats concernant les en-cours obtenus sans prendre en compte les pannes forment deux groupes. Le premier comprend ceux trouvés lorsque les règles LPT, LTOT, STOT, FIFO sont utilisées. Par contre, le deuxième qui représente le plus faible nombre des en-cours n'inclut que ceux de la règle SPT.

Comme il a été démontré dans les analyses concernant les autres indicateurs de performance, cette règle à portée locale mène aux meilleures performances jugées par le temps de cycle et les en-cours. Par contre, elle a un effet négatif sur le taux de production et d'utilisation des différents équipements d'usinage et de transport, dont les meilleures valeurs sont obtenues lors de l'utilisation des règles LPT, LTOT et surtout la règle STOT qui malgré qu'elle offre des performances proches de ces deux dernières, les dépasse en terme de taux d'utilisation des machines et de l'AGV en cas de présence de pannes.

De cette étude, nous pouvons souligner que la présence d'une (ou plusieurs) règle (s) qui semble la meilleure pour un ou certains critères, n'implique pas qu'elle est la plus performante pour tous les critères, à cause de la configuration du système en termes de plusieurs machines identiques avec des capacités de stockage limitées, un système de transport non disponible tout le temps... qui compliquent le processus décisionnel d'ordonnement. En plus, l'existence de plusieurs aléas qui vont perturber ces plans décisionnels établis comme l'arrivée dynamique et continu de pièces, la variation du temps opératoire, les pannes de machines... D'où vient la contradiction entre les différents indicateurs de performances.

4.8.Conclusion

Dans ce chapitre, après avoir présenté l'ordonnancement sous incertitudes en décrivant la notion d'incertitude, les sources d'incertitudes et les approches de résolution d'un ordonnancement dans un environnement avec leurs présences. Nous nous sommes intéressés à leur présence dans notre modèle FMS. Plus précisément, une incertitude endogène liée à la variation du temps opératoire qui affecte l'utilisation des équipements d'usinage, peut provoquer des retards... a été ajoutée aux hypothèses qui reflètent l'incertain et décrites dans le chapitre précédent, en comprenant en particulier l'arrivée dynamique et aléatoire des ordres de fabrication qui influencent la surcharge du système, et l'occurrence imprévisible de pannes qui dégradent ses performances... tout en prenant en compte ses contraintes techniques qui compliquent le processus décisionnel d'ordonnancement de pièces qui peuvent être de différents types.

Pour faire face à cette situation, nous avons amélioré l'algorithme à base des essais particuliers développé pour le routage des pièces, par l'implantation d'une procédure réactive pour réviser rapidement l'ordonnancement, sur la base des données concernant l'état du système acquises en temps réel en cas d'un changement détecté lors de l'arrivée d'une nouvelle pièce à usiner. Son efficacité sur la base des autres approches de routages des pièces et son interaction avec les décisions de séquençement de machines et de lancement de pièces basées sur les règles de priorité reconnues comme des approches réactives simples, sont ensuite analysées.

Cependant, les résultats trouvés ne sont pas suffisants car ils sont sans doute fortement dépendants de la structure du système étudié, et surtout des données. Donc, si certaines conditions opératoires changent telles que la modification du nombre de routages, de machines alternatives... les approches appliquées jusque là peuvent ne plus être appropriées à la nouvelle situation. Pour remédier à ces inconvénients tout en bénéficiant des avantages de la flexibilité de routages, nous proposons d'aborder le problème avec plusieurs configurations de cet atelier en variant les niveaux de ce type de flexibilité, afin de pouvoir mieux cerner le problème, analyser les performances des approches proposées dans chaque niveau et éventuellement trouver des conclusions générales. Ceci fera l'objet du chapitre suivant.

Chapitre 5

Les effets de la flexibilité de routages et des décisions d'ordonnancement sur les performances d'un système flexible de production sous incertitudes

5.1.Introduction

Actuellement, les industriels ont développé la flexibilité de leurs systèmes de production afin d'améliorer leurs performances, en satisfaisant au mieux les demandes et les besoins de leurs clients, de compenser les conditions changeantes de leurs environnements, conquérir de nouveaux marchés, rester compétitifs dans ce contexte actuel avec une féroce concurrence et des circonstances en perpétuel changement...

La flexibilité de routage est un contributeur majeur de ces flexibilités implémentées pour répondre à ces nécessités d'une façon adaptative, en permettant une grande liberté et réactivité pour faire face aux différents changements de l'environnement,... Son existence dans un FMS offre plusieurs avantages, qui ont poussé plusieurs industriels à la prendre en compte lors de l'implémentation et la configuration des systèmes, afin de permettre l'équilibre des charges de machines pour mieux gérer et compenser efficacement l'effort,... Elle permet également au système d'avoir des routages alternatifs pour produire différentes familles de pièces sans interruptions, ainsi qu'une capacité de ré-routage pour continuer à fonctionner et à maintenir ses performances élevées malgré l'occurrence aléas (panne de machine, les commandes urgentes...).

Cependant, pour que sa mise en œuvre présente un effet positif, il faut que le système soit doté de machines flexibles, dont certaines sont identiques, ou redondantes afin de pouvoir réaliser les mêmes opérations, ou de remplacer les centres d'usinage sans une perte fatale de l'efficacité. En plus, les produits doivent accepter l'usinage dans les différentes machines alternatives. Son implémentation nécessite aussi un système de manutention versatile, différentes stratégies de contrôle opérationnel et d'autres équipements et installations technologiques, qui peuvent avoir un coût d'investissement énorme.

Aussi, au delà de ces contraintes, la littérature a indiqué que l'augmentation des capacités supplémentaires et alternatives n'apporte pas toujours des améliorations des performances et de la flexibilité, malgré les coûts engagés. Par conséquent, il est nécessaire de trouver pour chaque configuration donnée, le niveau approprié de ce type de flexibilité, afin d'équilibrer les avantages et les coûts.

En raison de l'importance du niveau de flexibilité de routages dont la variation affecte par exemple le traitement, en termes de nombres de possibilités de routages, de machines alternatives et

surtout, la complexité de management, sur le fonctionnement des systèmes. Tout au long de ce chapitre, nous nous intéressons à son effet sur les performances d'un FMS qui garde la configuration physique de celui étudié précédemment, avec ses contraintes liées au nombre de machines, leurs dispositions, au nombre de pièces, aux gammes de fabrications en termes d'opérations à réaliser avec présence d'incertitudes, mais les machines sont plus flexibles et acceptent des changements nécessaires pour produire plus de pièces. Le but de cette analyse est d'avoir une idée sur les performances atteintes dans chaque configuration, lorsqu'elle intègre les différentes stratégies de décisions d'ordonnancement (lancement, routage, séquençement) prises en temps réel, ce qui permet aussi de tester l'efficacité de chacune. Pour ce faire, trois niveaux de flexibilité ont été considérés en dépendant de nombre maximal des machines alternatives que peut visiter une pièce pour le traitement.

Tout d'abord, ce chapitre présente l'objectif et la motivation de ce travail, puis une description détaillée de la modélisation des différents niveaux de flexibilité considérés est donnée dans la deuxième section. Ensuite, notre mise en évidence sur l'effet de la flexibilité de routage se fait en trois étapes, dont chacune est consacrée à la combinaison des niveaux étudiés avec les différentes politiques de décisions. À cet effet, la troisième section est une étude comparative entre les différents algorithmes proposés pour le routage des pièces lorsqu'ils sont appliqués dans chaque configuration. Enfin, ce chapitre met l'accent sur l'interaction de chaque configuration avec les décisions de séquençement des machines et de lancement des pièces prises à l'aide des règles de priorité, lorsque l'algorithme à base des essais particuliers qui intègre simultanément la sélection de routages et le ré-ordonnancement de pièces est adopté comme approche de décisions de routage des pièces.

5.2.Motivations et objectifs

Les systèmes flexibles de production ont été généralement développés suite au besoin de l'industrie pour répondre plus rapidement que dans le passé aux changements internes, liés par exemple à leurs caractéristiques techniques, opérationnelles ou externes, causées par la nature de la consommation actuelle, la large ouverture sur l'étranger... Ces avantages sont contrebalancés par le fait que ces systèmes sont souvent coûteux, et d'une complexité fonctionnelle et structurelle qui résulte pour une large part de la qualité et la diversité des produits, ainsi que des exigences du marché et de la concurrence... Cette complexité dépend non seulement du produit mais aussi du processus. Ce qui nécessite la prise en compte de toutes ces contraintes non seulement lors de leurs implémentations, mais aussi pendant leurs exploitations qui doivent être effectuées sous des stratégies de contrôle efficaces.

La flexibilité de routage est l'une des flexibilités qui distinguent les FMS auxquels elle est implantée, des autres systèmes de production. Elle a été regardée par Joseph et Sridharan [**Joseph 11a**] comme le principal contributeur à la flexibilité d'un FMS, et par Sethi et Sethi [**Sethi 90**] comme une caractéristique fondamentale de la flexibilité globale d'un FMS, car elle améliore les performances du système. L'analyse de ses différentes définitions existantes dans [**Bilge 08**], [**Joseph 11a**], [**Benjaafar 93**], [**Carter 86**], [**Ali 10a**], [**Wahab 08**], [**Chang 07**] nous a permis de découvrir que les auteurs s'accordent sur certaines de ses particularités. Cette flexibilité permet au système de fournir des routages alternatifs, et ainsi une grande liberté pour produire un ensemble de pièces de différentes familles économiquement, efficacement et sans interruptions. Elle offre également une capacité de ré-routage pour continuer à produire la quantité demandée, sans éprouver

une dégénérescence fatale de ses performances en cas d'occurrence d'un ou plusieurs aléas. En plus de ces compromis entre la diversité de routage et la capacité à faire face à plusieurs événements inattendus, elle peut être traitée comme un outil à plusieurs fins pour améliorer les performances du système. Parmi ses bienfaits, on peut aussi citer, la balance entre les charges de machines, l'augmentation de la productivité et de l'utilisation des machines si celles-ci sont bien outillées, la possibilité de maintenance de certains équipements sans une dégradation de performances en raisons de la présence de machines redondantes, la minimisation des coûts des instructions additionnelles...

En effet, la fourniture de routages qui se composent de plusieurs machines pour produire un ensemble de pièces, est conditionnée par l'existence de machines identiques, alternatives ou redondantes capables de réaliser les mêmes opérations, sans une perte de l'efficacité des ressources principales. En plus, chaque pièce est caractérisée par sa propre séquence, et peut être transférée d'un endroit à un autre, en cas de présence d'aléas comme les pannes ou les goulets d'étranglement, pour un traitement équivalent à celui prévu avant l'occurrence de ces événements inattendus. Ceci permet de déduire qu'en plus du fait qu'elle dépend des caractéristiques d'usinage du produit, elle est aussi inhérente dans la configuration matérielle de l'atelier, en termes du nombre et de la disposition des machines... Par conséquent, afin de l'implémenter, il faut doter le système à la fois de machines à usage multiple, et capables d'utiliser différents outils avec un changeur d'outils automatisé... En plus des machines, le système doit contenir au moins un système de manutention versatile et rapide, des stratégies de contrôle opérationnel, différents modes de gestion, des interconnexions, certaines caractéristiques de produits ... À cet égard, le niveau réalisé de la flexibilité de routages dépend des capacités technologiques du système et ses stratégies de contrôle opérationnel, en prenant en compte les contraintes disjonctives et conjonctives des opérations, les contraintes de chargements des machines qui utilisent des outils...

Selon Chan et al. [Chan 07] la flexibilité de routage peut être augmentée en ajoutant une machine supplémentaire pour une opération donnée, ou par l'augmentation de la flexibilité d'une machine existante. Cependant, selon Yu et Greene [Yu 09] sa mise en œuvre entraîne un coût énorme de tous ces équipements et installations technologiques... En plus, malgré ses avantages, la littérature suggère également qu'un niveau élevé de la flexibilité peut être difficile à atteindre, augmenter la complexité du système de gestion... De ce point de vue, Chan et al. [Chan 06] ont déclaré qu'un niveau élevé de la flexibilité peut être contre-productif. En plus, selon Ali et Wadhwa [Ali 10] une flexibilité de routage croissante ne peut pas être traitée comme un rôle clé dans l'amélioration du système. Donc, les industriels doivent savoir si son augmentation est bénéfique pour leurs ateliers, comment justifier la nécessité d'une application judicieuse de ce type de flexibilité. Ils doivent également déterminer le niveau approprié de la flexibilité de routage pour une configuration spécifique du système, afin d'équilibrer les avantages et les coûts engagés. À cet effet, plusieurs travaux se sont intéressés à l'analyse de son effet sur les performances des FMS, afin de pouvoir déterminer son niveau optimal en bénéficiant de ses avantages, en minimisant les coûts...

En outre, en raison des caractéristiques structurelles et opérationnelles des FMS, aucune analyse ne peut être effectuée, sans prendre en considération les contraintes physiques et opérationnelles des systèmes, les objectifs de production... Malheureusement, il y'a toujours un besoin de prendre en compte simultanément les contraintes liées à la limitation des files d'attente, des capacités des machines, et du système de transport, des pannes de machines, des fortes variations de la durée opératoire, l'arrivée dynamique et aléatoire de pièces mixtes. Ceci est le

facteur de motivation principal de ce travail qui consiste à analyser l'impact de la variation de la flexibilité de routage, en augmentant le nombre maximum de machines alternatives pour une opération donnée, sur les performances d'un modèle FMS hypothétique développé, en se basant sur celui étudié précédemment et tiré de la littérature. Celle-ci est évaluée toujours en termes du taux de production qui représente l'indicateur principal, ainsi que d'autres indicateurs de performance qui sont également considérés afin de fournir plus de perspicacité sur les performances du système, telles que l'utilisation des machines et du système de transport, le temps du cycle et les en-cours...

Malgré que les niveaux de flexibilité de routage étudiés partagent la même configuration physique, leur variation peut influencer les caractéristiques et les paramètres opérationnelles du système, car l'augmentation de ces niveaux en termes de celles de capacités supplémentaires et alternatives pour rendre le système plus flexible conduit à l'augmentation du nombre de routages alternatifs... Puisque le comportement du système change en fonction du changement de niveau de flexibilité de routage, les stratégies de contrôles ne peuvent pas fonctionner et réagir de la même manière surtout dans cet environnement en plein changement, ce qui peut compliquer le processus de sélection de routage des pièces existantes à l'intérieur du système. À cet égard, il est toujours intéressant de savoir si le système de gestion de routages proposé précédemment à base des essais particuliers est toujours souple, capable de piloter le système en temps réel dans son nouvel état, ou il est fortement dépendant de la structure du système étudié. En plus, une autre motivation importante pour le FMS, c'est le besoin d'une analyse de l'impact de la flexibilité de routage combinée avec un système décisionnel basé sur les métaheuristiques. À cet effet, nous proposons d'aborder le problème avec plusieurs configurations de cet atelier, en variant les niveaux de ce type de flexibilité, afin de pouvoir mieux analyser les performances des approches proposées pour le routage des pièces dans chaque niveau, et éventuellement trouver des conclusions générales.

Selon Mebarki [Mebarki 95] l'efficacité des règles de priorité dépend étroitement des critères de performance évalués et des conditions opératoires effectives dans l'atelier. Donc, il est très important de tester les performances des règles étudiées, lorsqu'elles sont appliquées pour assigner les différentes valeurs de priorité aux pièces dans ces nouvelles situations. Ce qui fait l'objet de la deuxième et la troisième partie de ce travail, qui sont consacrées respectivement à l'interaction de chaque niveau avec les décisions de séquençement des machines et de lancement des pièces. Celles-ci sont combinées avec les procédures de routages basées sur l'algorithme à base des essais particuliers, qui offre la possibilité de ré-routage de pièces.

Les motivations qui précèdent ont permis de déterminer les objectifs de ce travail, qui peuvent être résumés par les points suivants :

- ✓ L'évaluation de l'impact de l'augmentation de la flexibilité de routage sur les performances du système.
- ✓ L'analyse de l'efficacité des approches proposées lorsqu'elles sont appliquées sur plusieurs niveaux.
- ✓ La détermination de la combinaison de différentes approches de décisions d'ordonnancement appropriée pour chaque niveau.

5.3. La description du modèle FMS hypothétique

La configuration physique de cet FMS est équivalente à celle présentée dans le chapitre 3 et extraite de la littérature [Saygin 01], [Saygin 04], sauf que les machines utilisées ont plus de capacités supplémentaires en offrant la possibilité de réalisation d'un nombre suffisant d'opérations.

Ceci permet au système de s'adapter au niveau de flexibilité de routage adopté en raison de la présence de choix multiples lors de l'exécution d'une ou de plusieurs tâches, qui peuvent être critiques dans certaines situations inattendues, et donc affecter le fonctionnement prévu du système.

En effet, il comprend deux stations, une station de chargement (SC) qui comprend les pièces existantes dans le système et en attente de lancement de la production, et une de déchargement (SD) réservée aux pièces dont le traitement est achevé, sept machines à usages multiples (MF₁, MF₂, MF₃, MF₄, MF₅, MF₆ et MF₇), dont chacune comporte un tampon d'attente d'entrée (E) et un autre de sortie (S) d'une capacité limitée de deux pièces.

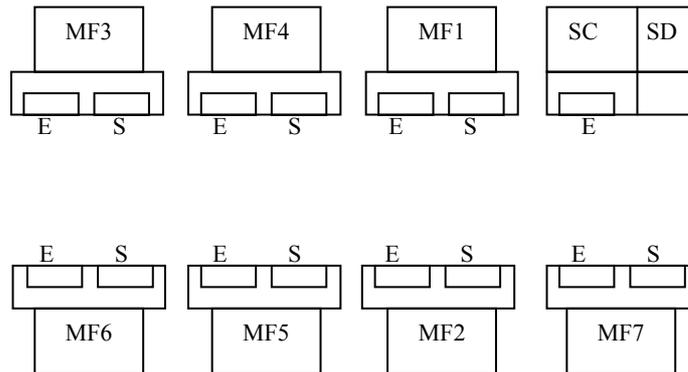


Figure 5.1 : Configuration du modèle FMS hypothétique.

Les différents centres d'usinage sont reliés entre eux par des interconnexions, qui permettent le déplacement du véhicule autoguidé, utilisé pour le transport des pièces d'un endroit à un autre avec une capacité limitée qui vaut 1. Six types de pièces de pourcentages différents qui arrivent au système d'une façon aléatoire et dynamique, sont à usiner par les différentes machines flexibles.

