

# Développement d'une nouvelle famille d'indicateurs de performance pour la conception d'un système manufacturier reconfigurable (RMS) : approches évolutionnaires multicritères

Hichem Haddou Benderbal

▶ **To cite this version:**

Hichem Haddou Benderbal. Développement d'une nouvelle famille d'indicateurs de performance pour la conception d'un système manufacturier reconfigurable (RMS) : approches évolutionnaires multicritères. Systèmes et contrôle [cs.SY]. Université de Lorraine, 2018. Français. NNT : 2018LORR0112 . tel-01886887

**HAL Id: tel-01886887**

**https://theses.hal.science/tel-01886887**

Submitted on 3 Oct 2018

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4
Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10
http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php
http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm

# Université de Lorraine

École doctorale IAEM-Lorraine (Informatique, automatique, Électronique-Électrotechnique et Mathématique)

## Thèse

Pour obtenir le grade de

Docteur de l'Université de Lorraine

Spécialité Génie informatique, automatique, traitement du signal et des images,

Par Hichem HADDOU BENDERBAL

---

# « Développement d'une nouvelle famille d'indicateurs de performance pour la conception d'un système manufacturier reconfigurable (RMS) : approches évolutionnaires multicritères »

---

Soutenue publiquement, le 20 juin 2018 devant le jury composé de :

| | |
|---|---|
| Feng CHU<br>Professeur des Universités, Université d'Evry Val d'Essonne | Rapporteur |
| Aziz MOUKRIM<br>Professeur des Universités, Université de Technologie de Compiègne | Rapporteur |
| Hamid ALLAOUI<br>Professeur des Universités, Université d'Artois | Examinateur |
| Nikolay TCHERNEV<br>Professeur des Universités, Université Clermont Auvergne | Examinateur |
| Abdelhakim KHATAB<br>Maître de Conférences, Université de Lorraine | Examinateur |
| Wahiba RAMDANE-CHERIF<br>Maître de Conférences, Université de Lorraine | Examinateur |
| Mohammed DAHANE<br>Maître de Conférences HDR, Université de Lorraine | Directeur de thèse |
| Lyes BENYOUCEF<br>Professeur des Universités, Aix-Marseille Université | Co-directeur de thèse |

# Remerciements

Je tiens à exprimer mes vifs remerciements à mes deux Directeurs de thèse Docteur Mohammed DAHANE et Professeur Lyes BENYOUCEF, pour leur générosité, leur confiance et leur grande patience dont ils ont su faire preuve malgré leurs charges. Ils ont toujours été à l'écoute et très disponibles tout au long de la réalisation de cette thèse.

J'exprime ma gratitude aux membres du jury qui ont accepté d'évaluer cette thèse et d'apporter une lecture attentive qui aboutira certainement à l'amélioration de ce travail de recherche. Je remercie le Professeur Feng CHU et le Professeur Aziz MOUKRIM de m'avoir fait l'honneur d'accepter l'évaluation de mon travail de recherche. Je les remercie pour leurs remarques constructives et détaillées qui ont contribué à améliorer considérablement le manuscrit.

Je remercie aussi le Professeur Hamid ALLAOUI, le Professeur Nikolay TCHERNEV, le Docteur Wahiba RAMDANE-CHERIF et le Docteur Abdelhakim KHATAB pour avoir accepté d'examiner mes travaux de recherche.

J'adresse mes remerciements les plus sincères à toutes les personnes qui m'ont soutenu tout au long de cette thèse, Madame K.S. Warda et son mari K.S. Djamel, Madame H. Wahida, Madame E. Nadia et son mari E. Djawed, Madame M. Amel, Messieurs T. Tariq, K. Oussama, S. Yassine, B. Youcef, D. Oussama, K. Tarek.

Mes remerciements s'adressent également à tous ceux qui m'ont accueilli et aidé, la famille SACI, Madame DJELLAL et Monsieur NAAMOUNE. J'adresse également mes remerciements à mes collègues Du laboratoire LGPIM avec qui j'ai passé mes années de thèse.

Enfin, j'adresse mes plus sincères remerciements à tous mes proches, ma famille et amis, qui m'ont toujours soutenu et encouragé. Je remercie particulièrement mes parents Noureddine, Lahbib, Fatima et Fatiha, mes frères et sœurs Amine, Djamel, Othman, Ayoub, Soumia et Aya pour leur encouragement, leur soutien et leur patience. Merci à toutes et à tous.

# Résumé

L'environnement manufacturier moderne est face à un bouleversement de paradigmes nécessitant plus de *changeabilité* au niveau physique et logique. Un système manufacturier *Changeable* est défini comme un système de production ayant les capacités de faciliter les changements adéquats, permettant d'ajuster ses structures et ses processus en réponse aux différents besoins. Dans ce contexte, les systèmes manufacturiers doivent se doter d'un très haut niveau de *reconfigurabilité*, qui est considérée comme l'un des facteurs majeurs du concept de changeabilité. En effet, dans la vision de l'Usine du Futur, la reconfigurabilité est essentielle pour s'adapter efficacement à la complexité croissante des environnements manufacturiers. Elle assure une adaptation rapide, efficace et facile de ces systèmes tout en étant réactif, robuste et économiquement compétitif. L'objectif est de répondre aux nouvelles contraintes internes et externes telles que la globalisation, la variété des produits, la personnalisation de masse ou le raccourcissement des délais.