En plus des ressources et du système de manutention, la station de chargement et de déchargement sont aussi restreintes par des contraintes de capacité, la première contient une file d'attente d'entrée qui ne peut pas stocker plus de deux pièces à la fois, et la deuxième a une capacité d'une seule pièce. La configuration du système flexible de production est donnée dans la figure 5.1.

Dans ce système, les points de décision sont toujours la station de chargement et les files d'entrée ou de sortie des machines. Donc, les décisions d'ordonnancement incorporées sont prises en termes de lancement des pièces au niveau de la station de chargement, leurs routages vers les diverses machines alternatives, et leur séquençement si elles sont en attente de traitement aux niveaux des files d'entrée des machines.

Les opérations sur le système flexible de production étudié sont basées sur les suppositions présentées dans le chapitre 3. Sauf que leurs contraintes disjonctives dépendantes de leurs machines alternatives changent, car une opération peut être réalisée sur ces machines en fonction du niveau de flexibilité de routage, défini dans notre étude en terme du nombre maximal des machines alternatives, qui peuvent effectuer une opération donnée.

La littérature propose différentes analyses de la flexibilité de routages, qui peut être selon Garavelli [Garavelli 01], nulle lorsque chaque opération ne peut être effectuée que sur une seule machine, totale qui implique que chaque machine est capable de traiter tous les produits, partielle ou limitée qui est aussi considérée comme un cas particulier de ce type de flexibilité permet aux

machines d'effectuer certaines opérations sur les produits selon certaine logique. Ce type de flexibilité qui représente la configuration intermédiaire entre les deux niveaux précédents, est le plus considéré dans la littérature pour les raisons décrites précédemment. Dans ce travail, le système est mis sur trois niveaux de flexibilité de routage (Routing Flexibility Levels (RFL)) décrits comme suit :

- ✓ Le niveau 1 (RFL₁) : signifie que chaque opération peut être effectuée sur deux machines au maximum. Ce niveau est équivalent à celui considéré dans les études précédentes où les opérations peuvent être classées en deux groupes, les opérations qui peuvent être réalisées sur deux machines alternatives et celles réalisées sur une seule machine.
- ✓ Le niveau 2 (RFL₂) : désigne la situation où il y'a trois machines alternatives pour certaines opérations, deux possibilités de traitement pour certaines d'autres, et aucune machine supplémentaire pour le reste.
- ✓ Le niveau 3 (RFL₃) : correspond au traitement des opérations classées en quatre groupes. Le premier représente les opérations qui ne nécessitent aucune machine supplémentaire, le deuxième comprend celles effectuées sur deux machines alternatives, le troisième implique qu'il existe exactement trois machines possibles pour le traitement des opérations qui le forment. Le quatrième comprend celles qui possèdent quatre endroits de traitements.

Tableau 5.1 : Les temps de traitement moyens des opérations et les routages alternatifs des pièces pour les niveaux adoptés

Type et le taux d'arrivée de pièces	Les RFL et le nombre de leurs routages	Routages et durées opératoires moyennes (min)
A (17 %)	RFL ₁ (4)	SC – MF _{1,2} (30) – MF _{5,6} (20) – SD
	RFL ₂ (4)	SC – MF _{1,2} (30) – MF _{5,6} (20) – SD
	RFL ₃ (8)	SC – MF _{1,2} (30) – MF _{3,4,5,6} (20) – SD
B (17 %)	RFL ₁ (4)	SC – MF _{1,2} (20) – MF ₇ (1) – MF _{5,6} (15) – SD
	RFL ₂ (4)	SC – MF _{1,2} (20) – MF ₇ (1) – MF _{5,6} (15) – SD
	RFL ₃ (8)	SC – MF _{1,2} (20) – MF ₇ (1) – MF _{3,4,5,6} (15) – SD
C (17 %)	RFL ₁ (4)	SC – MF _{1,2} (40) – MF _{5,6} (25) – SD
	RFL ₂ (6)	SC – MF _{1,2,3} (40) – MF _{5,6} (25) – SD
	RFL ₃ (8)	SC – MF _{1,2,3,4} (40) – MF _{5,6} (25) – SD
D (21 %)	RFL ₁ (8)	SC – MF _{1,2} (40) – MF ₇ (1) – MF _{1,2} (20) – MF _{3,4} (35) – SD
	RFL ₂ (18)	SC – MF _{1,2,5} (40) – MF ₇ (1) – MF _{1,2} (20) – MF _{3,4,6} (35) – SD
	RFL ₃ (18)	SC – MF _{1,2,5} (40) – MF ₇ (1) – MF _{1,2} (20) – MF _{3,4,6} (35) – SD
E (20 %)	RFL ₁ (8)	SC – MF _{1,2} (25) – MF ₇ (1) – MF _{1,2} (35) – MF _{3,4} (50) – SD
	RFL ₂ (18)	SC – MF _{1,2} (25) – MF ₇ (1) – MF _{1,2,5} (35) – MF _{3,4,6} (50) – SD
	RFL ₃ (18)	SC – MF _{1,2} (25) – MF ₇ (1) – MF _{1,2,5} (35) – MF _{3,4,6} (50) – SD
F (8 %)	RFL ₁ (2)	SC – MF _{3,4} (40) – SD
	RFL ₂ (3)	SC – MF _{3,4,5} (40) – SD
	RFL ₃ (4)	SC – MF _{3,4,5,6} (40) – SD

En raison de l'existence de machines alternatives, les différentes pièces peuvent suivre de routages alternatifs, qui dépendent des caractéristiques d'usinage de chaque type en termes d'opérations et le niveau de flexibilité adopté. Les combinaisons possibles des routages de chaque niveau et les temps de traitement moyens de chaque opération sont rapportées dans le tableau 5.1.

Ce tableau montre que le nombre maximum des machines alternatives varie d'un niveau à un autre de 2 à 4. Par exemple dans le niveau 1, chaque opération s'exécute sur une ou deux machines. En revanche, il est possible de considérer plus de deux machines dans les niveaux 2 et 3, comme pour la première opération de chaque pièce de type C qui peut s'effectuer sur l'une des machines (MF₁, MF₂ ou MF₃) dans le niveau 2. En outre, elle possède dans le niveau 3 un quatrième endroit de traitement MF₄.

Cette variation influe aussi sur le nombre de routages alternatifs dédiés pour chaque type. Par exemple, une pièce de type A dont le taux d'arrivée à la file des ordres vaut 17%, et dont la gamme comprend deux opérations : La première peut être toujours traitée par deux machines (MF₁ ou MF₂). Par contre, la deuxième s'effectue dans les niveaux 1 et 2 sur deux machines alternatives (MF₅ ou MF₆), et sur quatre machines dans le niveau 3 (MF₃ ou MF₄ ou MF₅ ou MF₆). Donc, elle peut suivre quatre routages dans les niveaux 1 et 2 :

SC – MF₁ (30) – MF₅ (20) – SD
SC – MF₁ (30) – MF₆ (20) – SD
SC – MF₂ (30) – MF₅ (20) – SD
SC – MF₂ (30) – MF₆ (20) – SD

et huit routages si le niveau de flexibilité est RFL₃

SC – MF₁ (30) – MF₃ (20) – SD
SC – MF₁ (30) – MF₄ (20) – SD
SC – MF₁ (30) – MF₅ (20) – SD
SC – MF₁ (30) – MF₆ (20) – SD
SC – MF₂ (30) – MF₃ (20) – SD
SC – MF₂ (30) – MF₄ (20) – SD
SC – MF₂ (30) – MF₅ (20) – SD
SC – MF₂ (30) – MF₆ (20) – SD

À cet effet, selon le nombre de machines alternatives existant dans les séquences de traitement de pièces, celles des types B, C, D, E et F possèdent respectivement 4, 4, 8, 8 et 2 routages alternatifs dans le niveau 1. Cependant, la configuration du niveau 2 offre jusqu'à 4, 6, 18, 18 et 3 possibilités d'acheminements multiples à ces pièces. En plus, leurs nombres de routages atteignent les valeurs 8, 8, 18, 18 et 4 dans le niveau 3.

5.4. Analyse de l'effet de la flexibilité de routage et les approches proposées pour les décisions de routages des pièces

Dans cette section, nous allons analyser les performances du système étudié composé de plusieurs machines flexibles de capacités limitées, mais capables d'effectuer une variété d'opérations sur plusieurs types de pièces qui arrivent d'une façon aléatoire et continue. Ce contexte qui dépend non seulement du produit mais aussi du processus, soumis à un certain nombre de perturbations comme le changement de la durée opératoire, les pannes de machines... Cette analyse s'effectue sur différentes configurations fonctionnelles de l'atelier, dont chacune représente un niveau de flexibilité de routage. Chacun augmente en ajoutant des routages alternatifs sans modifier la structure physique, certaines ressources supplémentaires pour certaines opérations, afin de pouvoir absorber la charge de leurs machines, et de pouvoir bénéficier des avantages de la flexibilité de routage. Puisque, ses bienfaits sont à condition qu'elle soit bien maîtrisée, les approches à base des essais particuliers (OEP sans ré-ordonnancement, avec ré-ordonnancement

de la station de chargement, avec ré-ordonnement de pièces au cours de traitement), dont l'efficacité a été démontrée dans des travaux antérieurs, sont toujours adoptées pour la sélection de routages alternatifs.

Un certain nombre d'objectifs sont derrière ce compromis entre la flexibilité de routage et la réactivité des approches proposées instaurées au niveau de ce système. Le premier consiste à analyser l'efficacité de chacune d'entre elles sur plusieurs configurations fonctionnelles de l'atelier, afin de pouvoir effectuer un choix rigoureux d'une méthode qui surpasse les autres. L'approche choisie doit maintenir des performances élevées, malgré le changement opérationnel du système auquel elle est implantée, et la complexité du contrôle due au nombre élevé des choix de routages. Le deuxième concerne la vérification de l'amélioration qui peut être apportée par l'incrémentation du niveau de flexibilité de routage, pour justifier l'avantage de sa mise en œuvre, en offrant au système la possibilité de continuer à fonctionner, et d'éviter les interruptions qui peuvent surgir en raison des occurrences de plusieurs sortes d'aléas...

Pour y arriver, chaque combinaison de l'une des approches et d'un niveau de flexibilité considéré a été vérifiée par simulation en prenant en compte les contraintes présentées dans la section 3.2 et des variations des temps opératoires modélisés par une loi exponentielle. Le système est supposé en état de saturation, à un taux d'entrée de pièces à la file infinie qui vaut 1/15, ceci signifie que la durée entre deux arrivées de pièces est 15 minutes, cette dernière est très suffisante pour augmenter rapidement la surcharge du système. En plus, les paramètres des algorithmes ont été mis dans leurs valeurs qui conduisent à des résultats de qualité satisfaisante, c'est-à-dire lorsque la taille de la population vaut 16 pour les algorithmes sans ré-ordonnement et avec ré-ordonnement de la station de chargement, et 8 pour l'algorithme avec ré-ordonnement de pièces en cours de traitement. En outre, les paramètres w , C_1 , et C_2 sont fixés à la valeur 0.5.

Dans le but d'établir si les différences entre les stratégies sont significatives, nous avons utilisé un test statistique ANOVA basé sur le calcul, au seuil $\alpha=0.05$, de la valeur de F pour chaque indicateur de performance. Deux facteurs dont les effets font l'objet de cette étude sont donc pris en compte. Le premier facteur est décrit par la politique de sélection de routage (1) qui peut être soit l'algorithme OEP sans ré-ordonnement, l'algorithme proposé avec la permission de ré-ordonnement du contenu de la station de chargement (Reordo_pièces_station_chargement), ou l'algorithme qui autorise celui de pièces en cours de traitement (Reordo_pièces_en_cours). Le second facteur principal représente le niveau de flexibilité de routage supposé variable, dont les valeurs prises sont RFL_1 , RFL_2 ou RFL_3 , et chacune d'elles correspond à une configuration opérationnelle décrite dans la section précédente.

Le tableau 5.2 présente les résultats obtenus par la méthode ANOVA pour : les effets politique de sélection de routage, niveau de flexibilité de routage et leur interaction sur les différents indicateurs de performances, qui sont le taux de production, le taux d'utilisation des machines, le taux d'utilisation de l'AGV, les en-cours et le temps de cycle. Contrairement aux études précédentes qui considèrent le taux d'utilisation des machines T_1 et T_2 comme mesures pour juger les différents facteurs étudiés, car ces machines représentaient les goulets d'étranglement et avaient le même comportement que les autres machines. Néanmoins, dans ce qui suit, puisque l'augmentation de la flexibilité de routage peut compenser les charges de certaines machines par d'autres et donc minimiser celles des machines goulets, ce qui peut rendre leur comportement différent par rapport à celui des autres équipements. Par conséquent, il nous paraît plus utile de baser nos analyses sur l'utilisation moyenne de tous les centres d'usinage.

Tableau 5.2 : Les valeurs F concernant les mesures de performances pour les effets politique de sélection de routage, niveau de flexibilité de routage et leur interaction

Présence de pannes	Les effets	Le taux de production	Le taux d'utilisation des machines T	Le taux d'utilisation du système de transport	Les en-cours	Le temps de cycle	Le point critique
Sans	1	10980,44	15805,23	10971,01	547,50	19,32	3,11
	2	4346,61	5745,28	4342,45	12,11	38,02	3,11
	Interaction	631,45	884,98	631,05	39,16	3,68	2,48
Avec	1	2667,82	3073,92	2668,15	825,3	1,67	3,11
	2	1143,11	1208,31	1143,53	0,23	74,716	3,11
	Interaction	80,83	92,61	80,88	14,88	0,48	2,48

De ce tableau, il est remarquable que la valeur F statistique soit supérieure à son point critique pour les deux effets et leur interaction et dans les deux scénarios. Sauf pour deux mesures en cas de présence de pannes, où l'effet politique de sélection de routages n'a pas un impact significatif sur le temps de cycle, de même pour celui du niveau de flexibilité de routage sur les en-cours. En plus, l'impact interaction entre les deux effets est toujours trouvé significatif. Ces résultats ne nous paraissent pas étonnants, car les performances du système peuvent être affectées, par l'introduction des mécanismes de correction de l'ordonnancement initial en cas de changement de son environnement souvent incertain, et par l'augmentation du nombre de possibilités de routages pour les pièces dans ces situations. Afin de déterminer la stratégie la plus efficace et le niveau le plus approprié, les différentes comparaisons multiples ont été établies en utilisant la méthode LSD.

Tableau 5.3 : Les résultats concernant l'effet de politiques de sélection de routages sur le taux de production, l'utilisation moyenne des machines, le taux d'utilisation de l'AGV

Scénario	Sans présence de pannes			Avec présence de pannes		
	Le taux de production	Le taux d'utilisation de machines	Le taux d'utilisation du système de transport	Le taux de production	Le taux d'utilisation de machines	Le taux d'utilisation du système de transport
Reordo_pièces_en_cours	82,55 a	57,67 a	38,09 a	78,53 a	54,88 a	36,23 a
Reordo_pièces_station_chargement	68,98 b	48,11 b	31,83 b	67,19 b	46,91 b	31 b
Sans reordonnancement	66,96 c	46,68 c	30,89 c	65,44 c	45,58 c	30,19 c

Les résultats concernant l'effet politique de sélection de routages avec variation du RFL, obtenus par la méthode LSD pour le taux de production, le taux d'utilisation moyen des machines et le taux d'utilisation du système de transport, dans les deux scénarios avec et sans présence de pannes, sont illustrés dans le tableau 5.3. Ce tableau montre que chaque politique de routage des pièces appartient à un seul groupe de ceux formés de a à c, ce qui confirme l'existence de différences significatives dans le taux de production et l'utilisation des équipements entre les différentes approches utilisées. Comme c'était prévu, les algorithmes qui intègrent des mécanismes de ré-ordonnancement sont plus performants que celui sans ré-ordonnancement. Ceci démontre que

quelque soit le niveau de flexibilité adopté qui offre au système plusieurs choix de traitement de pièces, il est nécessaire de réviser d'une façon réactive l'ordonnancement initial en cas de changements critiques de son environnement.

Il est aussi clair que malgré le changement du comportement fonctionnel du système dû à la variation du niveau de flexibilité de routage qui complique le processus décisionnel du système, l'algorithme avec ré-ordonnancement des pièces qui sont en cours de traitement, et vont être déplacées d'un endroit à un autre dans le futur proche a maintenu ses performances élevées. Ceci démontre la capacité de cette approche, à offrir lorsqu'elle est intégrée dans une variété de configurations dans lesquelles le système et les stratégies de contrôle ne fonctionnent pas de la même manière, un bon équilibre de travaux et ainsi leur permettre d'éviter les inter-blocages à court ou à long termes, minimiser les impasses ...

Tableau 5.4 : Les résultats concernant l'effet de flexibilité de routages combinée avec plusieurs stratégies de routage sur la productivité et l'utilisation du système

Scénario	Sans présence de pannes			Avec présence de pannes		
	Le taux de production	Le taux d'utilisation de machines	Le taux d'utilisation du système de transport	Le taux de production	Le taux d'utilisation de machines	Le taux d'utilisation du système de transport
RFL ₃	77,08 a	53,68 a	35,56 a	74,04 a	53,68 a	35,56 a
RFL ₂	74,56 b	52,00 b	34,40 b	71,97 b	52,00 b	34,40 b
RFL ₁	66,85 c	46,77 c	30,84 c	65,15 c	46,77 c	30,84 c

Le tableau 5.4 illustre les résultats concernant l'effet du niveau de flexibilité de routage, combinée avec plusieurs politiques de routages, obtenus par la méthode LSD pour le taux de production, l'utilisation moyenne des machines et le taux d'utilisation du système de transport dans les deux situations avec et sans pannes. Ce tableau montre que trois groupes sont formés de a à c dont chacun correspond à un seul niveau. Donc, comme il a été démontré par l'analyse ANOVA, il est évident que les performances en termes de taux de production, de taux d'utilisation des machines, et de l'AGV obtenues après des variations du niveau de flexibilité de routage ne sont pas identiques. Le classement du niveau RFL₁ à la classe c (correspond aux mauvais résultats), révèle que malgré la diversité des stratégies de sélection de routages et les caractéristiques structurelles et fonctionnelles du système souvent incertain, l'incrémentation du nombre de routages alternatifs a permis de tirer partie des avantages offerts par ce type de flexibilité. Parmi ces améliorations, on peut citer l'augmentation de la productivité et de l'utilisation du système, qui sont dépendants de plusieurs critères secondaires comme l'équilibre des charges de machines, en raison de la facilité d'établir un ordonnancement efficace.