À travers cette thèse, nous étudions la problématique de conception des *systèmes manufacturiers reconfigurables* (Reconfigurable Manufacturing System – RMS). L'objectif consiste à concevoir des systèmes réactifs en se basant sur leurs capacités en matière de *reconfigurabilité*. Nous avons étudié ce problème sur trois niveaux : (i) le niveau des composantes, relatif aux modules des machines reconfigurables, (ii) le niveau des machines et leurs interactions, ainsi que l'impact de ces interactions sur le système et (iii) le niveau de l'atelier, composé de l'ensemble des machines reconfigurables. Nous avons développé pour chaque niveau, des indicateurs de performance afin d'assurer les meilleures performances du système conçu, tels que l'indicateur de modularité, l'indicateur de flexibilité, l'indicateur de robustesse et l'effort d'évolution d'un système reconfigurable. Pour l'ensemble des problèmes étudiés, nous avons développé des modèles d'optimisation multicritère, résolus à travers des heuristiques ou des métaheuristiques multicritères (comme le recuit simulé multicritère (AMOSA) et les algorithmes génétiques multicritère (NSGA-II)). De nombreuses expériences numériques et analyses ont été réalisées afin de démontrer l'applicabilité de nos approches.

***Mot clés*** : Système manufacturier reconfigurable (RMS), conception, reconfigurabilité, changeabilité, optimisation multicritère, gamme de fabrication, indicateurs de performance.

# Abstract

The modern manufacturing environment is facing a paradigm shift that require more *changeability* at physical and logical levels. A *Changeable Manufacturing System* is defined as a production system that has the ability to facilitate the right changes, allowing the adjustment of its structures and processes in response to the different needs. In this context, manufacturing systems must have a very high level of *reconfigurability*, which is considered to be one of the major enablers of changeability. From the perspective of the "Factory of the future", the reconfigurability is essential to effectively adapt to the ever-increasing complexity of manufacturing environments. It allows a rapid, efficient and easy adaptation of these systems while being responsive, robust and economically competitive. The objective is to respond to new internal and external constraints in terms of globalization, variety of products, mass customization, and shorter lead times.

Through this thesis, we study the *problem of design of reconfigurable manufacturing systems (RMS)* that meets these requirements. The goal is to design responsive systems based on their key features of *reconfigurability*. We have studied the RMS design problem on three levels: (i) the level of the components, relating to the modules of the reconfigurable machines, (ii) the machine level and their interactions, as well as the impact of these interactions on the system and (iii) the workshop level composed of all the reconfigurable machines. We have developed for each level, performance indicators to ensure a better responsiveness and a high performance of the designed system, like the modularity index, the flexibility index, the robustness index and the layout evolution effort of a reconfigurable system. For each of the studied problems, we developed multicriteria optimization models, solved through heuristics or multicriteria metaheuristics (such as archived multi-objective simulated annealing (AMOSA) and multi-objective genetic algorithms (NSGA-II)). Numerous numerical experiments and analyzes have been performed to demonstrate the applicability of our approaches.

***Keywords:*** Reconfigurable Manufacturing System (RMS), design, reconfigurability, changeability, multicriteria optimization, process plan, performance indicators.

# Liste des publications

**Articles dans des revues internationales**

[A1] **H. Haddou Benderbal**, M. Dahane and L. Benyoucef (2018). Modularity assessment in reconfigurable manufacturing system (RMS) design: an Archived multi-objective simulated annealing-based approach. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 94, Issues 1-4, pp: 729-749.

[A2] **H. Haddou Benderbal**, M. Dahane and L. Benyoucef (2017). Flexibility-based multi-objective approach for machines selection in reconfigurable manufacturing system (RMS) design under unavailability constraints. *International Journal of Production Research*, Vol. 55, Issue 20, pp: 6033-6051.