Ces résultats montrent aussi que le niveau RFL₃ est le meilleur, car il offre le plus grand nombre de routages, ce qui permet de transférer la charge d'une ressource surchargée si la quantité de travail dépasse sa capacité, minimiser la congestion... De plus, cette diversité de choix offre au système la capacité de s'adapter aux différents changements imprévisibles, et à absorber les défaillances de l'ordonnancement dues aux pannes ou à la maintenance des machines, la surcharge du système...

Le tableau 5.5 fournit les résultats concernant l'effet politique de routages de pièces avec variation du RFL, obtenus par la méthode LSD pour le temps de cycle lors de la présence de pannes

de machines, et les en-cours en prenant en compte les deux scénarios. Comme il est montré dans ce tableau, deux groupes étiquetés a et b sont formés pour le temps de cycle, ce qui démontre l'influence significative de la stratégie de routages des pièces sur le temps de cycle. Malgré, les avantages que peut fournir l'augmentation de la flexibilité de routages liés à la facilité d'obtention d'un ordonnancement efficace, l'algorithme qui intègre une procédure réactive de ré-ordonnancement des pièces en cours de traitement forme la classe a, qui correspond toujours au temps de cycle le plus élevé. En revanche, la stratégie sans ré-ordonnancement conduit au meilleur temps de cycle avec un peu de différence par rapport à l'algorithme de ré-ordonnancement de la station de chargement.

Tableau 5.5 : Les résultats concernant l'effet de politiques de sélection de routages sur le temps de cycle et les en-cours

Présence de pannes	Sans	Sans	Avec
Politique de sélection de routages	Le temps de cycle	Les en-cours	Les en-cours
Reordo_pièces_en_cours	191,74 a	9,16 a	8,52 a
Reordo_pièces_station_chargement	181,84 b	6,92 b	6,96 b
Sans reordonnancement	178,1 b	6,70 c	6,73 c

À cet égard, on peut dire que ce contexte reste toujours un obstacle devant le développement d'un algorithme qui surpasse les autres en termes de la productivité du système et de son utilisation et aussi le temps de cycle, malgré le nombre de choix supplémentaires apportés par l'augmentation du nombre de routages réservés pour les différents types de pièces selon les niveaux de flexibilité de routages adoptés.

Il est également observé dans ce tableau que chaque approche de sélection de routages alternatifs évaluée en terme des en-cours forme un seul groupe. En plus, on peut remarquer que l'algorithme qui autorise la réaffectation de routages aux pièces au cours de traitement forme le groupe a, qui représente les plus grandes valeurs des en-cours pour l'effet politique de routage. À cet effet, on peut remarquer que cet algorithme qui performe le meilleur en termes de taux de production et d'utilisation des équipements d'usinage et de transport a augmenté significativement les en-cours, malgré les améliorations introduites au système en terme du niveau de flexibilité de routages.

Cette dégradation peut s'expliquer par l'existence de plusieurs contraintes comme la non disponibilité de l'AGV et celles de capacité qui compliquent les différents plans décisionnels et les incertitudes qui les perturbent comme la variation du temps opératoire, les pannes de machines... ou à la capacité de l'algorithme Reordo_pièces_en_cours à ouvrir les impasses, et à minimiser les inter-blocages qui peuvent empêcher l'entrée des pièces au système.

Tableau 5.6 : Les résultats concernant l'effet de flexibilité de routages combinée avec plusieurs stratégies de routage sur le temps de cycle et les en-cours

Présence de pannes	Sans	Avec	Sans
Le niveau de flexibilité de routages	Le temps de cycle	Le temps de cycle	Les en-cours
RFL ₁	195,09 a	201,12 a	7,37 b
RFL ₂	180,26 b	179,51 b	7,66 a
RFL ₃	176,34 b	175,05 b	7,75 a

Les résultats concernant le temps de cycle obtenus par la méthode LSD dans les deux cas avec et sans présence de pannes sont présentés dans le tableau 5.6. De ces résultats classés en deux groupes a et b, on peut dire que dans ce contexte incertain, le changement du niveau de flexibilité de routage influe sur le temps de cycle. On peut aussi observer que le niveau RFL_1 forme le groupe a qui correspond aux valeurs du temps de cycle les plus élevées. Néanmoins, le meilleur correspond au niveau RFL_3 qui n'est pas significativement différent de celui trouvé au niveau RFL_2 .

Par conséquent, on peut dire que l'augmentation du niveau de flexibilité de routage a minimisé clairement le temps de cycle, malgré le caractère incertain et la complexité de la configuration physique du système, et la diversité des approches de routages des pièces qui ne réagissent pas de la même manière face au changement permanent de l'état du système. Ces observations nous permettent aussi de vérifier un autre avantage que peut offrir l'implémentation de la flexibilité de routage, qui est la minimisation du temps de cycle.

Le tableau 5.6 rapporte aussi les résultats obtenus par la méthode LSD concernant les en-cours pour l'effet flexibilité de routage, dans le cas sans présence de pannes. Ces résultats sont classés en deux groupes nommés a et b où RF_1 , qui est équivalent au niveau adopté précédemment, appartient à la classe b, qui conduit aux meilleures performances concernant les en-cours. En outre, on peut signaler que les niveaux RF_2 ou RF_3 forment le groupe a. Par conséquent, on peut dire que l'augmentation du niveau de flexibilité de routage mène à une augmentation des en-cours, en raison des contraintes citées précédemment et la présence de choix multiples à un niveau élevé de cette flexibilité, qui conduit à augmenter le nombre de pièces qui circulent à l'intérieur du système...

5.5. Analyse de l'effet de la flexibilité de routages et les règles de séquençement

Cette section a pour but d'analyser l'effet des décisions de séquençement de machines basées sur les règles de priorité et des niveaux de flexibilité de routage sur les performances du FMS étudié. L'une des motivations derrière cette étude est l'analyse des performances de ces heuristiques qui peuvent dépendre du système. Pour cela, il nous paraît intéressant d'avoir une idée sur le fonctionnement des règles de séquençement étudiées en cas de variation du comportement opérationnel du système, ainsi que sur leurs capacités à faire face aux événements qui surviennent dans la nouvelle situation. Un autre objectif de cette analyse est de dresser une comparaison entre les niveaux de flexibilité de routages considérés, lorsque le système décisionnel d'ordonnancement semble plus compliqué, et combine simultanément ces décisions de séquençement et l'approche *Reordo_pièces_en_cours*, dont l'efficacité en cas de changements de niveaux de flexibilité, a été démontrée par rapport aux autres algorithmes dans la section précédente.

Puisque le temps opératoire est supposé inconnu et suit une loi exponentielle, le mode de fonctionnement des règles étudiées qui l'utilisent comme un critère de priorité (les règles STOT, LTOT, SPT et LPT) est toujours basé sur ses valeurs moyennes pour les différentes opérations rapportées dans le tableau 5.1.

Afin de pouvoir atteindre ces objectifs, plusieurs simulations ont été proposées dans les mêmes conditions opératoires prises en compte dans les expérimentations précédentes, et de même pour l'algorithme adopté qui est configuré dans ces paramètres, qui ont été trouvés capables de diriger la recherche vers des solutions de routages satisfaisantes (la taille de la population = 8, w , C_1 , et C_2 prennent la valeur 0.5).

Pour qu'ils soient analysés correctement, les résultats de simulation obtenus sont soumis à une analyse statistique ANOVA basée sur des tests effectués à un seuil de signification de 5%. Les objectifs de cette étude peuvent justifier le choix des deux facteurs expérimentaux, qui sont la politique de séquençement (1) qui représente les cinq règles concernées par notre étude, et le niveau de flexibilité de routage (2) qui peut être l'un des trois niveaux (RFL_1 , RFL_2 ou RFL_3) qui représentent toujours les différents comportements définis dans la section 5.3.

Tableau 5.7 : Les valeurs F concernant les mesures de performances pour les effets politique de séquençement, niveau de flexibilité de routage et leur interaction

Présence de pannes	Les effets	Le taux de production	Le taux d'utilisation des machines T	Le taux d'utilisation du système de transport	Les en-cours	Le temps de cycle	Le point critique
Sans	1	75,20	95,10	75,17	0,022	1,21	2,44
	2	27486,06	39659,57	27474,83	138,02	13,65	3,06
	Interaction	12,79	20,76	12,77	0,25	0,3	2,01
Avec	1	9,83	8,09	9,85	0,09	2,51	2,44
	2	2196,87	2189,06	2197,28	24,70	142,84	3,06
	Interaction	1,2	1,47	1,2	0,04	0,78	2,01

Le tableau 5.7 rapporte les résultats fournis par la méthode ANOVA pour les différentes mesures de performances obtenus dans les deux scénarios sans et avec présence de pannes. En effet, ce tableau dresse des comparaisons entre les valeurs statistiques de F et leurs points critiques. De ces comparaisons, nous observons que la valeur statistique de F surpasse nettement son point critique pour l'effet niveau de flexibilité de routage ce qui prouve son impact significatif sur toutes les performances du système.

Tandis que, l'effet politique de séquençement des machines est trouvé important pour le taux de production, le taux d'utilisation des machines et de l'AGV, et ainsi même pour le temps de cycle évalué en cas de présence de pannes, mais il influe légèrement sur les en-cours et le temps de cycle lorsque les pannes ne sont pas prises en compte. On peut également noter l'importance de l'effet interaction sur la productivité du système et son utilisation évaluée en termes de celles des machines et du système de transport dans le scénario sans pannes.

Tableau 5.8 : Les résultats concernant l'effet de règles de séquençement sur le taux de production, d'utilisation des machines et de l'AGV

Scénario	Sans présence de pannes			Avec présence de pannes		
	Le taux de production	Le taux d'utilisation de machines	Le taux d'utilisation du système de transport	Le taux de production	Le taux d'utilisation de machines	Le taux d'utilisation du système de transport
SPT	83,67 a	58,43 a	38,61 a	79,44 a	55,5 a	36,65 a
STOT	82,70 b	57,75 b	38,16 b	78,54 b	54,97 b	36,24 b
FIFO	82,55 b	57,67 b	38,09 b	78,53 b	54,88 b	36,23 b
LTOT	82,58 b	57,69 b	38,10 b	78,43 b	54,88 b	36,19 b
LPT	81,9 c	57,31 c	37,79 c	77,71 c	54,42 c	35,85 c

Tableau 5.9 : Les résultats concernant l'effet de flexibilité de routage combinée avec plusieurs règles de séquençement sur la productivité et l'utilisation du système

Scénario	Sans présence de pannes			Avec présence de pannes		
	Le taux de production	Le taux d'utilisation des machines	Le taux d'utilisation du système de transport	Le taux de production	Le taux d'utilisation de machines	Le taux d'utilisation du système de transport
RFL ₃	90,2 a	62,64 a	41,61 a	84,07 a	58,71 a	38,79 a
RFL ₂	85,77 b	59,90 b	39,57 b	81,04 b	56,65 b	37,39 b
RFL ₁	72,08 c	50,53 c	33,25 c	70,49 c	49,43 c	32,52 c

Les tableaux 5.8 et 5.9 montrent respectivement les résultats fournis par la méthode LSD concernant le taux de production, l'utilisation moyenne des machines et le taux d'utilisation du système de transport, pour les effets politique de séquençement et niveau de flexibilité de routage. D'après le premier tableau qui dresse une comparaison entre les différentes règles de séquençement, nous pouvons remarquer que les résultats de chaque colonne sont répartis en trois groupes. Ceci confirme l'existence de différences significatives entre les valeurs liées à ces indicateurs de performances.

Comme il était montré dans les études précédentes la règle SPT qui forme le groupe a, s'est révélée la plus efficace en terme de ces trois mesures de performance. Par contre, la règle LPT reste toujours la moins performante malgré que ces approches aient été testées dans une variété de configurations fonctionnelles du système. Cela nous indique que la position de ces deux méthodes par rapport aux autres n'est pas sensible à l'ajout de machines alternatives ou de routages pour certaines pièces, malgré que cette modification du niveau de flexibilité influe sur la répartition de la quantité de travail à l'intérieur de l'atelier. Généralement, ces résultats ne sont pas étonnants en raison de leurs modes de fonctionnement qui favorisent respectivement les pièces dont le temps opératoire moyen est minimal ou maximal. Ceci conduit à accélérer le passage de certaines et retarder d'autres quelque soit le niveau de flexibilité adopté. En revanche, il n'est pas souligné de différences importantes entre les résultats fournis par les règles à portée globale STOT ou LTOT et la règle FIFO.

Tableau 5.10 : Les résultats concernant l'effet de règles de séquençement sur le temps de cycle

Scénario	Avec présence de pannes
Les règles de séquençement	Le temps de cycle
LPT	190,93 a
LTOT	187,68 ab
FIFO	187,63 ab
STOT	186,51 b
SPT	185,31 b

On peut également constater d'après le deuxième tableau, que l'implantation des règles de séquençement au niveau du processus décisionnel d'ordonnancement n'a pas influé sur le classement établi dans l'analyse précédente. Donc, malgré l'introduction de ces heuristiques qui ne réagissent pas de la même manière au niveau de la file d'entrée de chaque centre d'usinage, l'augmentation de la flexibilité de routages offre toujours l'avantage d'amélioration du taux de

production et de la gestion de l'effort. Ceci est dû à la bonne utilisation des différents équipements à cause de la minimisation de la congestion, l'absorption de la charge des machines goulots, la diversité des machines redondantes qui remplacent celles occupées ou ne sont pas en état de fonctionnement...

Le tableau 5.10 fournit les résultats concernant l'effet règles de séquençement avec variation du RFL obtenus par la méthode LSD pour le temps de cycle. Ces approches sont classées en deux groupes lorsque les pannes sont prises en compte. Puisqu' il est noté d'après le tableau 5.7 que cet effet n'a pas un impact significatif sur cet indicateur de performance dans le scénario sans pannes, ce cas n'est pas considéré dans cette partie de notre étude. De ce tableau, comme il était prévu et trouvé précédemment la règle SPT est apparue comme la meilleure pour réduire le temps de cycle, mais avec une différence légère par rapport à d'autres règles comme la règle STOT et FIFO. Cependant, la règle LPT ne semble pas efficace sur la base de cet indicateur. La seule interprétation que nous avons trouvée pour ces différences qui renforcent les conclusions précédentes, est liée à leurs façons de gérer les priorités des opérations.

Tableau 5.11 : Les résultats concernant l'effet flexibilité de routages combinée avec plusieurs règles de séquençement sur le temps de cycle et les en-cours

Présence de pannes	Sans	Avec	Sans	Avec
Le niveau de flexibilité de routages	Le temps de cycle	Le temps de cycle	Les en-cours	Les en-cours
RFL ₁	195,59 a	201,36 a	8,13 c	8,24 b
RFL ₂	190,79 b	183,47 b	9,53 b	8,60 a
RFL ₃	188,1 b	178 c	9,85 a	8,72 a

Le tableau 5.11 est consacré aux résultats concernant le temps de cycle et les en-cours obtenus par la méthode LSD dans les deux cas avec et sans présence de pannes, pour l'effet niveau de flexibilité de routage. Comme mentionné dans ce tableau, deux groupes étiquetés a et b sont formés pour le temps de cycle, dans le cas sans pannes. Tandis qu'il existe une troisième classe c dans l'analyse avec présence de pannes de machines ce qui confirme l'influence significative de la variation des paramètres opératoires du système en fonction des niveaux considérés dans cette étude, sur le temps de cycle. En plus, les classements sont pratiquement inchangés, la seule différence qu'on a noté semble être liée à la présence de pannes où le niveau RFL₃ surpasse RFL₂. Mais, cette conclusion renforce celle émise dans l'analyse antérieure, ce qui permet de déduire que malgré que le système décisionnel semble plus compliqué que le précédent, l'augmentation de la flexibilité de routage a répondu toujours au besoin d'améliorer le temps de cycle dans ce contexte caractérisé par plusieurs contraintes et incertitudes...

De ce tableau qui dresse également une comparaison basée sur les en-cours entre les différents niveaux concernés par notre étude, on peut noter l'existence de différences significatives entre les résultats obtenus pour chaque niveau. En plus, l'augmentation des valeurs de cet indicateur est remarquable pour le niveau RFL₃. Néanmoins, le niveau RFL₁ qui représente la configuration adoptée dans les travaux antérieurs mène au meilleur nombre des en-cours. Par conséquent, il est clair que l'augmentation de la flexibilité de routage a conduit à celle des en-cours.

De ces résultats, on peut aussi souligner l'inexistence d'un niveau capable d'améliorer tous les critères, en raison de la complexité du système, ses modes d'ordonnancement, son changement d'état dynamique et à très court terme...

5.6. Analyse de l'effet de règles de lancement et les niveaux de flexibilité de routage

Cette section met l'accent sur l'effet de la combinaison des décisions de lancement de pièces basées sur les règles de priorité étudiées, avec l'algorithme conçu à base des essais particuliers pour la prise en temps réel des décisions de routages de pièces et leurs révisions d'une façon événementielle en cas d'arrivée d'une nouvelle pièce. Cette analyse concerne les différentes configurations opératoires du système selon les niveaux de flexibilité de routage considérés en vue de savoir comment ces approches totalement réactives peuvent s'adapter aux changements profonds de leur environnement, et si leurs intégrations comme des stratégies de gestion des ordres de fabrication arrivés au système affectent les constats tirés des études comparatives dressées entre les différents niveaux adoptés.

À cet effet, en vue de vérifier si elles demeurent acceptables pour faire face aux fortes perturbations, malgré la complexité physique du système et la variation de son comportement, plusieurs études en simulation ont été effectuées sur la base des paramètres et conditions opératoires de l'étude précédente. Néanmoins, aucune approche de séquençement de machines n'est implantée, ceci indique que les pièces passent au traitement au niveau des centres d'usinage selon leurs ordres d'arrivée. Notons également que les approches de lancement étudiées qui utilisent le temps opératoire comme critère de décision, assignent les priorités aux pièces en fonction de ses valeurs moyennes.

Cette section est réservée à la présentation de certains résultats trouvés et comparés à base d'analyse statistique ANOVA utilisée pour étudier à un niveau de signification de 5% l'effet des facteurs expérimentaux, qui incluent la politique de lancement (1) et le niveau de flexibilité de routage (2). En plus, afin d'apporter une analyse plus fine des résultats, la méthode LSD est toujours utilisée pour dresser les différentes comparaisons multiples.