**Articles dans des conférences internationales avec actes et comités de lectures**

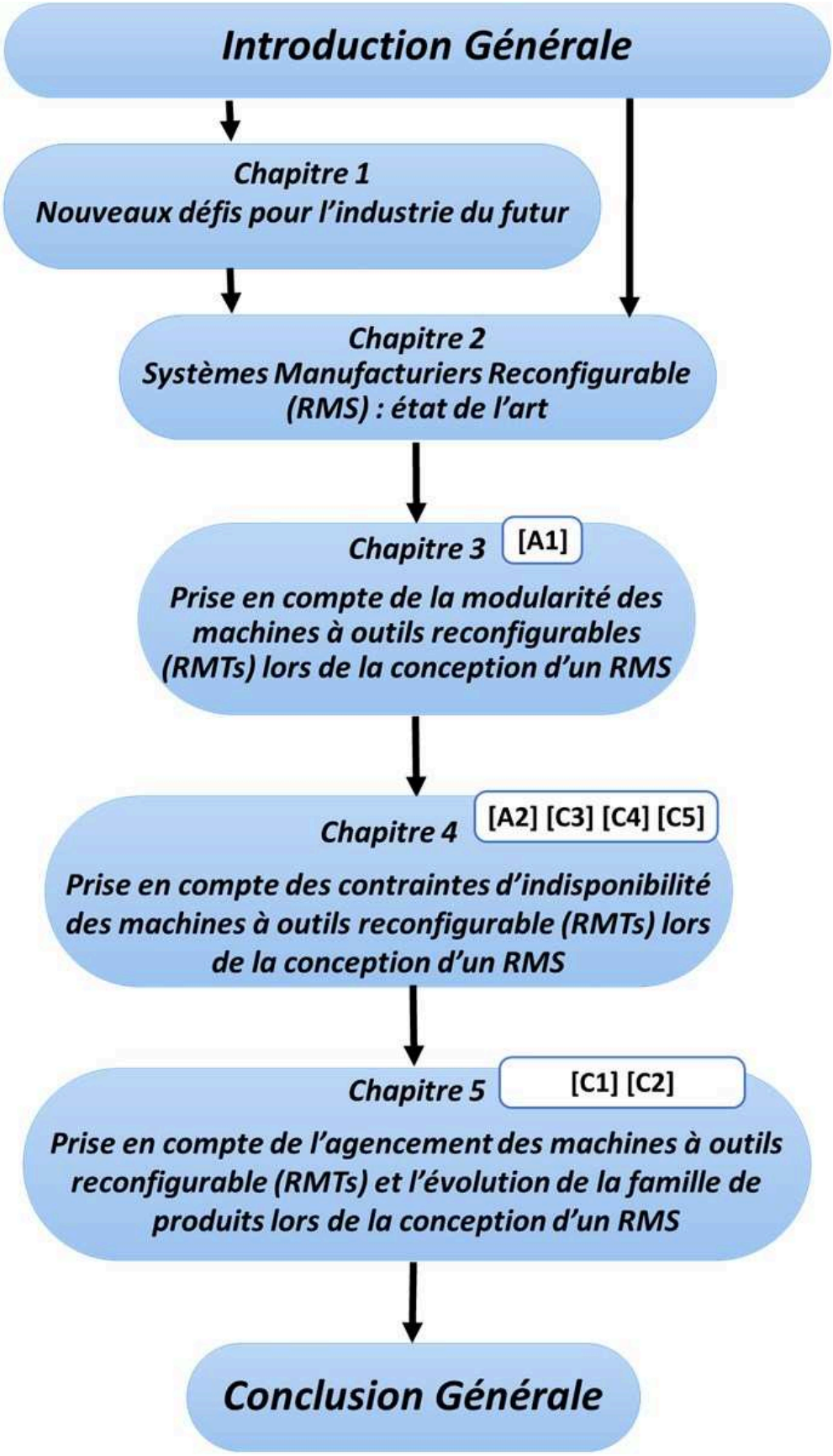
[C1] **H. Haddou Benderbal**, M. Dahane and L. Benyoucef (2018) . Exhaustive search based heuristic for solving machine layout problem in Reconfigurable Manufacturing System design. *Proceeding of the 18th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing* (*INCOM 2018*), Vol. 51, Issue 11, pp. 78-83, June 11-13, Bergamo, Italy. (**Accepted**).

[C2] **H. Haddou Benderbal**, M. Dahane and L. Benyoucef (2017). Layout evolution effort for product family in Reconfigurable Manufacturing System design. *Proceedings of the 20th IFAC World Congress*, Vol. 50, Issue 1, pp: 10166-10171, July 9-14, Toulouse, France.

[C3] **H. Haddou Benderbal**, M. Dahane and L. Benyoucef (2016). Hybrid heuristic to minimize machine's unavailability impact on reconfigurable manufacturing system using reconfigurable process plan. *Proceeding of the IFAC 2016 International Conference on Manufacturing Modelling, Management and Control (MIM 2016)*, Vol. 49, Issue 12, pp: 1626-1631, June 28-30, Troyes, France.

[C4] **H. Haddou Benderbal**, M. Dahane and L. Benyoucef (2015). A new flexibility index for machines selection in reconfigurable manufacturing system design problem. *Proceeding of the 45th International Conference on Computers & Industrial Engineering (CIE45)*, pp: 989-996, October 28-30, Metz, France.

[C5] **H. Haddou Benderbal**, M. Dahane and L. Benyoucef (2015). A new robustness index for machines selection in reconfigurable manufacturing system. *Proceeding of the 2015 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Systems Management (IESM 15)*, pp: 1019-1026, October 21-23, Sevilla, Spain.


Introduction Générale
Chapitre 1
Nouveaux défis pour l'industrie du futur
Chapitre 2
Systèmes Manufacturiers Reconfigurable (RMS) : état de l'art
Chapitre 3
[A1]
Prise en compte de la modularité des machines à outils reconfigurables (RMTs) lors de la conception d'un RMS
Chapitre 4
[A2] [C3] [C4] [C5]
Prise en compte des contraintes d'indisponibilité des machines à outils reconfigurable (RMTs) lors de la conception d'un RMS
Chapitre 5
[C1] [C2]
Prise en compte de l'agencement des machines à outils reconfigurable (RMTs) et l'évolution de la famille de produits lors de la conception d'un RMS
Conclusion Générale

# Table des Matières


Introduction Générale ..... 1

1 Chapitre 1 : Nouveaux défis pour l'industrie du futur ..... 5

1.1 Introduction ..... 6
1.2 Évolution des systemes de production ..... 6
*1.2.1 Paradigmes de business manufacturiers ..... 10*
*1.2.2 Paradigmes manufacturiers ..... 13*
1.3 Synthese ..... 18
1.4 RMS : concepts et definitions ..... 19
*1.4.1 Caractéristiques clés du RMS ..... 20*
*1.4.2 La famille de produits ..... 22*
*1.4.3 Machine-outils reconfigurables (RMTs) ..... 23*
*1.4.4 Gamme de fabrication ..... 24*
1.5 Questions de recherche et objectifs ..... 24
1.6 Conclusion ..... 27