Tableau 5.12 : Les valeurs F concernant les mesures de performances pour les effets politique de lancement, niveau de flexibilité de routage et leur interaction

Présence de pannes	Les effets	Le taux de production	Le taux d'utilisation des machines T	Le taux d'utilisation du système de transport	Les en-cours	Le temps de cycle	Le point critique
Sans	1	131,74	177,22	131,55	1,58	2,22	2,44
	2	25341,49	33586,89	25309,03	10,73	123	3,06
	Interaction	18,67	24,09	18,63	1,29	0,066	2,01
Avec	1	9,75	8,8	9,76	0,47	1,38	2,44
	2	2367,64	2407,61	2367,95	23,48	164,27	3,06
	Interaction	1,64	1,73	1,65	0,25	2,21	2,01

Le tableau 5.12 synthétise les résultats obtenus par la méthode ANOVA dans les deux scénarios sans et avec présence de pannes. Nous pouvons remarquer dans ces tableaux que la valeur F statistique surpasse son point critique, pour l'effet politique de lancement des pièces évalué en termes du taux de production, et d'utilisation des machines et de l'AGV. Tandis que, les valeurs concernant les en-cours et le temps de cycle pour cet effet sont relativement inférieures à leurs seuils.

De ces constats, on peut dire que les règles de lancement n'affectent que la productivité et l'utilisation du système. Par contre, à partir des comparaisons liées au niveau de flexibilité de routage, on peut dire qu'il influe sur tous les indicateurs de performances mesurés dans les deux scénarios avec et sans considération de pannes. Il est aussi noté que l'interaction entre les deux effets est trouvée influençable sur le taux de production et d'utilisation des différents équipements, lorsque les pannes de machines ne sont pas prises en compte durant les simulations.

Tableau 5.13 : Les résultats concernant l'effet de règles de lancement sur le taux de production, d'utilisation des machines et de l'AGV

Scénario	Sans présence de pannes			Avec présence de pannes		
	Le taux de production	Le taux d'utilisation de machines	Le taux d'utilisation du système de transport	Le taux de production	Le taux d'utilisation de machines	Le taux d'utilisation du système de transport
STOT	83,59 a	58,33 a	38,57 a	79,38 a	36,62 a	55,47 a
LTOT	83,5 ab	58,33 a	38,52 ab	78,68 b	36,30 b	55,00 b
LPT	83,32 b	58,24 a	38,44 b	78,47 b	36,21 b	54,93 b
FIFO	82,55 c	57,67 b	38,09 c	78,53b	54,88 b	36,23 b
SPT	81,46 d	56,9 c	37,58 d	77,72 c	35,86 c	54,41 c

Les tableaux 5.13 et 5.14 rapportent respectivement les résultats fournis par la méthode LSD concernant le taux de production, l'utilisation moyenne des machines et le taux d'utilisation du système de transport pour les effets politique de lancement et le niveau de flexibilité de routage.

Tableau 5.14 : Les résultats concernant l'effet de flexibilité de routage combinée avec plusieurs règles de lancement sur la productivité et l'utilisation du système

Scénario	Sans présence de pannes			Avec présence de pannes		
	Le taux de production	Le taux d'utilisation de machines	Le taux d'utilisation du système de transport	Le taux de production	Le taux d'utilisation de machines	Le taux d'utilisation du système de transport
RFL ₃	90,63 a	63,21 a	41,81 a	84,11 a	58,72 a	38,81 a
RFL ₂	85,92 b	59,97 b	39,64 b	81,04 b	56,65 b	37,39 b
RFL ₁	72,10 c	50,49 c	33,27 c	70,52 c	49,45 c	32,54 c

À partir de ceux mentionnés dans le premier tableau, on peut remarquer que les résultats qui concernent l'effet de la stratégie de lancement sont distingués en plusieurs groupes, ceci peut facilement s'expliquer par la non égalité des performances obtenues par les règles adoptées. En effet, il existe des différences significatives entre celles conduites par certaines règles. Néanmoins, on peut noter que les performances d'autres règles sont très proches, ce qui justifie leur appartenance aux mêmes groupes.

Les résultats des expérimentations révèlent aussi que malgré l'augmentation des nombres de routages alternatifs pour les pièces et ceux des machines alternatives pour plusieurs opérations qui affectent le comportement et le contrôle de l'atelier étudié, la règle STOT est nettement la plus performante dans le scénario avec présence de pannes de machines. Elle maintient aussi ses performances élevées dans l'autre scénario mais avec une supériorité légère par rapport à la règle LTOT. En plus, nous remarquons que la règle SPT qui est une règle locale, est toujours la moins

efficace en termes de ces critères de performances. Ceci indique que donner la propriété élevée à la pièce, dont la moyenne du temps opératoire dans la première machine est minimale, reste insuffisant pour palier aux problèmes de congestion de l'atelier, qui surviennent tout au long du processus de traitement de pièces, malgré qu'on peut l'éviter au niveau des premières machines de routage qui représentent différents points de décisions de l'atelier.

En outre, le deuxième tableau est consacré à l'étude de l'effet de la variation du niveau de flexibilité de routage. Ce tableau montre toujours l'importance de l'incrémentation de niveau de flexibilité, en terme de la productivité et de l'utilisation du système, malgré le changement du processus décisionnel d'ordonnancement, qui intègre cette fois des heuristiques totalement réactives pour le lancement de pièces.

Tableau 5.15 : Les résultats concernant l'effet de flexibilité de routages combinée avec plusieurs règles de lancement sur le temps de cycle et les en-cours

Présence de pannes	Sans	Avec	Sans	Avec
Le niveau de flexibilité de routages	Le temps de cycle	Le temps de cycle	Les en-cours	Les en-cours
RFL ₁	194,92 a	200,62 a	8,17 c	8,24 b
RFL ₂	191,98 b	183,47 b	9,54 b	8,60 a
RFL ₃	188,26 c	178,13 c	9,87 a	8,72 a

Les résultats concernant le temps de cycle obtenus par la méthode LSD dans les deux scénarios avec et sans présence de pannes pour l'effet niveau de flexibilité de routage, sont montrés dans le tableau 5.15. Comme il est mentionné dans ce tableau, ces résultats sont classés en trois groupes dont chacun correspond à un niveau de flexibilité, ce qui montre l'influence significative de la variation des paramètres opératoires du système en fonction des niveaux considérés dans cette étude. En plus, leur ordre décroissant (temps de cycle (RFL₁) > temps de cycle (RFL₂) > temps de cycle (RFL₃)) confirme l'avantage apporté par l'introduction de nouveaux routages alternatifs, qui est la minimisation du temps de l'existence des pièces à l'intérieur du FMS, malgré le changement effectué sur les stratégies de l'ordonnancement intégrées au niveau de différents points de décisions.

Ce tableau rapporte également les résultats concernant l'effet de la flexibilité de routage sur les en-cours obtenus par la méthode LSD, dans les deux cas avec et sans présence de pannes de machines. En effet, les études comparatives dressées montrent que les différents niveaux forment trois groupes dans le cas sans pannes, et deux autres lorsque les pannes sont prises en compte. Comme il est attendu et démontré précédemment, le niveau RFL₁ conduit aux meilleurs en-cours. En outre, le niveau RFL₂ correspond à la seconde meilleure performance mais avec une petite amélioration par rapport au niveau RFL₃ dans le scénario avec panne. Par conséquent, on peut souligner que l'augmentation de la flexibilité de routage implique celle des en-cours ce qui n'est pas recommandée dans l'industrie.

5.7. Conclusion

La flexibilité de routage est un majeur contributeur de flexibilités implémentées au niveau des systèmes flexibles de production, pour répondre à leurs nécessités d'une façon adaptative, et en offrant un compromis entre la réactivité et la liberté de fonctionnement. Ceci est dû à la diversité de routages d'un côté, et la capacité de faire face à plusieurs événements inattendus d'un autre.

Devant les bienfaits et les avantages de sa mise en œuvre, ainsi que le fort besoin de trouver pour chaque configuration donnée le niveau de flexibilité approprié, tout au long de ce chapitre, notre objectif principal était d'analyser l'effet de sa variation sur les performances d'un FMS hypothétique. Ce système garde la configuration physique de celui étudié précédemment, mais en augmentant son niveau de flexibilité. Cette mise à jour de flexibilité était contrôlée par l'augmentation du nombre de machines supplémentaires pour certaines opérations et ainsi celui de routages alternatifs. En plus, à la base de ces conditions structurelles et fonctionnelles, notre second but consistait à savoir si le système décisionnel d'ordonnancement basé sur les essais particuliers et les règles de priorité, reste toujours performant dans ces nouvelles situations.

À cet égard, après avoir présenté les objectifs et les motivations derrière ce travail ainsi que le modèle FMS hypothétique, notre investigation sur la coopération entre les stratégies d'ordonnancement et la flexibilité de routages a été effectuée en trois parties. Chacune d'entre elles concerne respectivement la combinaison de chaque niveau avec les différentes approches de routages, de séquençement et de lancement, en vue de mieux analyser leurs performances dans chaque niveau. De cette étude un certain nombre de conclusions peuvent être faites. Nous résumons ici, l'essentiel :

- ✓ Les résultats obtenus ont montré que l'augmentation de la flexibilité de routage a conduit à des améliorations importantes des performances du système, en termes de l'augmentation de sa productivité et son utilisation évaluée par celle de ses équipements de manutention et d'usinage, et la minimisation du temps de cycle. Ces améliorations ont été contrebalancées par une dégradation des en-cours, qui peut s'expliquer par l'existence de plusieurs contraintes telles que la non disponibilité de l'AGV, les capacités limitées des machines et des tampons de stockages, les incertitudes comme la variation du temps opératoire et les pannes de machines, la présence des choix multiples à un niveau élevé ce qui complique la prise de décisions...
- ✓ Il était aussi signalé que malgré le changement du comportement fonctionnel du système dû à la variation des niveaux de flexibilité de routage, qui complique certainement le processus décisionnel, l'algorithme qui intègre les décisions de routages des pièces avec leurs révisions pour celles qui sont en cours de traitement a maintenu sa première place, à base du taux de production, d'utilisation des machines et de l'AGV mais avec une augmentation du temps de cycle et des en-cours.
- ✓ En plus, après des comparaisons faites entre les différentes approches de séquençement et de lancement, lorsque l'algorithme avec ré-ordonnancement des pièces en cours de traitement est adopté pour la sélection de routages alternatifs dans les différentes configurations opératoires, nous avons constaté que les meilleures règles ont gardé leurs premières places. Donc, il est toujours préférable d'utiliser la règle SPT pour assigner la priorité aux pièces contenues au niveau des files d'attente d'entrée des machines, et la règle STOT pour leur lancement au niveau de la station de chargement, afin de bénéficier de leurs avantages qui consistent à améliorer le taux de production et d'utilisation des différents équipements d'usinage et de transport, sans aucune dégradation signalée du temps de cycle et des en-cours.

Conclusion générale

Ce travail se situe dans le cadre de l'ordonnancement dans les systèmes flexibles de production. Nous nous sommes intéressés en particulier à ceux qui intègrent la flexibilité de routage. Ce type de flexibilité qui peut être trouvé, dans chaque système qui comprend des machines identiques, alternatives ou redondantes offre plusieurs avantages en balançant mieux les charges de machines, en permettant au système de continuer à fonctionner et de maintenir ses performances élevées malgré l'occurrence de certains événements inattendus tels que les pannes de machines... Ces bienfaits ont poussé plusieurs industriels à le prendre en compte lors de l'implémentation et la configuration des systèmes ce qui explique l'existence de nombreux travaux qui traitent les problèmes d'ordonnancement dans les FMS avec présence de cette flexibilité.

Pour notre part, nous avons mis l'accent sur la résolution de certains de ces problèmes dans un FMS qui se compose de sept machines, une station de chargement, une station de déchargement, et six types des pièces différentes. En raison de l'existence des centres d'usinage identiques dans ce système, les types de pièces ont des routages alternatifs. Son état est susceptible de changer en raison de plusieurs sortes d'incertitudes externes caractérisées par le non déterminisme des ordres de fabrications et internes liées aux pannes de machines et la variation des durées opératoires... En plus, les décisions d'ordonnancement considérées sont prises en terme de comment les pièces (les ordres de fabrication) arrivent au système (part launching decision), comment ces pièces sont routées vers les diverses machines alternatives, et le séquençement des pièces aux niveaux des files d'entrée des machines.

Parmi les conditions nécessaires pour tirer pleinement partie de la flexibilité offerte par ces systèmes, on trouve la prise, dynamiquement et à très court terme, de décisions d'allocation et d'ordonnancement d'opérations et de plans de processus en fonction de l'état du système de production, des objectifs de production... Pour ceci notre système décisionnel a été conçu pour répondre à cette contrainte donc capable de gérer l'atelier en temps réel. En effet, on a intégré des règles de priorité reconnues comme des approches réactives simples et capables de gérer en ligne la flexibilité de l'atelier, pour les décisions de lancement et de séquençement. Cinq politiques ont été donc adoptées, ce sont la règle FIFO qui n'affecte pas l'ordre d'arrivée des pièces, et d'autres qui utilisent le temps opératoire comme critère de priorité incluant en particulier deux à portée globale qui sont les règles STOT et LTOT et deux autres à portée locale qui sont les règles SPT et LPT. En raison de la complexité fonctionnelle et structurelle du FMS étudié, les méthodes exactes sont inutiles dans le processus de routage des pièces présenté, par un modèle mathématique décrivant l'état global du système. Il s'avère nécessaire d'utiliser des méthodes de types métaheuristiques pour le résoudre en un temps raisonnable. À cet égard, nous nous sommes intéressés dans cette contribution à une métaheuristique à population de solutions, dite les essais particuliers. Le succès de la démarche de résolution de nombreux problèmes d'optimisation difficile par cette métaheuristique, ne doit pas masquer la difficulté à laquelle est confronté l'utilisateur, en présence

d'un problème d'optimisation combinatoire. Un des algorithmes appliqués avec succès pour générer un ordonnancement efficace est celui proposé par Pan et al [Pan 05], [Pan 08a] basé sur des opérateurs génétiques qui semblent bien adaptés à notre problème de sélection de routage de pièces.

À cet effet, le travail présenté dans ce mémoire peut s'inscrire dans le croisement entre deux axes de recherche. Le premier est lié à la problématique mise en évidence qui est l'ordonnancement en temps réel dans les FMS. Le second axe concerne l'adaptation des métaheuristiques pour la résolution de l'un des problèmes classés comme NP- difficiles et pour lesquels ces techniques peuvent être appliquées efficacement pour atteindre des solutions de qualité satisfaisante.

Par conséquent, avant de passer à la contribution proprement dite, notre thèse comprend deux chapitres qui synthétisent un état de l'art sur les deux thématiques de recherche touchées. D'une part, le premier a permis d'exposer la problématique d'ordonnancement dans les systèmes flexibles de production, et de souligner quelques points essentiels sur: les systèmes flexibles de production, les problèmes d'ordonnancement de manière générale, la modélisation des problèmes d'ordonnancement dans les FMS, la notion d'ordonnancement dans un FMS avec flexibilité de routage... D'autre part, le deuxième a été consacré aux métaheuristiques. Donc, après avoir présenté d'une manière générale les métaheuristiques, en incluant leurs définitions, leurs domaines d'utilisation, leurs caractéristiques et leur classification, nous avons présenté les plus répondues, en s'intéressant plus particulièrement à leurs définitions, leurs origines et leurs algorithmes de base.

Ensuite, le troisième volet de ce manuscrit a été axé essentiellement sur l'adaptation d'un algorithme à base des essais particuliers pour les décisions de routages de pièces. Tout d'abord, la première partie de ce chapitre a présenté les caractéristiques du contexte du travail concerné par notre étude. Dans la deuxième, nous avons proposé dans un premier temps de nouvelles formulations mathématiques sous forme de programmes linéaires en nombres entiers pour la modélisation du problème et dans un second temps une résolution du problème de routages de pièces en temps réel basée sur un algorithme discret à base des essais particuliers. Puisqu'il est nécessaire d'évaluer ses performances, une framework software conçue pour analyser plusieurs métaheuristiques appliquées pour résoudre le problème de sélection de routages alternatifs dans différentes configurations de FMS a été développée et présentée dans la troisième section. Puis, les trois sections restantes ont concerné respectivement l'étude de sa sensibilité à la variation de ses paramètres, son interaction avec les différentes décisions de séquençement de machines et de lancement de pièces basées sur les règles de priorité, mais en supposant que le temps opératoire est déterministe ce qui existe rarement en pratique. Tout au long de ce travail, les études expérimentales ont été évaluées en termes du taux de production, du taux d'utilisation des machines et de l'AGV, des encours et du temps de cycle. La première expérimentation nous a permis d'identifier son jeu de paramétrages qui conduit à des solutions de bonne qualité. Alors, nous avons constaté qu'une taille de population qui vaut 16 est assez suffisante pour bien explorer l'espace de solutions, les valeurs recommandées des paramètres comportementaux (w , C_1 et C_2) sont fixées à 0.5 pour chacun. La deuxième étude nous a montré qu'il est préférable de combiner l'algorithme à base des essais particuliers proposé avec les décisions de séquençement de pièces basées sur la règle SPT afin de pouvoir gagner en terme de taux de production et d'utilisation des différents équipements sans perte en terme de temps de cycle et d'encours. Tandis que, la règle STOT a été trouvée la plus performante pour le lancement des pièces en offrant une amélioration de la productivité et de l'utilisation du système sans aucune augmentation du temps de cycle, mais elle conduit à des encours plus importants.

Pour compléter l'étude de notre système, les incertitudes sur les durées opératoires ont été prises en compte dans l'étape suivante en plus de celles considérées précédemment liées à la variété des commandes, et les pannes de machines. Cette fois-ci, leurs valeurs suivent une loi exponentielle, très utilisée pour la modélisation des fortes perturbations qui peuvent affecter significativement les performances du système en raison de la modification de l'occupation et la disponibilité des machines, décalage des dates de début de plusieurs opérations, changement dans la séquence de réalisation... Afin de faire face à cette situation, l'algorithme à base des essais particuliers proposé a été amélioré en intégrant avec le processus de sélection de routages des premières pièces qui attendent l'entrée au système, une stratégie de ré-ordonnancement ou de réaffectation des routages aux pièces contenues dans la station de chargement, dans les tampons de sortie de différentes machines ou en fin de traitements, à chaque nouvelle arrivée d'une pièce au système. À cet effet, après un bref aperçu sur l'ordonnancement sous incertitudes, la deuxième section du chapitre 4 a été consacrée à la présentation de cet algorithme en deux étapes, la première a mis en évidence l'intérêt de mettre à jour en temps réel les routages de certaines pièces et a présenté la stratégie de ré-ordonnancement en présentant quand et comment ré-ordonnancer. En outre, la deuxième a été réservée à la description de son adaptation au problème posé. Après une identification de son meilleur paramétrage qui n'a pas été trouvé différent de celui du précédent sauf pour le seuil de sa taille de la population qui vaut 8, son efficacité a été ensuite confirmée par simulation sur la base de l'algorithme développé précédemment et un autre algorithme à base d'OEP [Souier 12b] qui intègre un mécanisme de ré-ordonnancement des pièces de la station de chargement. Les résultats ont montré clairement l'amélioration de la productivité du système et de son utilisation évaluée par celles de ses équipements d'usinage et de son système de transport mais il a influé négativement sur le temps de cycle et les encours en raison de plusieurs caractéristiques dynamiques, stochastiques et structurelles de cet FMS qui sont devenues un obstacle devant l'amélioration de tous les critères. Enfin, des études expérimentales effectuées dans le but d'analyser son interaction avec les décisions de séquençement et de lacement, ont permis de constater que les règles SPT et STOT ont maintenu leurs premières places, lorsqu'elles ont été respectivement adoptées pour assigner les priorités aux pièces existantes dans les files d'entrée des machines ou au niveau de la station de chargement.