2 Chapitre 2 : Systèmes Manufacturiers Reconfigurables (RMS) : état de l'art ..... 29

2.1 Introduction ..... 30
2.2 RMS vs systemes conventionnels ..... 30
2.3 Conception des RMSs ..... 32
2.4 Quels sont les indicateurs de performance dans les RMSs et comment sont-ils utilises ? ..... 33
2.5 Comment les RMTs sont consideres dans les RMSs ? ..... 34
2.6 L'importance de la modularite ..... 35
2.7 Comment la gamme de fabrication est definie pour RMS, et quelles sont les approches existantes utilisees pour sa generation ? ..... 36
2.8 Quel est l'impact de l'agencement sur la conception du RMS ? ..... 38
*2.8.1 Problème d'agencement et approches proposées ..... 39*
*2.8.2 L'impact du type de système sur le type d'agencement et sa configuration ..... 40*
*2.8.3 RMS et Agencement ..... 41*
2.9 Positionnement de nos problematiques de recherche ..... 42
2.10 Conclusion ..... 45

3 Chapitre 3 : Prise en compte de la modularité des machines à outils reconfigurables (RMTs) lors de la conception d'un RMS ..... 47

3.1 Introduction ..... 48
3.2 Description du probleme ..... 49
3.3 Notations et variables de decisions ..... 52
3.4 Formulation mathematique et complexite ..... 55
*3.4.1 Niveau de modularité ..... 56*
*3.4.2 Temps total d'achèvement ..... 59*
*3.4.3 Coût total de fabrication ..... 61*
*3.4.4 Contraintes du modèle ..... 63*
3.5 Approche proposee ..... 63
*3.5.1 La procédure de codage des solutions ..... 65*

*3.5.2 Processus de décodage* ... *66*
*3.5.3 Choix des solutions (TOPSIS)* ... *70*
3.6 Experiences numeriques et analyses ... 71
*3.6.1 Données du problème* ... *71*
*3.6.2 Résultats et discussions* ... *77*
3.7 Conclusion ... 79
4 Chapitre 4 : Prise en compte des contraintes d'indisponibilité des machines à outils reconfigurable (RMTs) lors de la conception d'un RMS ... 81
4.1 Introduction ... 82
4.2 Description du probleme ... 83
4.3 Formulation mathematique ... 85
*4.3.1 Temps total d'achèvement* ... *86*
*4.3.2 Indicateur de flexibilité* ... *87*
4.4 Approche proposee ... 88
4.5 Experience numerique ... 90
*4.5.1 Données du problème* ... *91*
*4.5.2 Résultats et discussions* ... *94*
4.6 Extension 1 : Robustesse des gammes de fabrication ... 95
*4.6.1 Description du problème* ... *96*
*4.6.2 Exemple illustratif* ... *97*
*4.6.3 Formulation mathématique* ... *98*
*4.6.4 Expérience numérique* ... *99*
4.7 Extension 2 : Approche hybride pour la gestion des indisponibilites des machines reconfigurables ... 101
*4.7.1 Description du problème* ... *101*
*4.7.2 Exemple illustratif* ... *102*
*4.7.3 Formulation mathématique* ... *103*
*4.7.4 Approche proposée* ... *105*
*4.7.5 Expérience numérique* ... *107*
4.8 Conclusion ... 110
5 Chapitre 5 : Prise en compte de l'agencement des machines à outils reconfigurable (RMTs) et l'évolution de la famille de produits lors de la conception d'un RMS ... 111
5.1 Introduction ... 112
5.2 Agencement d'un atelier reconfigurable ... 112
*5.2.1 Formulation mathématique* ... *115*
*5.2.2 Approche proposée* ... *117*
*5.2.3 Expérience numérique* ... *120*
5.3 Effort d'evolution d'un RMS dans une famille de produits ... 122
*5.3.1 Formulation mathématique* ... *125*
*5.3.2 Approche proposée* ... *128*
*5.3.3 Expérience numérique* ... *129*
5.4 Conclusion ... 132
Conclusion générale ... 135