Enfinement, afin de pouvoir analyser l'effet de la variation des niveaux de flexibilité de routage sur les performances du système auquel elles sont implantés et de trouver des conclusions générales sur l'efficacité des approches proposées, nous avons proposé dans le dernier chapitre d'aborder le problème avec plusieurs configurations de l'atelier en variant les niveaux de flexibilité de routages. Tout d'abord, ce chapitre a été réservé à la présentation des objectifs et des motivations derrière cette analyse suivie d'une description du modèle FMS hypothétique développé à base du modèle précédent et dont le nombre de routages alternatifs dépend du niveau de la flexibilité adopté. Ensuite, l'impact du changement de la configuration opératoire selon ces niveaux a été ensuite investigué en trois étapes dont chacune correspond à la combinaison de chaque niveau avec les différentes approches de routages, de séquençement et de lancement. Ces investigations ont démontré les avantages apportés par l'augmentation de la flexibilité de routage, qui a conduit à celles de la productivité du système et de l'utilisation de ses équipements de manutention et d'usinage, de la réduction du temps de cycle mais avec une augmentation des encours. Nous avons aussi souligné que l'efficacité des meilleures approches de routages, de séquençement ou de lancement a été maintenue malgré le changement de comportement fonctionnel du système dû à la variation des niveaux de flexibilité de routage.

➤ Perspectives

L'ordonnancement en temps réel est un domaine qui reste ouvert, et dont l'importance ne cesse de croître. En plus, notre travail doit être approfondi et enrichi pour proposer d'autres solutions pratiques à ces problèmes dans les systèmes flexibles de production. Donc, il existe de nombreux champs d'investigations qu'il faudra explorer comme perspectives au présent travail :

- **L'utilisation des métaheuristiques hybrides**

Il est reconnu dans la littérature que l'efficacité des métaheuristiques varie d'un critère à un autre ou d'une configuration à une autre. Ainsi, une métaheuristique peut améliorer les performances par rapport à un critère donné et peut, en même temps, conduire à de mauvais résultats pour un autre critère ou une autre instance.

De plus, ces techniques partagent l'avantage qu'elles se prêtent à toutes sortes d'extensions. Mais il est souvent impossible de prévoir avec certitude l'efficacité de chacune d'entre elles quand elle est appliquée. Donc, les métaheuristiques hybrides qui s'efforcent de tirer partie des avantages spécifiques de métaheuristiques différentes en les combinant peuvent améliorer les performances de notre système.

- **Combinaison avec des approches de sélection dynamique des règles de priorités**

Il existe un grand nombre de règles de priorité utilisées dans la recherche et dans l'industrie. Les règles utilisées dans ce travail sont parmi les plus connues...

Durant notre travail, nous avons choisi une seule règle à la fois pour le séquençement de chaque machine ou de lancement de pièces, or l'efficacité des règles de priorité dépend étroitement des critères de performance évalués et des conditions opératoires de l'atelier qui sont susceptibles de changer au cours du temps... Ainsi, nous suggérons de combiner les algorithmes proposés pour une sélection de routages alternatifs en temps réel avec des approches de sélection dynamique des règles de priorités, en permettant au système de choisir ou modifier la règle appropriée à une situation donnée, à l'aide par exemple de la simulation, des techniques issues de l'intelligence artificielle...

- **L'utilisation des autres coefficients ou fonctions objectifs**

Dans notre travail, en utilisant la métaheuristique étudiée nous avons équilibré les quantités des travaux des routages en terme de temps opératoire (maximiser le produit des quantités des travaux des routages), pour DMM, et DMM modifiée la dissimilitude entre les routages occupés a été maximisée, nous avons réussi à développer dans [Souier 12a] un autre coefficient basé sur les probabilités d'occurrences de pannes. Mais, nous n'avons aucune garantie que ceux utilisés sont optimaux. L'effet des autres coefficients pourra donc être considéré dans les futurs travaux, en les analysant un par un ou en combinant deux ou plusieurs coefficients tels que le nombre et les séquences d'opérations, le nombre de pièces...

- **La prise en compte des problèmes de chargement de machines et la flexibilité de la séquence**

Dans ce travail, malgré la prise en compte des incertitudes sur le temps opératoire, nous avons supposé que sa valeur moyenne est identique sur les machines alternatives identifiées pour une opération donnée et intègre le temps d'installation, le temps de changement des outils... Alors, qu'en réalité ces temps sont dépendants de plusieurs contraintes telles que celles liées à la séquence, l'efficacité des machines, la disponibilité des outils... En plus, si la flexibilité de séquence existe

dans le système, elle permet de modifier l'ordre des opérations d'une pièce donnée ce qui influe clairement sur les durées des traitements. Or, les algorithmes de routages basés sur ce critère, peuvent ne pas être efficaces dans ces nouvelles situations. À cet effet, nous proposons d'aborder le problème sur une ou plusieurs configurations en tenant compte de ces contraintes de chargement de machines, de changements dans les séquences, de variation des temps opératoires d'une machine à l'autre...

- **L'adoption des approches à paramétrage en ligne**

Un des inconvénients que partagent les métaheuristiques est le défaut de nécessiter du réglage de plusieurs paramètres de contrôle et ainsi la sensibilité de fonctionnement de chacune d'entre elles à son jeu de paramètres. Dans ce travail, une analyse de sensibilité a été faite pour chaque algorithme, mais les paramètres ont été fixés au début de chaque simulation sans être modifiés. Alors, que nos études ont montré que l'état du système peut changer rapidement et à très court terme ce qui peut affecter l'efficacité des approches conçues. Pour faire face à ces problèmes, il pourra être intéressant de proposer des algorithmes adaptatifs qui utilisent moins de paramètres et aussi capables de mettre à jour leurs comportements ou structures d'une façon continue durant le processus de recherche et à chaque changement du problème posé, au lieu d'utiliser des paramètres dont les valeurs sont figées.

Annexe

Abréviations (ordre alphabétique)

ACO	Ant colony optimisation
AGV	Automated guided vehicle
ANOVA	The analysis of variance
AS	Ant system
CF	Cellule flexible
DMM	Dissimilarity maximisation method
E	File d'attente d'Entrée.
EL	Étau limeur
EPL	Equal probability loading
FA	First available
FH	Fraiseuse horizontale
FIFO	First in First out
FJSP	Flexible job shop problem
FMC	Flexible manufacturing cell
FMS	Flexible manufacturing system
FV	Fraiseuse verticale
GA	Genetic algorithms
GF	Groupe flexible
HIMS	Highly informative manufacturing system
LF	Ligne flexible
LPT	Longest Processing Time
LSD	Least significant difference
LTOT	Longest Total Operation Time
MCFMS	Multi-cell flexible manufacturing system
MF	Machine flexible
MFP	Module flexible de production
MMFMS	Multi-machine flexible manufacturing systems

MOCN	Machines outils à commande numérique
MTBF	Mean time between failures
MTTR	Mean time to repair
NINQ	Number In Next Queue
NP	Non polynomial
OEP	Optimisation par essais particulières
OF	Ordres de fabrication
P	polynomial
PL	Programmation linéaire
PSO	Particle swarm optimisation
RF	Routing flexibility
RFL	Routing flexibility level
S	File d'attente de sortie.
SA	Simulated annealing
SC	Station de chargement
SD	Station de déchargement
SFM	Single flexible machine
SFP	Système flexible de production
SMA	Système multi agent
SPT	Shortest processing time
STOT	Shortest Total Operation Time
SWINQ	Smallest Work In Next Queue
T	Tour
TS	Taboo search
WINQ	Work In Next Queue

Variables et symboles les plus importants

C_1	Coefficient cognitif
C_2	Coefficient social
C_i	Quantité du travail du routage i
E	Énergie
f	Fonction objectif
F	Statistique du teste ANOVA

F_1	Opérateur de modification
F_2 et F_3	Opérateurs de croisements
g	Une fonction obtenue à partir de la fonction objectif
$L_k(t)$	Longueur de la tournée effectuée par la fourmi k à l'itération t
M	Nombre des machines
N	Nombre de pièces
N_i^k	Liste des successeurs de la ville i visités par la fourmi k
NO	Nombre des voisins utilisés dans la méthode tabou
P	Problème d'optimisation
p_g ou G	Meilleure solution trouvée par l'essaim
p_i	Meilleure solution de la particule i à la génération courante
P_{jk}	Temps restant de la pièce j dans la machine k
Q	Nombre de routages
r_1 et r_2	Coefficients d'accélération
S	Espace de recherche
S_l	Ensemble de villes
T	Température
$Tournée_k(t)$	Trajet effectué par la fourmi k à l'itération t
$V(s)$	Ensemble des voisins de s
$v_i(t)$	Vélocité de la particule i à l'itération t
V_{max}	Vitesse maximale
w	Probabilité de modification ou le coefficient d'inertie
$X_i(t)$	Position de la particule i à l'itération t
X_{ij}	Indique si la pièce j est sur le routage i
Y_{ik}	Indique si le routage i contient la machine k
α, β	Paramètres contrôlant l'importance de la trace de phéromone et à la visibilité
ΔE	Variation de l'énergie
$\Delta\tau_{ij}(t)$	Quantité de phéromone déposée sur l'arrêt i, j à l'itération t
$n_{ij}(t)$	Visibilité de la piste i, j jusqu' à l'itération t
ρ	Taux d'évaporation
$\tau_{ij}(t)$	Intensité de la piste i, j jusqu' à l'itération t
Ω	Ensemble de contraintes

Méthodes d'analyses statistiques

Dans cette partie de l'annexe, nous allons éclaircir certaines notions sur les méthodes : analyse de la variance (ANOVA (ANalysis Of VAriance)), et least significant difference (LSD), afin de permettre au lecteur qui ne connaît pas ces deux méthodes d'avoir une idée sur leurs utilités. Pour des études complètes, le lecteur pourra se référer aux livres ou articles liées à l'analyse de données, aux statistiques,...

● Modèle de l'analyse de variance

L'analyse de la variance peut être vue comme un test de comparaisons multiples, utilisée pour comparer plusieurs groupes quant à leur moyenne. Il existe plusieurs variantes de cette méthode qui se distinguent par le nombre de facteurs étudiés (un facteur, deux facteurs, deux facteurs avec répétitions, etc), leurs natures (facteur qualitatif ou facteur quantitatif) et la nature des modalités de chaque facteur (modèle fixe, modèle aléatoire, modèle mixte). Parmi les facteurs étudiés dans notre thèse, on peut citer l'état du système, les règles de décisions, les paramètres de la métaheuristique.

Le modèle le plus simple est celui avec un seul facteur qui affecte les résultats à analyser. En effet, l'analyse de variance à un seul facteur, permet de tester l'effet d'un facteur contrôlé A ayant k modalités sur les moyennes d'une variable quantitative. Chaque groupe caractérisé par une modalité de n observations.

Dans chaque analyse, on peut distinguer deux hypothèses :

- ✓ L'hypothèse nulle qui signifie qu'il n'y a pas d'effet du facteur A et les k moyennes sont égales.

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_i = \dots = \mu_k$$

- ✓ L'hypothèse alternative est la suivante qui désigne le cas où il y a un effet du facteur A et il existe au moins deux moyennes significativement différentes.

$$H_1 : \exists i, j : \mu_i \neq \mu_j$$

Ainsi il existe une différence entre les moyennes de la variable selon les modalités du facteur contrôlé.

Notation :

SS_T : somme des écarts totaux ou variation totale.

SS_E : somme de la variation qui provient de l'erreur à l'intérieur des traitements.

SS_{TR} : somme de la variation qui provient du traitement.

α : niveau de signification. Dans notre thèse, sa valeur a été fixée à 0,05.

Pour confronter H_0 et H_1 la statistique du test $F_0 = (SS_{TR}/k - 1)/(SS_E/n * k - k)$ est comparé avec son point critique (la valeur $F^{1-\alpha}(k-1, n*k - k)$). De cette comparaison, on peut distinguer deux cas, si la valeur F est supérieure à son point critique, l'hypothèse nulle sera rejetée et on peut dire qu'il existe des différences significatives entre les moyennes trouvées, sinon elle sera acceptée.

Selon le problème étudié, l'analyse de la variance peut être étendue à deux ou plusieurs facteurs, où on peut analyser l'effet de chaque facteur sur les résultats obtenus, d'interaction entre les différents effets,...

- **Least significant difference (LSD)**

Le test ANOVA permet de vérifier les deux hypothèses précédentes c-à-d l'existence ou non des différences significatives entre les moyennes trouvées. Par contre, en cas où l'hypothèse nulle est rejetée, la méthode ANOVA n'offre pas la possibilité de déterminer les moyennes qui sont différents des autres. La méthode LSD est parmi les techniques proposées pour effectuer des comparaisons deux à deux entre les moyennes obtenues. Son principe est basé sur le calcul de la différence minimale sur la base du niveau de signification, la taille de chaque échantillon,... Ensuite, on effectue des comparaisons deux à deux entre les différentes moyennes. L'existence de différences significatives entre deux valeurs ne peut avoir lieu que si leur différence dépasse la valeur minimale de différences, sinon ses valeurs font parties des mêmes groupes.

Références bibliographiques

- [Aanen 93] Aanen, E., Gaalman, G. J. and Nawijn, W.M. (1993). A scheduling approach for a flexible manufacturing system. *International Journal of Production Research*, 31(10), 2369-2385.
- [Adams 88] Adams, J., Balas, E. and Zawack, D., (1988). The shifting bottleneck procedure for job-shop scheduling. *Management Science*, 34(3), 391-401.
- [Ahkioon 09] Ahkioon, S., Bulgak, A.A. and Bektas T. (2009). Cellular manufacturing systems design with routing flexibility, machine procurement, production planning and dynamic system reconfiguration. *International Journal of Production Research*, 47(6), 1573-1600.
- [Akturk 99] Akturk, M. S. and Gorgulu, E. (1999). Match-up scheduling under a machine breakdown. *European Journal of Operational Research*, 112(1), 81-97.
- [Akyol 07] Akyol, D.E. and Araz, O.U. (2007). A Neural Network Based Decision Support System for Real-Time Scheduling of Flexible Manufacturing Systems. *Book chapter in: Operations Research Proceedings 2007*, book series: *Operations Research Proceedings Volume 2007, Part IV*, 83-88.
- [Albey 11] Albey, E. and Bilge, Ü. (2011). A hierarchical approach to FMS planning and control with simulation based capacity anticipation. *International Journal of Production Research*, 49(11), 3319-3342.
- [Ali 05] Ali, M. and Wadhwa, S. (2005). Performance analysis of partial flexible manufacturing systems. *Global Journal of Flexible Systems Management*, 6(1), 9-19.
- [Ali 10] Ali, M. and Wadhwa, S. (2010). The effect of routing flexibility on a flexible system of integrated manufacturing. *International Journal of Production Research*, 48(19), 5691-5709.
- [Anghinolfi 09] Anghinolfi, D. and Paolucci, M. (2009). A new discrete particle swarm optimization approach for the single-machine total weighted tardiness scheduling problem with sequence-dependent setup times. *European Journal of Operational Research* 193 (1) 73–85.
- [Artigues 02] Artigues, C., Briand, C., Portmann, M-C and Roubellat, F. (2002). Pilotage d'atelier basé sur un ordonnancement flexible. *Chapitre de livre dans: Méthodes du pilotage des systèmes de production, sous la direction de Pujol, P. et Kiefer, J-P. Traité IC2.- Information, commande, communication, Série productique, Editions Hermes*, 61-97.
- [Aryanezhad 09] Aryanezhad, M. B., Deljoo, V. and Mirzapour Al-e-hashem, S. M. J. (2009). Dynamic cell formation and the worker assignment problem: a new model. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 41(3-4), 329-342.
- [Aytug 05] Aytug, H., Lawley, M. A., McKay, K., Mohan, S. and Uzsoy, R. (2005). Executing production schedules in the face of uncertainties: A review and some future directions. *European Journal of Operational Research*, 161 (1), 86-110.
- [Azem 10] Azem, S. (2010). Ordonnancement des systèmes flexibles de production sous contraintes de disponibilité des ressources, *Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne, France*.

- [Babu 10]** Babu, A.G., Jeralda, J., Noorul Haqa, A., Muthu Luxmia, V. and Vigneswaralua, T.P. (2010). Scheduling of machines and automated guided vehicles in FMS using differential evolution. *International Journal of Production Research*, 48(16), 4683-4699.
- [Badr 10]** Badr, I., Schmitt, F. and Göhner, P. (2010) Integrating Transportation Scheduling with Production Scheduling for FMS: An Agent-Based Approach. *IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, 2010, 3539-3544.
- [Baker 74]** Baker, K.R. (1974). Introduction of sequencing and scheduling. *Wiley, New York, Etats unis*.
- [Balogun 99]** Balogun, O.O., Popplewell, K. (1999). Toward the integration of flexible manufacturing system scheduling. *International Journal of Production Research*, 37(15), 3399-3428.
- [Banks 07]** Banks, A., Vincent, J. and Anyakoha, C. (2007). A review of particle swarm optimization. Part I: background and development. *Natural Computing*, 6, 467-484.
- [Banks 08]** Banks, A., Vincent, J. and Anyakoha, C. (2008). A review of particle swarm optimization. Part II: hybridisation, combinatorial, multicriteria and constrained optimization, and indicative applications. *Natural Computing*, 7, 109-124.
- [Basnet 94]** Basnet, C. and Mize, J. H. (1994). Scheduling and control of flexible manufacturing systems: a critical review. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 7(6), 340-355.
- [Belfares 07]** Belfares, L., Klibia, W., Loa, N. and Guitounia, A. (2007). Multi-objectives Tabu Search based algorithm for progressive resource allocation. *European Journal of Operational Research*, 177 (3), 1779-1799.
- [Bellman 82]** Bellman, R. E., Esogbue, A. O. and Nabeshima, I. (1982). Mathematical Aspects of Scheduling and Applications, *Pergamon, UK*.
- [Ben Hmida 09]** Ben Hmida Sakly, A. (2009). Méthodes arborescentes pour la résolution de problèmes d'ordonnancement flexible. *Thèse de doctorat, Université de Toulouse, France*.
- [Ben Othman 09]** Boukef Ben Othman H. (2009). Sur l'ordonnancement d'ateliers job-shop flexibles et flow-shop en industries pharmaceutiques Optimisation par algorithmes génétiques et essais particuliers. *Thèse de doctorat délivré conjointement par l'École Centrale de Lille et l'École Nationale d'Ingénieurs de Tunis*.
- [Benbouzid 05]** Benbouzid Sitayeb, F. (2005). Contribution à l'étude de la performance et de la robustesse des ordonnancements conjoints production/maintenance– cas du Flow Shop. *Thèse de doctorat, L'UFR des Sciences et Techniques de l'Université de Franche-Comté, France*.
- [Benjaafar 93]** Benjaafar, S. and Ramakrishnan, R (1993). The effect of routing and machine flexibility on performance of manufacturing systems. *Second Industrial Engineering Research Conference Proceedings*, 445-450.
- [Berchet 00]** Berchet, C. (2000). Modélisation pour la simulation d'un système d'aide au pilotage industriel. *Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, France*.
- [Bernardo 92]** Bernardo, J. and Mohamed, Z. (1992). The measurement and use of operational flexibility in the loading of flexible manufacturing systems. *European Journal of Operational Research*, 60(2), 144-155.
- [Bessenouci 12]** Bessenouci, H.N., Sari, Z. and Ghomri, L. (2012). Metaheuristic based control of a flow rack automated storage retrieval system. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 23(4), 1157-1166.

- [**Bilge 08**] Bilge, Ü., Firat, M. and Albey, E. (2008). A parametric fuzzy logic approach to dynamic part routing under full routing flexibility. *Computers and Industrial Engineering*, 55(1), 15-33.
- [**Billaut 05**] Billaut, J.C., Moukrim, A. et Sanlaville, E. (2005). Introduction à la flexibilité et à la robustesse en ordonnancement. *Chapitre de livre dans: Flexibilité et Robustesse en Ordonnancement, sous la direction de Billaut, J-C., Moukrim, A. et Sanlaville, E., Traité IC2.-Information, commande, communication, Série informatique et systèmes d'information, Editions Hermes, 2005, 15-34.*
- [**Birbil 03**] Birbil, S.I., and Fang, S., (2003). An Electromagnetism-like Mechanism for Global Optimization. *Journal of Global Optimization*, 25 (3), 263-282.
- [**Biswas 08**] Biswas, S., Mahapatra, SS. (2008). Modified particle swarm optimization for solving machine loading problem in flexible manufacturing systems. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 39(9-10), 931-942.
- [**Blum 03**] Blum, C. and Roli, A. (2003). Metaheuristics in combinatorial optimization: Overview and conceptual comparison. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 35 (3), 268-308.
- [**Blum 05**] Blum, C., Roli, A. and Alba, E. (2005). An Introduction to Metaheuristic Techniques. *Book chapter in: Parallel Metaheuristics: A New Class of Algorithms, Edited by E. Alba, Wiley series on parallel and distributed computing, John Wiley & Sons, 1-42.*
- [**Blum 08**] Blum, C., Roli, A. (2008). Hybrid Metaheuristics: An Introduction. *Book chapter in: Hybrid Metaheuristics An Emerging Approach to Optimization, Edited by Blum, C., Aguilera, M. J. B., Roli, A. and Sampels, M., Studies in Computational Intelligence, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1-30.*
- [**Bonfill 06**] Bonfill, A., (2006). Proactive management of uncertainty to improve scheduling robustness in process industries. *A thesis submitted for the degree of Doctor, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, Spain.*
- [**Brandimarte 99**] Brandimarte, P. and Villa, A. (1999). Modelling manufacturing systems: from aggregate planning to real-time control. *Springer Berlin.*
- [**Brauner 05**] Brauner, N., Castagna, P., Espinouse, M-L., Finke, G., Lacomme, Ph., Martineau, P., Moukrim, A., Soukhal, A., Tacquard, C. et Tchernev, N. (2005). Ordonnancement dans les systèmes flexibles de production. *Journal Européen des Systèmes Automatisés*, 39(8), 925-964.
- [**Brautigam 03**] Brautigam, J., Esche, C. et Mehler-Bicher, A. (2003). Uncertainty as a key value driver of real options. *Proceedings of the annual international conference on real options, <http://www.realoptions.org/papers2003/BraeutigamUncertainty.pdf>.*
- [**Browne 84**] Browne, J., Dubois, D., Rathmill, K., Sethi, S. P., and Stecke, E. (1984). Classification of flexible manufacturing systems. *FMS Magazine*, 2, 114-117.
- [**Buyurgan 06a**] Buyurgan, N. and Mendoza, A. (2006). Performance-based dynamic scheduling model for flexible manufacturing systems. *International Journal of Production Research*, 44(7), 1273-1295.
- [**Buyurgan 06b**] Buyurgan, N. and Saygin, C. (2006). An integrated control framework for flexible manufacturing systems. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 27(11-12), 1248-1259.
- [**Buyurgan 08**] Buyurgan, N. and Saygin, C. (2008). Application of the analytical hierarchy process for real-time scheduling and part routing in advanced manufacturing systems. *Journal of Manufacturing Systems*, 27(3), 101-110.
- [**Byrkett 88**] Byrkett, D. L., Ozden, M. H. and Patton, J. M. (1988). Integrating flexible manufacturing systems with traditional manufacturing, planning, and control. *Journal of Production and Inventory Management*, 29, 15-21.

- [**Cai 07**] Cai, X., Wang, L. and Zhou, X. (2007). Single-machine scheduling to stochastically minimize maximum lateness. *Journal of Scheduling*, 10(4-5), 293-301.
- [**Cakar 05**] Cakar, T. and Yildirim, M.B. (2005). A neuro-genetic approach to design and planning of a manufacturing cell. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 16(4-5), 453-462.
- [**Caprihan 06**] Caprihan, R., Kumar, A. and Stecke, K.E. (2006). A fuzzy dispatching strategy for due-date scheduling of FMSs with information delays. *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, 18(1), 29-53.
- [**Caprihan 97**] Caprihan, R. and Wadhwa, S. (1997). Impact of Routing Flexibility on the Performance of an FMS—A Simulation Study. *The International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, 9 (3), 273-298.
- [**Carlier 88**] Carlier, J. etChrétienne, P. (1988). Problèmes d'ordonnancement : modélisation / complexité / algorithmes. *Masson*.
- [**Carter 86**] Carter, MF. (1986). Designing flexibility into automated manufacturing systems. *Proceedings of the second ORSA/TIMS conference on flexible manufacturing systems: operations research models and application*, 107-118.
- [**Chaari 10**] Chaari, T. (2010). Un algorithme génétique pour l'ordonnancement robuste: application au problème du flow shop hybride. *Thèse de doctorat, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, France*.
- [**Chan 01**] Chan, F.T.S., (2001). The effects of routing flexibility on a flexible manufacturing system. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 14(5), 431-445.
- [**Chan 02**] Chan, F. T. S., Chan, H. K. and Lau, H. C. W. (2002). The State of the Art in Simulation Study on FMS Scheduling: A Comprehensive Survey. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 19(11), 830-849.
- [**Chan 03a**] Chan, F. T. S. (2003). Effects of Dispatching and Routeing Decisions on the Performance of a Flexible Manufacturing System. *The International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, 21(5), 328-338.
- [**Chan 03b**] Chan, F. T. S., Chan, H. K. and Kazerooni, A. (2003). Real time fuzzy scheduling rules in FMS. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 14(3-4), 341-350.
- [**Chan 04a**] Chan, F.T.S. and Chan, H. K. (2004). A comprehensive survey and future trend of simulation study on FMS scheduling. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 15(1), 87- 102.
- [**Chan 04b**] Chan, F.T.S. (2004). Impact of operation flexibility and dispatching rules on the performance of a flexible manufacturing system. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 24(5-6), 447-459.
- [**Chan 06**] Chan, F. T. S., Bhagwat, R. and Wadhwa, S. (2006). Increase in flexibility: productive or counterproductive? A study on the physical and operating characteristics of a flexible manufacturing system. *International Journal of Production Research*, 44(7), 1431-1445.
- [**Chan 07**] Chan, F.T.S., Bhagwat, R. and Wadhwa, S. (2007). Flexibility performance: Taguchi's method study of physical system and operating control parameters of FMS. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 23(1), 25-37.
- [**Chan 08a**] Chan, F.T.S., Bhagwat, R. and Wadhwa, S., (2008). Comparative performance analysis of a flexible manufacturing system (FMS): a review-period-based control. *International Journal of Production Research*, 46(1), 1-24.
- [**Chan 08b**] Chan, F. T. S., Lau, K. W., Chan, L. Y. and Lo, V. H. Y. (2008). Cell formation problem with consideration of both intracellular and intercellular movements. *International Journal of Production Research*, 46(10), 2589-2620.

- [**Chan 10**] Chan, F.T.S., Chab, A., Mohan, V., Arora, V. and Tiwari, MK. (2010). Operation allocation in automated manufacturing system using GA-based approach with multifidelity models. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 26(5), 526-534.
- [**Chang 07**] Chang, A-Y. (2007). On the measurement of routing flexibility: a multiple attribute approach. *International Journal of Production Economics*, 109(1-2), 122-136.
- [**Chang 09**] Chang, C.C., Tseng, H.E. and Meng, L.P. (2009). Artificial immune systems for assembly sequence planning exploration. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 22 (8), 1218-1232.
- [**Chatterjee 84**] Chatterjee, A., Cohen, M.A., Maxwell, W.L., Miller, L.W. (1984). Manufacturing flexibility: Models and measurements. *Proceedings of the First ORSA/TIMS Special Interest Conference on Flexible Manufacturing Systems: Operations Research Models and Applications*, Ann Arbor, MI, 49-64.
- [**Chen 05**] Chen, J. H. and Ho, S.Y. (2005). A novel approach to production planning of flexible manufacturing systems using an efficient multi-objective genetic algorithm. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 45(7-8), 949-957.
- [**Chung 89**] Chung, C.H. and Chen, I.J. (1989). A systematic assessment of the value of flexibility for an FMS. *Proceedings of the third ORSA/TIMS conference on flexible manufacturing systems: operations research models and applications*, 27-32.
- [**Clerc 02**] Clerc, M. and Kennedy, J. (2002). The particle swarm: explosion, stability, and convergence in multi-dimensional complex space. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 6(1), 58-73.
- [**Clerc 04**] Clerc, M. et Siarry, P. (2004), Une nouvelle métaheuristique pour l'optimisation difficile: la méthode des essais particuliers, *J3eA*, Vol. 3-7, (2004).
- [**Cooren 08**] Cooren, Y. (2008). Perfectionnement d'un algorithme adaptatif d'Optimisation par Essaim Particulaire. Applications en génie médical et en électronique. *Thèse de doctorat, Université Paris 12 Val De Marne, France*.
- [**Cowling 02**] Cowling P. I. and Johansson M. (2002). Using real time information for effective dynamic scheduling. *European Journal of Operational Research*, 139(2), 230-244.
- [**Cowling 03**] Cowling, P. I., Ouelhadj, D. and Petrovic, S. (2003). A multi-agent architecture for dynamic scheduling of steel hot rolling. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 14, 457-470.
- [**Cowling 04**] Cowling, P. I., Ouelhadj, D. and Petrovic, S. (2004). Dynamic scheduling of steel casting andmilling using multi-agents. *Journal of Production Planning and Control*, 15(2), 178-188.
- [**Davenport 00**] Davenport, A. and Beck, J. (2000). A survey of techniques for scheduling with uncertainty. *Working paper*, <http://www.eil.utoronto.ca/chris/chris.papers.html>.
- [**Defersha 12**] Defersha, F. M. and Chen, M. (2012). Jobshop lot streaming with routing flexibility, sequence-dependent setups, machine release dates and lag time. *International Journal of Production Research*, 50(8), 2331-2352.
- [**Domingos 03**] Domingos, J. C. and Polianto, P. R. (2003). On-line scheduling for flexible manufacturing systems based on fuzzy logic. *In Proceedings of the IEEE international conference on systems, man and cybernetics*, Vol. 5, 4928-4933.
- [**Dorigo 00**] Dorigo, M. and stützle, T. (2000). The Ant Colony Optimization Metaheuristic: Algorithms, Applications, and Advances. *Technical Report IRIDIA-2000-32*.
- [**Dorigo 92**] Dorigo, M. (1992). Optimization, learning and natural algorithms. *PhD thesis*, Politecnico di Milano, Italy.

- [Doumeingts 83]** Doumeingts, G., Breuil, D., et Pun, L. (1983). La gestion de production assistée par ordinateur. *Hermès*, 1983.
- [Dréo 03]** Dréo, J., Pétrowski, A., Siarry, P. et Thaillard, E. (2003). Métaheuristiques pour l'optimisation difficile. *Eyrolles*, 2003.
- [Dréo 04]** Dréo, J. (2004). Adaptation de la méthode des colonies de fourmis pour l'optimisation en variables continues. Application en génie biomédical. *Thèse de doctorat, Université Paris12, France*.
- [Drex1 98]** Drex1, A. (1998). A simulated annealing approach to the multiconstraint zero-one knapsack problem. *Computing*, 40 (1), 1-8.
- [Drótos 09]** Drótos, M., Erdos, G. and Kis, T. (2009). Computing lower and upper bounds for a large-scale industrial job shop scheduling problem. *European Journal of Operational Research*, 197(1), 296-306.
- [Duvivier 00]** Duvivier, D. (2000). Étude de l'hybridation des méta-heuristiques, application à un problème d'ordonnancement de type jobshop. *Thèse de doctorat, Université du Littoral Côte d'Opale, France*.
- [Eberhart 1996]** Eberhart, R.C., Simpson, P. and Dobbins., R. (1996). Computational intelligence PC tools. *Academic Press Professional, Inc., ISBN:0-12-228630-8*.
- [Eberhart 95]** Eberhart, R. C and Kennedy, J. (1995). New optimizer using particle swarm theory. *Proceedings of the sixth IEEE international symposium on micro machine and human science, Nagoya, Japan*, 39-43.
- [ElMekkawy 03]** ElMekkawy, T. Y. and ElMaraghy, H.A. (2003). Real-time scheduling with deadlock avoidance in flexible manufacturing systems. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 22(3-4), 259-270.
- [Esquirol 99]** Esquirol, P. et Lopez, P. (1999). L'ordonnancement. *Economica*, 1999.
- [Esswein 03]** Esswein, C. (2003). Un apport de flexibilité séquentielle pour l'ordonnancement robuste. *Thèse de doctorat, Université François Rabelais Tours, France*.
- [Farmer 86]** Farmer, J. D., Packard, N. and Perelson, A (1986). The immune system, adaptation and machine learning. *Physica D*, 2 (1-3), 187-204.
- [Fry 89]** Fry, T.D. and Smith, A.E. (1989). FMS implementation procedure: a case study. *IIE Transactions*, 21(3), 288-293.
- [Garavelli 01]** Garavelli, A.C. (2001). Performance analysis of a batch production system with limited flexibility. *International Journal of Production Economics*, 69(1), 39-48.
- [Garbie 05]** Garbie, I. H., Parsaei, H. R. and Leep, H. R. (2005). Introducing new parts into existing cellular manufacturing systems based on a novel similarity coefficient. *International Journal of Production Research*, 43(5), 1007-1037.
- [Garey 79]** Garey, M.R and Johnson, D.S. (1979). Computers and intractability a guide of the theory of NP- completeness. *W.H. Freeman and company, San Fransisc*.
- [Ghezail 10]** Ghezail-Hamdi, F. (2010). Contribution à l.'analyse, l.'évaluation et la recherche d.'ordonnements robustes proactifs. *Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées et de Technologie, Tunisie*.
- [Giovanni 10]** Giovanni, L. D. and Pezzella, F. (2010). An Improved Genetic Algorithm for the Distributed and Flexible Job-shop Scheduling problem. *European Journal of Operational Research*, 200(2), 395-408.

- [**Glover 86**] Glover, F. (1986). Future paths for Integer Programming and Links to Artificial Intelligence. *Computers and Operations Research*, 13(5), 533-549.
- [**Goldberg 89**] Goldberg, D. (1989). Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning. *Addison Wesley Professional*.
- [**Gourgand 03**] Gourgand, M., Grangeon, N. and Norre, S. (2003). A contribution to the stochastic flow shop scheduling problem. *European Journal of Operational Research*, 151(2), 415-433.
- [**Groover 03**] Groover, M.P. (2003). Automation, production systems and computer integrated manufacturing. *Prentice-Hall, Inc, New Delhi*.
- [**Guan 12**] Guan, X., Dai, X., Qiu, B. and Li, J. (2012). A revised electromagnetism-like mechanism for layout design of reconfigurable manufacturing system. *Computers & Industrial Engineering*, 63 (1), 98-108.
- [**Guo 09**] Guo, Z.X., Wong, W.K., Leung, S.Y.S. and Fan, J.T. (2009). Intelligent production control decision support system for flexible assembly lines. *Expert Systems with Applications*, 36(3), 4268-4277.
- [**Haq 03**] Haq, N.A., Karthikeyan, T. and Dinesh, M. (2003). Scheduling decisions in FMS using a heuristic approach. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 22(5-6), 374-379.
- [**Hassam 10**] Hassam, A. and Sari, Z. (2010). Selection of alternative routings in real time: DMM and modified DMM rules. *International Journal of Product Development*, 10(1-2-3), 241-258.
- [**Heppner 90**] Heppner, F. and Grenander, U. (1990). A stochastic nonlinear model for coordinated bird flocks. *Book chapter in : The Ubiquity of Chaos, Edited by: Krasner, S., 233-238, AAAS, Washington DC*.
- [**Herroelen 02**] Herroelen, W. and Leus., R. (2002). Project scheduling under uncertainty. Survey and Research Potentials. *Eighth International Workshop on Project Management and Scheduling (PMS'2002), Valencia, Spain*.
- [**Herroelen 05**] Herroelen, W. S. and Leus, R. (2005). Project scheduling under uncertainty : Survey and research potentials. *European Journal of Operational Research*, 165(2), 289-306.
- [**Holland 75**] Holland, J. H. (1975). Adaptation in Natural and Artificial Systems. *University of Michigan Press, Ann Arbor, MI, 1975*.
- [**Hornig 12**] Hornig, S.C., Lin, S.S. and Yang, F.Y. (2012). Evolutionary algorithm for stochastic job shop scheduling with random processing time. *Expert Systems with Applications*, 39(3), 3603-3610.
- [**Huang 11**] Huang, Y. M. and Lina, J.C. (2011). A new bee colony optimization algorithm with idle-time-based filtering scheme for open shop-scheduling problems. *Expert Systems with Applications*, 38 (5), 5438-5447.
- [**Indrayadi 02**] Indrayadi, Y., Valckenaers, H.P. and Van Brussel, H. (2002). Dynamic Multi-Agent Dispatching Control for Flexible Manufacturing Systems. *Proceedings of the 13th IEEE International Workshop on Database and Expert Systems Applications (DEXA'02)*, 578-582.
- [**Jang 01**] Jang, J. and Suh, J. (2001). A Look-Ahead Routing Procedure for Machine Selection in a Highly Informative Manufacturing System. *The International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, 13(3). 287-308.
- [**Joseph 08**] Joseph, O.A and Sridharan, R. (2008). Effect of Part Launching Decisions on the Performance of a Flexible Manufacturing System: A Simulation Study. *IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, IEEM 2008, Singapore, 1744-1748*.