# Liste des figures

FIGURE 1-1. LES REVOLUTIONS INDUSTRIELLES ET LEURS FACTEURS CLES RESPECTIFS '(ADAPTEES DE DIAS-FERREIRA, 2016; YIN *ET AL.,* 2017) ..... 8
FIGURE 1-2. EVOLUTIONS DES PARADIGMES DE PRODUCTION (ADAPTEES DE BARATA, 2003; CAGGIANO, 2010; DIAS-FERREIRA, 2016; MOURTZIS, 2016; NEVES, 2016)..... 9
FIGURE 1-3. DIFFERENCES ENTRE LES PARADIGMES DE PRODUCTION DE MASSE, PERSONNALISATION DE MASSE ET PERSONNALISATION (ADAPTEES DE HU *ET AL.*, 2011, HU, 2013 ET MOURTZIS, 2016) ..... 14
FIGURE 1-4 ARCHITECTURE DE LA FAMILLE DE PRODUITS (ADAPTEE DE ELMARAGHY *ET. AL.*, 2013, HU, 2013)..... 23
FIGURE 1-5. CONCEPTS FONDAMENTAUX DE LA CHANGEABILITE (ADAPTES DE ELMARAGHY ET WIENDAHL, 2009 ET ANDERSEN, 2017)..... 25
FIGURE 1-6. COMPOSANTES DU SYSTEME DE FABRICATION ET IMPLEMENTATION DE LA CHANGEABILITE CORRESPONDANTE (ADAPTEES D'ANDERSEN 2017)..... 26
FIGURE 2-1 LAYOUT CONFIGURATIONS (ADAPTEE DE DRIRA *ET AL*. 2007)..... 41
FIGURE 3-1 EXEMPLE D'UN PRODUIT A USINER ..... 49
FIGURE 3-2 EXEMPLE D'UN GRAPHE DE PRECEDENCES DES DIFFERENTES OPERATIONS ..... 50
FIGURE 3-3 DIFFERENTES PARTIES D'UNE MACHINE RECONFIGURABLE (MODULES DE BASE ET AUXILIAIRES)..... 51
FIGURE 3-4 GRAPHE MULTINIVEAUX..... 56
FIGURE 3-5 MODULES COMMUNS..... 57
FIGURE 3-6 MODULES PARTAGES..... 58
FIGURE 3-7 CARACTERISTIQUES COMMUNES DANS UNE FAMILLE DE PRODUITS..... 59
FIGURE 3-8 DECODAGE D'UNE SOLUTION NON REALISABLE ..... 65
FIGURE 3-9 PROCESSUS DE CORRECTION D'UNE SOLUTION NON REALISABLE ..... 65
FIGURE 3-10 ILLUSTRATION DU PROCESSUS DE DECODAGE (1ERE PHASE) ..... 68
FIGURE 3-11 ILLUSTRATION DU PROCESSUS DE DECODAGE DES MODULES (2EME PHASE) ..... 69
FIGURE 3-12 GRAPHES DE PRECEDENCES DES CARACTERISTIQUES (1), (2), (3) ET (4) ..... 72
FIGURE 4-1 GAMME DE FABRICATION GENEREE..... 84
FIGURE 4-2 INDISPONIBILITE DE LA MACHINE M3 ..... 84
FIGURE 4-3 MACHINE DE REMPLACEMENT ..... 85
FIGURE 4-4 REPORT DES OPERATIONS ..... 85
FIGURE 4-5 GRAPHES DE PRECEDENCE DES CARACTERISTIQUES (1), (2) ET (3) ..... 91
FIGURE 4-6 EXTENSION 1 : PERTURBATIONS AVEC MACHINE DE REMPLACEMENT..... 97
FIGURE 4-7 EXTENSION 1 : PERTURBATIONS SANS MACHINE DE REMPLACEMENT ..... 98
FIGURE 4-8 EXTENSION 2 : EXECUTION DE LA GAMME DE FABRICATION DE L'EXEMPLE ILLUSTRATIF ..... 103
FIGURE 4-9 EXTENSION 2 : DIAGRAMME DE L'APPROCHE HYBRIDE PROPOSEE..... 107
FIGURE 5-1 REPRESENTATION DES AGENCEMENTS VIA DES MACHINES ..... 113
FIGURE 5-2 APPROCHE PROPOSEE : AGENCEMENT INITIAL..... 118
FIGURE 5-3 APPROCHE PROPOSEE : HEURISTIQUE D'AGENCEMENT ..... 119
FIGURE 5-4 CONCEPT D'INCLUSION DES FONCTIONNALITES DES MACHINES ..... 125

# Liste des tableaux


TABLEAU 3-1 EXEMPLE D'UNE GAMME DE FABRICATION ..... 50
TABLEAU 3-2 EXEMPLE DU CODAGE D'UNE GAMME DE FABRICATION ..... 66
TABLEAU 3-3 LISTE DES CARACTERISTIQUES RESTANTES POUR LE DECODAGE ..... 67
TABLEAU 3-4 BESOINS DES OPERATIONS ..... 72
TABLEAU 3-5 SPECIFICATIONS DES OUTILS ..... 73
TABLEAU 3-6 TEMPS DE CHANGEMENTS ENTRE OUTILS (*U.T*) ..... 73
TABLEAU 3-7 COUTS DE CHANGEMENTS ENTRE OUTILS (*U.M*) ..... 73
TABLEAU 3-8 MODULES AUXILIAIRES COUT (*U.M*) / TEMPS (*U.T*) DE MANIPULATION ET D'UTILISATION ..... 73
TABLEAU 3-9 MODULES DE BASE : COUT D'UTILISATION (*U.M/U.T*) ..... 73
TABLEAU 3-10 SPECIFICATIONS DES MACHINES CANDIDATES ..... 74
TABLEAU 3-11 MODULES AUXILIAIRES REQUIS POUR LES OPERATIONS COMMUNES ..... 74
TABLEAU 3-12 TEMPS DE TRAITEMENT PAR MACHINE (*U.T*) ..... 75
TABLEAU 3-13 TEMPS DE TRANSFERT ENTRE DEUX MACHINES (*U.T*) ..... 75
TABLEAU 3-14 TEMPS DE CHANGEMENT DE CONFIGURATION (*U.T*) ..... 75
TABLEAU 3-15 COUTS DE CHANGEMENT DE MACHINES (*U.M*) ..... 76
TABLEAU 3-16 COUTS DE CHANGEMENT DE CONFIGURATION (*U.M*) ..... 76
TABLEAU 3-17 PARAMETRES AMOSA ..... 77
TABLEAU 3-18 GAMMES DE FABRICATION GENEREES ..... 77
TABLEAU 3-19 TOPSIS - POIDS DES CRITERES ..... 78
TABLEAU 3-20 CLASSEMENT DES SOLUTIONS AVEC TOPSIS ..... 78
TABLEAU 3-21 GAMME DE FABRICATION DE LA MEILLEURE SOLUTION DE TOPSIS ..... 79
TABLEAU 3-22 DETAILS DE LA MODULARITE POUR LES EXTREMITES DE CLASSEMENT TOPSIS ..... 79
TABLEAU 4-1 EXEMPLE ILLUSTRATIF : RELATIONS CARACTERISTIQUES – OPERATIONS – MACHINES ..... 84
TABLEAU 4-2 BESOINS DES OPERATIONS ..... 91
TABLEAU 4-3 SPECIFICATIONS DES OUTILS ..... 92
TABLEAU 4-4 SPECIFICATIONS DES MACHINES CANDIDATES ..... 92
TABLEAU 4-5 TEMPS DE TRAITEMENT (*U.T*) ..... 92
TABLEAU 4-6 TEMPS DE TRANSFERT ENTRE DEUX MACHINES (*U.T*) ..... 93
TABLEAU 4-7 TEMPS DE CHANGEMENT DE CONFIGURATION (UT) ..... 93
TABLEAU 4-8 PARAMETRES NSGA-II ..... 94
TABLEAU 4-9 RESULTATS DU NSGA-II : LES MACHINES SELECTIONNEES ..... 94
TABLEAU 4-10 TOPIS - POIDS DES CRITERES ..... 94
TABLEAU 4-11 CLASSEMENT DES SOLUTIONS AVEC TOPSIS ..... 94
TABLEAU 4-12 GAMME DE FABRICATION DE LA SOLUTION A ..... 95
TABLEAU 4-13 EXTENSION 1 : PARAMETRES DU NSGA-II ..... 99
TABLEAU 4-14 EXTENSION 1 : RESULTATS DU NSGA-II : LES MACHINES SELECTIONNEES ..... 100
TABLEAU 4-15 EXTENSION 1 : GAMME DE FABRICATION ASSOCIEE A LA SOLUTION A ..... 100
TABLEAU 4-16 EXTENSION 1 : ROBUSTESSE DE LA MEILLEURE SOLUTION TROUVEE EN TERMES DE FLEXIBILITE ..... 101
TABLEAU 4-17 EXTENSION 2 : EXEMPLE ILLUSTRATIF ..... 102
TABLEAU 4-18 EXTENSION 2 : LA GAMME DE FABRICATION RETENUE ..... 108
TABLEAU 4-19 EXTENSION 2 : INSTANTS DE DISPONIBILITE/INDISPONIBILITE DES MACHINES SELECTIONNEES ..... 108
TABLEAU 4-20 EXTENSION 2 : NOUVELLE SEQUENCE GENEREE PAR NOTRE L'APPROCHE HYBRIDE ..... 109
TABLEAU 5-1 GAMME DE FABRICATION SIMPLIFIEE ..... 114
TABLEAU 5-2 LA GAMME DE FABRICATION ADOPTEE ..... 120

TABLEAU 5-3 NOMBRE D'OCCURRENCES DES MACHINES SELECTIONNEES ..... 120
TABLEAU 5-4 MATRICE DE LOCALISATION ..... 120
TABLEAU 5-5 AGENCEMENT INITIAL ..... 121
TABLEAU 5-6 MATRICE MINAD ..... 121
TABLEAU 5-7 MATRICE MAXAD ..... 121
TABLEAU 5-8 RESULTAT DE L'AGENCEMENT ..... 122
TABLEAU 5-9 GAMME DE FABRICATION POUR LE PRODUIT *P1* ..... 128
TABLEAU 5-10 MATRICE D'INCLUSION DES MACHINES ..... 129
TABLEAU 5-11 GAMME DE FABRICATION POUR LE PRODUIT *P2* ..... 129
TABLEAU 5-12 GAMME DE FABRICATION POUR LE PRODUIT *P3* ..... 129
TABLEAU 5-13 SOLUTION D'ENTREE ..... 130
TABLEAU 5-14 VALEURS DES TROIS CRITERES POUR LA SOLUTION D'ENTREE ..... 130
TABLEAU 5-15 OCCURRENCES DES MACHINES PAR PRODUIT ..... 130
TABLEAU 5-16 NOMBRE DE CONFIGURATIONS PAR MACHINE ..... 130
TABLEAU 5-17 MATRICE DE SIMILARITES MSIM ..... 130
TABLEAU 5-18 RELATIONS MACHINE-OPERATION ..... 131
TABLEAU 5-19 SOLUTION PROPOSEE PAR AMOSA ..... 131
TABLEAU 5-20 VALEURS DES CRITERES POUR LA SOLUTION AMOSA ..... 132

# Introduction Générale

Dans un environnement politique, économique, sociétal et environnemental de plus en plus instable et sous la pression de la globalisation, d'une concurrence croissante, des systèmes manufacturiers de plus en plus complexes, des services, des produits et des technologies de durées de vies très courtes, beaucoup d'entreprises cherchent à repenser leurs pratiques de production ainsi que leurs philosophies. Les industriels attestent que le développement de nouvelles approches et outils d'aide à la décision est plus que jamais une nécessité pour leur permettre de prendre la bonne décision, au bon moment pour le bon problème. Ce dernier est perçu par beaucoup de décideurs comme un avantage concurrentiel.

À travers cette thèse, nous cherchons à étudier la problématique de conception des *systèmes manufacturiers reconfigurables* (Reconfigurable Manufacturing System – RMS). Le RMS est défini sur les bases des hauts niveaux de réactivité et d'efficacité, et répond parfaitement aux nouvelles exigences pour l'industrie du futur. L'objectif consiste à concevoir des systèmes réactifs en se basant sur leur caractéristique clé, à savoir la *reconfigurabilité*. Plus précisément, nous visons le développement d'approches évolutionnaires multicritères basées sur une nouvelle famille d'indicateurs de performance pour la conception d'un système manufacturier reconfigurable (RMS).