- [Joseph 11a]** Joseph, O.A and Sridharan, R. (2011). Evaluation of routing flexibility of a flexible manufacturing system using simulation modelling and analysis. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 56(1-4), 273-289.
- [Joseph 11b]** Joseph, O.A and Sridharan, R. (2011). Analysis of dynamic due-date assignment models in a flexible manufacturing system. *Journal of Manufacturing Systems*, 30(1), 28-40.
- [Joseph 11c]** Joseph, O.A and Sridharan, R. (2011). Effects of routing flexibility, sequencing flexibility and scheduling decision rules on the performance of a flexible manufacturing system. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 56(1-4), 291-306.
- [Joseph 12]** Joseph, O.A and Sridharan, R. (2012). Effects of flexibility and scheduling decisions on the performance of an FMS: simulation modelling and analysis. *International Journal of Production Research*, 50(7), 2058-2078.
- [Kaltwasser 86]** Kaltwasser, J., Hercht, A. and Lang, R. (1986). Hierarchical control of flexible manufacturing systems, *IFAC Information Control Problems in Manufacturing Technology, Suzdal, USSR*, 37-44.
- [Kamburowski 00]** Kamburowski, J. (2000). On three-machine flow shops with random job processing times. *European Journal of Operational Research*, 125(2), 440-449.
- [Kao 12]** Kao, Y. and Lin, C.H. (2012). A PSO-based approach to cell formation problems with alternative process routings, *International Journal of Production Research*, 50(15), 4075-4089.
- [Karaboga 05]** D. Karaboga (2005). An idea based on honey bee swarm for numerical optimization. *Technical Report TR06, Computer Engineering Department, Erciyes 451 University, Turkey, 2005*.
- [Karras 04]** Karras, D.A. (2004). Efficient Digital Fingerprint Production and Evaluation for Secure Communication Systems Based on Genetic Algorithms. *Artificial Intelligence and Soft Computing - ICAISC 2004, Lecture Notes in Computer Science, 2004*, 3070, 628-633.
- [Kashan 09]** Ali Husseinzadeh Kashan, Behrooz Karimi (2009). A discrete particle swarm optimization algorithm for scheduling parallel machines. *Computers & Industrial Engineering*, 56(1), 216-223.
- [Kassabalidis 02]** Kassabalidis, I.N., El-Sharkawi, M.A., Marks, R.J., Moulin, L.S., Alves da Silva, A.P. (2002). Dynamic security border identification using enhanced particle swarm optimization. *IEEE Transaction Power Systems*, 17(3), 723-729.
- [Kavian 12]** Kavian, Y. S., Rashedi, A., Mahani, A. and Ghassemlooy, Z. (2012). Routing and wavelength assignment in optical networks using Artificial Bee Colony algorithm. *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, Available online 31 May 2012.
- [Kennedy 01]** Kennedy, J., Eberhart, R.C. and Shi, Y. (2001). *Swarm Intelligence*. Morgan Kaufmann Academic Press, 2001.
- [Kesen 10a]** Kesen, S.E., Das, S.K. and Gungor, Z. (2010). A mixed integer programming formulation for scheduling of virtual manufacturing cells (VMCs). *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 47(5-8), 665-678.
- [Kesen 10b]** Kesen, S.E., Das, S.K. and Gungor, Z. (2010). A genetic algorithm based heuristic for scheduling of virtual manufacturing cells (VMCs). *Computers & Operations Research*, 37(6), 1148-1156.
- [Kim 07]** Kim, Y.K., Kim, J. Y. and Shin, K. S. (2007) An asymmetric multileveled symbiotic evolutionary algorithm for integrated FMS scheduling. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 18(6), 631-645.

- [**Kirkpatrick 83**] Kirkpatrick, S., Gelatt, C. D, Vecchi, M. P. (1983). Optimization by Simulated Annealing. *Science*, 220(4598), 671-680.
- [**Kovács 94**] Kovács, G. L., Mezgár, I., Kopácsi, S., Gavalcovà, D. and Nacsá, J. (1994). Application of artificial intelligence to problems in advanced manufacturing systems. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing Systems*, 7(3), 153-160.
- [**Kumar 06**] Kumar, A., Prakash, TMK., Shankar, R. and Baveja, A. (2006). Solving machine-loading problem of a flexible manufacturing system with constraint-based genetic algorithm. *European Journal of Operational Research*, 175(2), 1043-1069.
- [**Kumar 11**] Kumar, M. V. S., Janardhana, R. and Rao, C. S. P. (2011). Simultaneous scheduling of machines and vehicles in an FMS environment with alternative routing, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 53(1-4), 339-351.
- [**Kumar 87**] Kumar, V., (1987). Entropic measures of manufacturing flexibility. *International Journal of Production Research*, 25(7), 957-966.
- [**Kusiak 85**] Kusiak, A., (1985). Flexible manufacturing systems: a structural approach. *International Journal of Production Research*, 23(6), 1057-1073.
- [**Kusiak 92**] Kusiak, A. and Ahn, J. (1992). Intelligent scheduling of automated machining systems. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing Systems*, 5(1), 3-14.
- [**La Hoang 05**] La Hoang, T. (2005). Utilisation d'ordres partiels pour la caractérisation des solutions robustes en ordonnancement. *Thèse de doctorat, l'Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, France*.
- [**Lashkari 87**] Lashkari, R. S., Dutta, S. P. and Padhye, A. M. (1987). A new formulation of operation allocation problem in flexible manufacturing systems: mathematical modeling and computational experience. *International Journal of Production Research*, 25(9), 1267-1283.
- [**Lei 08**] Lei, D., (2008). A Pareto archive particle swarm optimization for multi-objective job shop scheduling. *Computers and Industrial Engineering*, 54, 960-971.
- [**Lei 11**] Lei, D. (2011). Simplified multi-objective genetic algorithms for stochastic job shop scheduling. *Applied Soft Computing*, 11(8), 4991-4996.
- [**Letouzey 01**] Letouzey, A. (2001). Ordonnancement interactif basé sur des indicateurs : Applications à la gestion de commandes incertaines et à l'affectation des opérateurs. *Thèse de doctorat, L'Institut National Polytechnique de Toulouse, France*.
- [**Leung 10**] Leung, C.W., Wong, T.N., Maka, K.L. and Fung, R.Y.K. (2010). Integrated process planning and scheduling by an agent-based ant colony optimization. *Computers and Industrial Engineering*, 59(1), 166-180.
- [**Li 05**] Li, Y., Yao, D., Yao, J. and Chen, W. (2005). A particle swarm optimization algorithm for beam angle selection in intensity-modulated radiotherapy planning. *Phys Med Biol*, 50 (15), 3491-3514.
- [**Li 06**] Li, D.C., Wu, C., and Chang, F.M. (2006). Using data continualization and expansion to improve small data set learning accuracy for early flexible manufacturing system (FMS) scheduling. *International Journal of Production Research*, 44(21), 4491-4509.
- [**Lian 08**] Lian, Z., Gu, X. and Jiao, B. (2008). A novel particle swarm optimization algorithm for permutation flow-shop scheduling to minimize makespan. *Chaos, Solitons & Fractals*, 35 (5), 851-861.
- [**Liao 07**] Liao, C. J., Tseng, C. T. and Luarn, P. (2007). A discrete version of particle swarm optimization for flowshop scheduling problems. *Computers and Operations Research*, 34(10), 3099-3111.

- [**Lin 91**] Lin, G.Y. and Solberg, J.J. (1991). Effectiveness of flexible routing control. *The International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, 3(3-4), 189-211.
- [**Liu 05**] Liu, B., Wang, L. and Jin, Y.-J. (2005). An effective hybrid particle swarm optimization for no-wait flow shop scheduling. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 31 (9-10), 1001-1011.
- [**Liu 96**] Liu, J. and MacCarthy, B. L. (1996). The classification of FMS scheduling problems. *International Journal of Production Research*, 34(3), 647- 656.
- [**Low 06**] Low, C., Yip, Y. and Wu, T.H. (2006). Modelling and heuristics of FMS scheduling with multiple Objectives. *Computers & Operations Research*, 33(3), 674-694.
- [**Lu 11**] Lu, M.S. and Liu, Y.J. (2011) Dynamic dispatching for a flexible manufacturing system based on fuzzy logic. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 54(9-12), 1057-1065.
- [**Lun 00**] Lun, M. and Chen, F.F. (2000). Holonic concept based methodology for part routing on flexible manufacturing systems. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 16(7), 483-490.
- [**MacCarthy 93**] MacCarthy, B. L. and Liu, J. (1993). A new classification scheme for flexible manufacturing systems. *International Journal of Production Research*, 31(2), 299-309.
- [**Mahmoodi 99**] Mahmoodi, F., Mosier, C T. and Morgan, J. R. (1999). The Effects of Scheduling Rules and Routing Flexibility on the Performance of a Random Flexible Manufacturing System. *The International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, 11(3), 271-289.
- [**Marinakis 10**] Marinakis, Y. and Marinaki, M. (2010). A Hybrid Multi-Swarm Particle Swarm Optimization algorithm for the Probabilistic Traveling Salesman Problem. *Computers & Operations Research*, 37 (3), 432-442.
- [**Matsui 09**] Matsui, M. (2009). Job/Customers Routing, Flexible Machining System (FMS), *Book chapter in: Manufacturing and Service Enterprise with Risk, Edited by: Matsui, M., International Series in Operations Research & Management Science*, 125(Part IV), 139-149.
- [**Mebarki 95**] Mebarki, N. (1995). Une approche d'ordonnancement temps réel basée sur les règles de priorité des files d'attente. *Thèse de doctorat, Université de Claude Bernard Lyon1, France*.
- [**Mehta 99**] Mehta, S. V. and Uzsoy, R. (1999). Predictable scheduling of a single machine subject to breakdowns. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 12(1), 15-38.
- [**Meignan 08**] Meignan, D. (2008). Une approche organisationnelle et multi-agent pour la modélisation et l'implantation de métaheuristiques, Application aux problèmes d'optimisation de réseaux de transports. *Thèse de doctorat, Université de Technologie de Belfort-Montbeliard, France*.
- [**Metropolis 53**] Metropolis, N., Rosenbluth, A.W, Rosenbluth, M.N, Teller, A.H and Teller, E. (1953). Equations of state calculations by fast computing machines. *Journal of Chemical Physics* 21(6), 1087-1091.
- [**Min 98**] Min, H. S., Yih, Y. and Kim, C. O. (1998). A competitive neural network approach to multi-objective FMS scheduling. *International Journal of Production Research*, 36(7), 1749-1765.
- [**MirHassani 11**] MirHassani, S.A. and Abolghasemi, N. (2011). A particleswarmoptimization algorithm for open vehicle routing problem. *Expert Systems with Applications*, 38 (9), 11547-11551.
- [**Moon 08**] Moon, I., Lee, S. and Bae, H. (2008). Genetic algorithms for job shop scheduling problems with alternative routings. *International Journal of Production Research*, 46(10), 2695-2705.

- [**Nasr 90**] Nasr, N. and Elsayed, E.A. (1990). Job shop scheduling with alternative machines. *International Journal of Production Research*, 28(9), 1595-1609.
- [**Nomden 08**] Nomden, G. and Zee, D.J.V.D. (2008). Virtual cellular manufacturing: Configuring routing flexibility. *International Journal of Production Economics*, 112(2008), 439-451.
- [**Nouri 12**] Nouri, M. and Ghodsi, M. (2012). Scheduling tasks with exponential duration on unrelated parallel machines. *Discrete Applied Mathematics*, 160(16-17), 2462-2473.
- [**O'Donovan 99**] O'Donovan, R., Uzsoy, R. and McKay, K. N. (1999). Predictable scheduling of a single machine with breakdowns and sensitive jobs. *International Journal of Production Research*, 37(18), 4217-4233.
- [**O'Keefe 92**] O'Keefe, R. M. and Kasirajan, T. (1992). Interaction between dispatching and next station selection rules in a dedicated flexible manufacturing system. *International Journal of Production Research*, 30(8), 1753-1772.
- [**O'kane 00**] O'kane, J. F. (2000). A knowledge-based system for reactive scheduling decision-making in FMS. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 11(5), 461-474.
- [**Osman 96**] Osman, I. H. and Laporte, G. (1996). Metaheuristics: A bibliography. *Annals of Operations Research*, 63(1996), 513-623.
- [**Ouelhadj 03**] Ouelhadj, D., Cowling, P. I. and Petrovic, S. (2003). Contract net protocol for cooperative optimisation and dynamic scheduling of steel production. *Book chapter in : Intelligent systems design and applications*, Edited by : Ibrahim, A., Franke, K. and Koppen M., 457-470, Berlin: Springer.
- [**Ouelhadj 09**] Ouelhadj, D. and Petrovic, S. (2009). A survey of dynamic scheduling in manufacturing systems. *Journal of Scheduling*, 12 (4), 417-431.
- [**Ourari 11**] Ourari, S. (2011). De l'ordonnancement déterministe à l'ordonnancement distribué sous incertitudes. *Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier de Toulouse, France*.
- [**Özgüven 10**] Özgüven, C., Özbakır, L. and Yavuz, Y. (2010). Mathematical models for job-shop scheduling problems with routing and process plan flexibility. *Applied Mathematical Modelling*, 34 (6), 1539-1548.
- [**Ozmutlu 05**] Ozmutlu, S and Harmonosky, C. M. (2005). A real-time methodology for minimizing mean flowtime in FMSs with routing flexibility: Threshold-based alternate routing. *European Journal of Operational Research*, 166(2), 369-384.
- [**Pan 05**] Pan, Q.K., Tasgetiren, M.F. and Liang Y.C. (2005). A discrete particle swarm optimization algorithm for the no-wait flowshop scheduling problem with makespan criterion. *Proceedings of the international workshop on UK planning and scheduling special interest group, UK PLANSIG2005. City University, London*, 31-41.
- [**Pan 08a**] Pan, Q.K., Tasgetiren, M.F., Liang, Y.C. (2008). A discrete particle swarm optimization algorithm for the no-wait flowshop scheduling problem with makespan criterion. *Computers and Operations Research*, 35(9), 2807-2839.
- [**Pan 08b**] Pan, Q.K., Liang, Y.C., Tasgetiren, M.F., Zhao, B.H (2008). A hybrid discrete particle swarm optimization algorithm for the no-wait flow shop scheduling problem with makespan criterion. *International journal of advanced Manufacturing Technology*, 38(3-4), 337-347.
- [**Pinedo 08**] Pinedo, M. (2008). Scheduling : Theory, algorithms and systems (2nd edition). *Prentice Hall*.
- [**Pinot 08**] Pinot, G. (2008). Coopération homme-machine pour l'ordonnancement sous incertitudes. *Thèse de Doctorat, Université de Nantes, France*.

- [**Piplani 07**] Piplani, R. and Wetjens, D. (2007). Evaluation of entropy-based dispatching in flexible manufacturing systems. *European Journal of Operational Research*, 176(1), 317-331.
- [**Pitts 09**] Pitts, R.A. and Ventura, J.A. (2009). Scheduling flexible manufacturing cells using Tabu Search. *International Journal of Production Research*, 47(24), 6907-6928.
- [**Prabhakaran 05**] Prabhakaran, G., Muruganandam, A., Asokan, P., Girish (2005). Machine cell formation for cellular manufacturing systems using an ant colony system approach. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 25 (9-10), 1013-1019.
- [**Prakash 11**] Prakash, A. and Deshmukh, S.G. (2011). A multi-criteria customer allocation problem in supply chain environment: An artificial immune system with fuzzy logic controller based approach. *Expert Systems with Applications*, 38 (4), 3199-3208.
- [**Primrose 91**] Primrose, P.U. and Leonard, R. (1991). Selecting Technology for Investment in Flexible Manufacturing. *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, 4(1), 51-77.
- [**Raj 07**] Raj, T., Shankar, R. and Suhaib, M. (2007). A review of some issues and identification of some barriers in the implementation of FMS. *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, 19(1), 1-40.
- [**Rajendran 99**] Rajendran, C. and Holthaus, O. (1999). A comparative study of dispatching rules in dynamic flow shops and job shops. *European Journal of Operational Research*, 116(1), 156-170.
- [**Ramasesh 90**] Ramasesh, R. (1990). Dynamic job shop scheduling: a survey of simulation research. *OMEGA International Journal of Management Science*, 18(1), 43-57.
- [**Rebreyend 99**] Rebreyend, P. (1999), Algorithmes génétiques hybrides en optimisation combinatoire. *Thèse de doctorat, Ecole normale supérieure de lyon, France*.
- [**Reynolds 87**] Reynolds, C.W. (1987). Flocks, herds and schools: A distributed behavioral model. *Proceedings of the 14th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, ACM*.
- [**Rinnooy Kan 1976**] Rinnooy Kan, A.H.G. (1976). Machine Scheduling Problems: Classification, Complexity, and Computations. *Netherlands: The Hague, 1976*.
- [**Rossi 00**] Rossi, A. and Dini, G. (2000). Dynamic scheduling of FMS using a real-time genetic algorithm. *International Journal of Production Research*, 38(1), 1-20.
- [**Rossi 07**] Rossi, A. and Dini, G. (2007). Flexible job-shop scheduling with routing flexibility and separable setup times using ant colony optimisation method. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 23 (5) 503-516.
- [**Rossi 09**] Rossi, A. and Boschi, E. (2009). A hybrid heuristic to solve the parallel machines job-shop scheduling problem. *Advances in Engineering Software*, 40 (2), 118-127.
- [**Ruiz 01**] Ruiz, D., Canton, J., Mara, N. J., Espuna, A. and Puigjaner, L. (2001). On-line fault diagnosis system support for reactive scheduling in multipurpose batch chemical plants. *Computers and Chemical Engineering*, 25(4), 829-837.
- [**Ruiz 11**] Ruiz, N., Gireta, A., Bottia, V. and Feriab, V. (2011). Agent-supported simulation environment for intelligent manufacturing and warehouse management systems. *International Journal of Production Research*, 49(5), 1469-1482.
- [**Saenz de Ugarte 09**] Saenz de Ugarte, B. (2009). Aide à la prise de décision en temps réel dans un contexte de production adaptative, *Thèse de doctorat, Université de Montréal, Canada*.
- [**Sari 03**] Sari, Z. (2003). Modélisation, analyse et évaluation des performances d'un AS/RS à convoyeur gravitationnel, *Thèse de doctorat d'état, Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen, Algérie*.
- [**Sawik 90**] Sawik, T., (1990). Modeling and scheduling of a flexible manufacturing system. *European Journal of Operational Research*, 45(2-3), 177- 190.

- [**Saygin 01**] Saygin, C., Chen, F.F. and Singh, J. (2001). Real-Time Manipulation of alternative Routings in Flexible Manufacturing Systems: A simulation Study. *International journal of advanced Manufacturing Technology*, 18(10), 755-763.
- [**Saygin 04**] Saygin, C. and Kilic S.E. (2004) Dissimilarity Maximization Method for Real-time Routing of Parts in Random Flexible Manufacturing Systems. *The International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, 16(2), 169-182.
- [**Saygin 99**] Saygin, C. and Kilic S.E. (1999). Integrating flexible manufacturing systems with scheduling in flexible manufacturing system. *International journal of advanced Manufacturing Technology*, 15(4), 268-280.
- [**Sethi 90**] Sethi, A.K., Sethi, S.P. (1990). Flexibility in manufacturing: a survey. *The International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, 2(4), 289-328.
- [**Sha 06**] Sha, D.Y. and Hsu, C.-Y. (2006). A hybrid particle swarm optimization for job shop scheduling problem. *Computers & Industrial Engineering* 51 (4), 791-808.
- [**Sha 08**] Sha, D.Y. and Hsu, C.-Y. (2008). A new particle swarm optimization for the open shop scheduling problem. *Computers & Operations Research*, 35 (10) 3243 – 3261.
- [**Shafiq 10**] Shafiq, S.I., Faheem, M. and Ali, M. (2010) Effect of Scheduling and Manufacturing Flexibility on the Performance of FMS. *Global Journal of Flexible Systems Management*, 11(3), 21-38.
- [**Shannon 48**] Shannon, C.E (1948). A Mathematical Theory of Communication. *Reprinted with corrections from The Bell System Technical Journal*, Vol. 27, pp. 379–423, 623–656, July, October, 1948.
- [**Shewchuk 99**] Shewchuk, J.P. (1999). A set of generic flexibility measures for manufacturing applications. *International Journal of Production Research*, 37(13), 3017-3042.
- [**Shi 06**] Shi, X.H., Zhou, Y., Wang, L.M., Wang, Q.X. and Liang, Y.C. (2006). A discrete particle swarm optimisation algorithm for travelling Salesman problem. *Book chapter in: Computational methods*, edited by: Liu, G.R., Tan, V.B.C. and Han, X., 1063-1068, Springer 2006.
- [**Shi 98**] Shi, Y. and Eberhart, R.C. (1998). A modified particle swarm optimizer. *IEEE World Congress on Computational Intelligence, Anchorage, Alaska, Evolutionary Computation Proceedings, 1998*.
- [**Shi 99**] Shi, Y. and Eberhart, R.C. (1999). Empirical Study of Particle Swarm Optimization. *Proceedings of the 1999 Congress of Evolutionary Computation, IEEE Press*.
- [**Shuiabi 05**] Shuiabi, E., Thomson, V. and Bhuiyan, N. (2005). Entropy as a measure of operational flexibility. *European Journal of Operational Research*, 165(3), 696-707.
- [**Shukla 96**] Shukla, C. S. and Chen, F. F. (1996). The state of the art in intelligent real-time FMS control: a comprehensive survey. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 7(6), 441-455.
- [**Souier 10a**] Souier, M., Hassam, A. et Sari, Z. (2010). Des algorithmes basées sur les principes des métaheuristiques pour le ré-ordonnancement temps réel dans un FMS avec flexibilité de routage. *8e Conférence Internationale de MODélisation et SIMulation - MOSIM'10 - 10 au 12 mai 2010, HAMMAMET TUNISIA*.
- [**Souier 10b**] Souier, M., Hassam, A. and Sari, Z. (2010). Meta-heuristics for real time routing selection in FMS. *Book chapter in: Artificial Intelligence Techniques for Networked Manufacturing Enterprises Management*, Edited by : Benyoucef, L. and Ghabot, B., 222- 270, Springer-Verlag.
- [**Souier 12a**] Souier, M., Hassam, A., Sari, Z. and Mebarki, N. (2012). A new release of modified dissimilarity maximization method for real time alternative routing selection in an FMS. *9th International Conference of Modeling, Optimization and Simulation MOSIM12, 6-8 June, 2012, Bordeaux, France*.

- [**Souier 12b**] Souier, M. Sari, Z. and Hassam, A. (2012). Real time rescheduling metaheuristic algorithms applied to FMS with routing flexibility. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Springer Editor (2012)*. DOI 10.1007/s00170-012-4001-y.
- [**Spano 93**] Spano, M. R., O'Grady, P. J. and Young, R. E. (1993). The design of flexible manufacturing systems. *Computers in Industry, 21, 185-198*.
- [**Srinoi 06**] Srinoi, P., Shayan, E. and Ghotb, F. (2006). A fuzzy logic modeling of dynamic scheduling in FMS. *International Journal of Production Research, 44(11), 2183-2203*.
- [**Stecke 85a**] Stecke, K.E. and Brouwne, J. (1985). Variations in flexible manufacturing systems according to the relevant types of automated materials handling. *Material Flow, 2(2-3), 179-185*.
- [**Stecke 85b**] Stecke, K.E. (1985). Design, planning, scheduling and control problems in flexible manufacturing systems. *Annals of Operations Research, 3(1), 3-12*.
- [**Stoop 96**] Stoop, P. P. M. and Weirs, V. C. S. (1996). The complexity of scheduling in practice. *International Journal of Operations and Production management, 16(10), 37-53*.
- [**Suresh 93**] Suresh, V. and Chaudhuri, D. (1993). Dynamic scheduling a survey of research. *International Journal of Production Economics, 32(1), 53-63*.
- [**Talbi 09**] Talbi, E. (2009). Metaheuristics: From Design to Implementation. *JohnWiley and Sons, Inc. (2009)*.
- [**Tangour 07**] Tangour Toumi, F. (2007). Ordonnancement Dynamique dans les Industries Agroalimentaires. *Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, France*.
- [**Tasgetiren 07**] Tasgetiren, M.F., Liang, Y.-C., Sevkli, M. and Gencyilmaz, G. (2007). A particle swarm optimization algorithm for makespan and total flowtime minimization in the permutation flowshop sequencing problem. *European Journal of Operational Research, 177 (3), 1930-1947*.
- [**Terzi 04**] Terzi, E., Vakali, A. and Angelis, L. (2004). A simulated annealing approach for multimedia data placement. *Journal of Systems and Software, 73(3), 467-480*.
- [**Tfaily 08**] Tfaily, W. (2008). Conception d'un algorithme de colonie de fourmis pour l'optimisation continue dynamique. *Thèse de doctorat, Université Paris 12 Val De Marne, France*.
- [**Tiwari 07**] Tiwari, M.K., Saha, J. and Mukhopadhyay S.K. (2007). Heuristic solution approaches for combined-job sequencing and loading problem in flexible manufacturing system. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 31(7-8), 716-730*.
- [**Torres 10**] Torres, J. R. M., Franco, E. G. and Mayorga, C. P. (2010). Project scheduling with limited resources using a genetic algorithm. *International Journal of Project Management, 28 (6), 619-628*.
- [**Tsubone 99a**] Tsubone, H. and Horikawa, M. (1999). A Comparison Between Machine Flexibility and Routing Flexibility. *The International Journal of Flexible Manufacturing Systems, 11(1), 83-101*
- [**Tsubone 99b**] Tsubone, H. and Horikawa, M. (1999). Impact of various flexibility types in a hybrid fabrication/assembly production system. *International Journal of Production Economics, 60-61(1), 117-123*.
- [**Tung 99**] Tung, L.F., Lin, L. and Nagi, R. (1999). Multiple-Objective Scheduling for the Hierarchical Control of Flexible Manufacturing Systems. *The International Journal of Flexible Manufacturing Systems, 11 (4), 379-409*.
- [**Turgay 09**] Turgay, S. (2009). Agent based FMS control. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 25(2), 470-480*.

- [**Turkcan 07**] Turkcan, A., Akturk, M.S. and Storer, R.H. (2007). Due date and cost-based FMS loading, scheduling and tool management. *International Journal of Production Research*, 45(5), 1183-1213.
- [**Uddin 02**] Uddin, M. K. and Shanker, K. (2002). Grouping of parts and machines in presence of alternative process routes by genetic algorithm. *International Journal of Production Economics*, 76(3), 219-228.
- [**Unver 11**] Unvera, N.F. and Kokarb, M.M. (2011). Self Controlling Tabu Search algorithm for the Quadratic Assignment Problem. *Computers & Industrial Engineering*, 60 (2), 310-319.
- [**Voss 99**] Voss, S., Martello, S., Osman, I. H. and Roucairol, C. (1999). Meta-Heuristics: Advances and Trends in Local Search Paradigms for Optimization. *Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands*.
- [**Wadhwa 05**] Wadhwa, S., Rao, K.S. and Chan, F.T.S. (2005). Flexibility-enabled lead-time reduction in flexible systems. *International Journal of Production Research*, 43(15), 3131-3162.
- [**Wadhwa 10**] Wadhwa, S., Singholi, A. and Ali, M. (2010) Evaluating the Effect of Part – Mix and Routing Flexibility on FMS Performance. *Global Journal of Flexible Systems Management*, 11(4), 17-24.
- [**Wahab 08**] Wahab, M.I.M. and Stoyan, S.J. (2008). A dynamic approach to measure machine and routing flexibilities of manufacturing systems. *International Journal of Production Economics*, 113(2), 895-913.
- [**Wang 08**] Wang, S.J., Xi, L.F. and Zhou, B.H. (2008). FBS-enhanced agent-based dynamic scheduling in FMS. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 21(4), 644-657.
- [**Wang 95**] Wang, L. C., Chen, H. M. and Liu, C. M. (1995). Intelligent scheduling of FMSs with inductive learning capability using neural networks. *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, 7(2), 147-175.
- [**Widmer 00**] Widmer, M., Hertz, A. and Costa, D. (2000). Les Métaheuristiques. Chapter de livre dans : Ordonnancement de la Production, Édité par : Lopez, P. and Roubellat, F., Hermes Science Publications, 55-93.
- [**Wong 06**] Wong, T.N., Leung, C.W., Mak, K.L. and Fung, R.Y.K. (2006). Dynamic shopfloor scheduling in multi-agent manufacturing systems. *Expert Systems with Applications*, 31(3), 486-494.
- [**Wu 88**] Wu, S. Y. D. and Wysk, R. A. (1988). Multi-pass expert control system – a control/scheduling structure for flexible manufacturing cells. *Journal of Manufacturing Systems*, 7(2), 107-120.
- [**Yang 08**] Yang, B. and Geunes, J. (2008). Predictive–reactive scheduling on a single resource with uncertain future jobs. *European Journal of Operational Research*, 189(2008), 1267-1283.
- [**Yao 90**] Yao, D.D. and Pei, F.F. (1990). Flexible parts routing in manufacturing systems. *IIE Transactions*, 22(1), 48-55.
- [**Yu 09**] Yu, M.C. and Greene, T.J. (2009). An operational measure of routing flexibility in a multi-stage multi-product production system. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 43 (3-4), 357-364.
- [**Yu 99**] Yu, L., Shih, H. M. and Sekiguchi, T. (1999). Fuzzy inference-based multiple criteria FMS scheduling. *International Journal of Production Research*, 37(4), 2315-2333.
- [**Yurtkuran 10**] Yurtkuran, A. and Emel, E. (2010). A new Hybrid Electromagnetism-like Algorithm for capacitated vehicle routing problems. *Expert Systems with Applications*, 37 (4), 3427-3433.

- [**Zadeh 65**] Zadeh, L. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*, 8, 338-353.
- [**Zahran 90**] Zahran, I.M., Elmagrabhy, A.S. and Sahalaby, M.Z. (1990). Evaluation of flexibility in manufacturing systems. *Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, 49-52.
- [**Zeballos 10a**] Zeballos, L.J. (2010). A constraint programming approach to tool allocation and production scheduling in flexible manufacturing systems. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 26(6), 725-743.
- [**Zeballos 10b**] Zeballos, L.J., Quiroga, O.D. and Henning, G.P. (2010). A constraint programming model for the scheduling of flexible manufacturing systems with machine and tool limitations. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 23(2), 229-248.
- [**Zhang 09**] Zhang, G., Shao, X., Li, P. and Gao, L. (2009). An effective hybrid particle swarm optimization algorithm for multi-objective flexible job-shop scheduling problem. *Computers and Industrial Engineering*, 56 (4), 1309-1318.
- [**Zhang 10**] Zhang, N., Feng, Z. and Ke, L. (2010). Guidance-solution based ant colony optimization for satellite control resource scheduling problem. *Applied Intelligence*, 35 (3), 436-444.
- [**Zhao 01**] Zhao, C. and Wu, Z. (2001). A Genetic Algorithm Approach to the Scheduling of FMSs with Multiple Routes. *The International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, 13(1), 71-88.

Résumé :

La flexibilité de routage est un contributeur majeur des flexibilités implémentées dans un FMS. Afin de pouvoir bénéficier de ses avantages, le système doit être doté de plusieurs capacités technologiques, des stratégies de contrôle opérationnel et d'ordonnancement capables, de répondre aux objectifs de son implémentation, en tenant compte de ses contraintes, son état et les incertitudes qui peuvent surgir...

Cette thèse s'intéresse aux processus d'ordonnancement et de ré-ordonnancement dans un FMS avec flexibilité de routage et sous incertitudes. Les décisions d'ordonnancement sont prises en terme de comment des pièces arrivent au système, comment ces pièces sont routées vers les diverses machines alternatives, et le séquençement de pièces aux niveaux des files d'entrée des machines. Le système décisionnel proposé utilise les règles de priorité pour le lancement et le séquençement de pièces. En outre, le processus de routage de pièces est basé sur les essais particuliers. Tout d'abord, nous proposons un algorithme à base de cette métaheuristique pour les décisions de routage de pièces en temps réel. Cet algorithme peut répondre aux variations des demandes de fabrication même en cas de présence de pannes de machines. Ensuite, nous développons une approche de ré-ordonnancement en temps réel de pièces en cours de traitement, afin de pallier aux incertitudes sur le temps opératoire. Enfin, nous abordons l'analyse des performances des approches proposées en variant les différents niveaux de flexibilité de routage.

Mots clés : Système flexible de production, Règle de priorité, Métaheuristic, optimisation par essais particuliers, Flexibilité de routage, incertitudes.

Abstract:

The routing flexibility is a major contributor of flexibilities implemented in FMS. In order to make it beneficial, the system must be equipped with several technological capabilities, operational control and scheduling strategies, able to meet its implementation objectives, by taking into account the constraints, its state and uncertainties that may arise,...

This thesis focuses on the scheduling and rescheduling processes in an FMS with routing flexibility and under uncertainty. The scheduling decisions have been established in terms of how the parts are launched into the system, how they are routed through various machines and are sequenced for processing on a machine. The proposed decision system uses the dispatching rules for sequencing and launching the parts.

In addition, the parts routing process is based on particle swarm optimization. Firstly, we propose an algorithm based on this metaheuristic for real time parts routing decisions. This algorithm can meet the manufacturing demands variations even in the presence of machines failures. Then, we develop an approach to real-time rescheduling of the parts in process, to overcome the uncertainties in the processing time. Finally, we analyze the performances analysis of the proposed approaches, with varying the levels of routing flexibility.

Keywords : Flexible manufacturing system, Dispatching rules, Metaheuristics, Particle swarm optimization, Routing flexibility, uncertainty

ملخص:

مرونة التوجيه هو المساهم الرئيسي من المرونة في تنفيذ أنظمة الإنتاج المرنة. من أجل جعلها مفيدة، يجب أن تكون مجهزة بعدة قدرات تكنولوجية، ومن استراتيجيات الرقابة التشغيلية والجدولة، قادرة على تلبية الأهداف وتنفيذها، مع الأخذ بعين الاعتبار القيود، حالة النظام والارتياح الذي ينشأ... تركّز هذه الأطروحة على جدولة وإعادة جدولة العمليات في ورشات العمل مع مرونة التوجيه و في ظل حدوث ارتياح، وقد وضعت جدولة القرارات من حيث كيفية إطلاق القطع في النظام، وكيف يتم توجيهها من خلال مختلف الآلات والمسارات وعمليات التسلسل على مستوى الآلات. يستخدم نظام القرارات المقترح قواعد إيفاد لتسلسل وإطلاق القطع. وبالإضافة إلى ذلك، تركز عملية تحديد المسارات على تقنية سرب الجسيمات. أولاً، نقترح خوارزمية مبنية على هذه التقنية لاتخاذ قرارات التوجيه في الوقت الحقيقي. وهذا حتى في وجود أعطاب. ثم، فإننا نضع نهج لإعادة جدولة القطع في الوقت الحقيقي، للتغلب على أوجه عدم اليقين خلال المعالجة. وأخيراً، سنحلل أداء التقنيات المقترحة، مع عدة مستويات مرونة التوجيه.

الكلمات المفتاحية : أنظمة الإنتاج المرنة، قواعد الأولوية، فورية الاستدلالات، سرب الجسيمات، مرونة التوجيه، الارتياح.