Nous avons étudié ce problème sur trois niveaux :

(i) Le niveau des composantes, relatifs aux modules des machines reconfigurables. *Nous visons la prise en compte explicite de la modularité des machines à outils reconfigurable (RMTs) lors de la conception d'un système de production reconfigurable (Chapitre 3)*.

(ii) Le niveau des machines et leurs interactions, ainsi que l'impact de ces interactions sous contraintes d'indisponibilités sur le système. *En effet, nous visons la prise en compte explicite des contraintes d'indisponibilité des machines à outils reconfigurable (RMTs) et leurs interactions lors de la conception d'un RMS (Chapitre 4)*.

(iii) Le niveau de l'atelier, composé de l'ensemble des machines reconfigurables. *De même, nous visons la prise en compte explicite des contraintes relatives à l'agencement des machines à outils reconfigurable (RMTs) dans un atelier et celles relatives à la famille de produits sur la conception d'un système de production reconfigurable (Chapitre 5)*.

Nous avons développé pour chaque niveau, des indicateurs de performance afin d'assurer une meilleure réactivité ainsi qu'une haute performance du système conçu.

Ce mémoire s'appuie sur un ensemble d'articles que nous avons publié traitant chacun des questions de recherche dérivées de notre problématique générale. Il est devisé en cinq chapitres et s'organise comme suit :

Le premier chapitre encadre et contextualise le travail de recherche proposé. Un aperçu du contexte derrière cette thèse est présenté en abordant plusieurs termes liés à la production et aux défis pour l'industrie du futur. De plus, une synthèse illustre les différents paradigmes du business et de la production apparus au cours de l'histoire manufacturière avec un accent sur les paradigmes manufacturiers modernes. Nous nous focalisons en suite sur les différents concepts liés et utilisés dans les RMSs. Parmi ces concepts, nous rappelons l'importance des machines à outils reconfigurables (RMTs) au sein des RMSs, la différence entre le concept de flexibilité et celui de la reconfigurabilité et les notions liées aux gammes de fabrication (appelées process plan en anglais). À l'issue de cette synthèse, nous proposons une description générale de notre problématique de recherche et nous la positionnons par rapport aux défis de l'industrie du futur.

Le deuxième chapitre est dédié essentiellement à la présentation et à l'analyse de notre état de l'art sur les RMSs et les défis associés. L'objectif derrière cette analyse est de positionner notre problématique par rapport aux travaux de recherche existants, dédiés aux systèmes de production manufacturiers et aux problématiques associées. De plus, nous cherchons à identifier les approches développées pour traiter ces problématiques.

Le troisième chapitre présente notre première approche développée afin de générer et sélectionner les meilleures gammes de fabrication nécessaires lors de la phase de conception d'un RMS. *Le problème est traité en considérant la modularité des machines à outils reconfigurables (RMTs) lors de la conception du système*. Un modèle mathématique multicritère est proposé afin de maximiser la modularité du système (indicateur de modularité que nous avons proposé), de minimiser le temps d'achèvement de la dernière opération sur la dernière machine de la gamme de fabrication (appelé Completion Time en anglais) et de minimiser le coût total du système, incluant le coût de changement d'une configuration des machines, le coût d'utilisation des modules de bases et des modules auxiliaires pour ces configurations et le coût d'exploitation des machines. De plus, nous avons adapté une technique de codage en nombres réels permettant d'éviter les solutions non réalisables lors de l'utilisation de la métaheuristique AMOSA (Archived Multiobjective Simulated Annealing) pour résoudre notre problème d'optimisation. La méthode TOPSIS (Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution) est utilisée par la suite pour choisir la meilleure solution (gamme de fabrication) selon les préférences du décideur. Un exemple numérique est donné afin d'illustrer l'applicabilité de notre approche de résolution.

Le quatrième chapitre aborde *le problème de prise en compte des contraintes d'indisponibilité des machines à outils reconfigurables (RMTs) et leurs interactions lors de la conception d'un RMS*. En effet, les indisponibilités des machines ont des influences certaines sur les choix des RMTs entrant dans la conception du système. Dans un premier temps, nous avons proposé trois nouveaux indicateurs de performance respectivement : (i) l'indicateur de flexibilité, (ii) l'indicateur de robustesse et (iii) une amélioration de

l'indicateur de robustesse afin de choisir les meilleures gammes de fabrication. Chaque indicateur, en plus du critère relatif au temps total d'achèvement, est associé à un problème d'optimisation multicritère. Nous avons développé trois modèles mathématiques guidés par l'un des indicateurs proposés. Dans un deuxième temps, et pour résoudre les deux premiers problèmes d'optimisation multicritère, des adaptations de la métaheuristique NSGA-II (Elitist Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II) sont proposées et la méthode TOPSIS est utilisée par la suite pour sélectionner la meilleure gamme de fabrication. Pour terminer, une méthode hybride combinant NSGA-II et une heuristique spécifique est proposée pour traiter le troisième problème multicritère. Des exemples numériques illustratifs sont proposés pour démontrer l'applicabilité des trois approches de résolution.

Le cinquième chapitre aborde *le problème de conception d'un RMS à un niveau plus haut (impacts des contraintes d'agencement des RMTs et celles de la famille de produits sur la conception des RMS) par rapport aux problèmes abordés dans les chapitres trois (impacts des composantes des RMTs sur le RMS) et quatre (impacts des indisponibilités des machines et leurs interactions sur le RMS)*. En effet, ce dernier chapitre présente deux études relatives aux relations d'un RMS avec son environnement. Plus précisément, le premier problème étudié concerne les positionnements des RMTs lors de la conception d'un RMS. Pour résoudre ce problème, une méthode heuristique monocritère basée sur une recherche exhaustive est proposée. L'heuristique utilise les gammes de fabrication générées par les méthodes proposées dans les chapitres 3 et 4 pour déterminer le meilleur agencement de l'atelier reconfigurable. Le deuxième problème est consacré à l'étude de l'évolution des contraintes de la production, relatives à la famille de produits et leurs impacts sur la conception du RMS. Un nouvel indicateur de performance est proposé permettant de sélectionner les meilleures machines à inclure dans le nouveau RMS. Les fonctionnalités des machines sélectionnées sont prises en compte pour garantir la meilleure évolution du RMS, permettant ainsi de répondre au mieux aux changements des contraintes de la famille de produits pour laquelle il est conçu. L'applicabilité des deux approches relatives aux deux problèmes étudiés dans ce chapitre est illustrée à travers un panel d'expériences numériques et d'analyses.

Nous terminons ce mémoire par une conclusion générale avec quelques remarques et pistes de recherche prometteuses sur l'ensemble des problématiques abordées dans cette thèse.

# 1 Chapitre 1 : Nouveaux défis pour l'industrie du futur

Ce chapitre encadre et contextualise nos travaux de recherche. Dans un premier temps, nous présentons un aperçu du contexte derrière cette thèse en abordant plusieurs termes liés à la production et aux défis pour l'industrie du futur. De plus, une synthèse illustre les différents paradigmes du business et de la production apparus au cours de l'histoire manufacturière avec un accent sur les paradigmes manufacturiers modernes. Nous nous focalisons en suite sur les différents concepts liés et utilisés dans les RMS. Parmi ces concepts, nous rappelons l'importance des machines à outils reconfigurables (RMTs) au sein des RMS, la déférence entre le concept de flexibilité et celui de la reconfigurabilité et les notions liées aux gammes de fabrication (appelées process plan en anglais). À l'issue de cette synthèse, nous proposons une description générale de notre problématique de recherche et nous la positionnons par rapport aux défis.

## 1.1 Introduction

Sous l'effet de la globalisation et des transformations socio-économique rapides au cours des dernières décennies, les clients sont de plus en plus exigeants et imposent des solutions et des produits sur mesure. L'acquisition des données et des informations dérivées, de plus en plus volumineux et complexes, jouent un rôle central dans la réussite des entreprises. Toutefois, ces changements ont conduit à une augmentation de la complexité des environnements manufacturiers et ont soulevé beaucoup de nouveaux défis.

Dans ce chapitre, nous cherchons à encadrer et contextualiser notre travail de recherche. Un aperçu du contexte derrière cette thèse est présenté en abordant plusieurs termes liés à la production et aux défis pour l'industrie du futur. À travers une synthèse, nous illustrons les différents paradigmes du business et de la production apparus au cours de l'histoire manufacturière avec un accent sur les paradigmes modernes. Nous nous focalisons plus en détails sur les systèmes manufacturiers reconfigurables (RMS). Nous rappelons les différents concepts liés et utilisés dans les RMSs, ainsi que l'importance des machines à outils reconfigurables (RMTs), la différence entre le concept de flexibilité et celui de la reconfigurabilité et les notions liées aux gammes de fabrication (appelées process plan en anglais). Nous terminons par une description de notre problématique de recherche.

## 1.2 Évolution des systèmes de production

À travers l'histoire, nous observons que les industriels et les académiciens ont proposé de nombreux paradigmes (i.e. la façon dont un système a été conçu et pensé dans ses grandes lignes) de production dont l'objectif est de permettre aux entreprises de surmonter les défis posés par les évolutions des systèmes manufacturiers et leurs environnements. Néanmoins, pas tous les paradigmes peuvent atteindre l'ensemble des objectifs mentionnés précédemment à savoir, globalisation, complexité, …. Cela peut être attribué principalement au manque de compréhension des nuances de ces paradigmes et de leurs avantages potentiels (Nambiar, 2010). Dans cette section, nous visions à présenter les paradigmes les plus importants, de la production de masse à l'introduction plus récente des systèmes manufacturiers modernes comme les systèmes flexibles et les systèmes reconfigurables.

Les évolutions des paradigmes des systèmes de production ont toujours été pilotées par les évolutions des paradigmes des business manufacturiers. Les paradigmes des business manufacturiers dominants par ordre chronologique sont respectivement : production artisanale, production américaine, production de masse, production Lean, production agile, personnalisation de masse ainsi que la personnalisation. Sauf la production américaine, la plupart des paradigmes sont jusqu'aujourd'hui « opérationnels » dans différents secteurs industriels ( Mourtzis et Doukas, 2014).

Beaucoup de chercheurs constatent que le développement de ces paradigmes est régi par plusieurs paramètres liés principalement à la production, au business ainsi qu'aux changements entre les différentes périodes industrielles (Barata, 2003; Dias-Ferreira, 2016; Mourtzis, 2016). Les changements entre ces périodes ont engendré des bouleversements commerciaux, politiques et sociétales. De plus, les évolutions de ces paradigmes caractérisent les différentes périodes des transitions industrielles.

Selon Barata (2003), le passage entre ces périodes n'a pas été brusque, mais nous pouvons trouver des transitions où les différentes périodes d'évolution coexistent pendant longtemps. En revanche, cette coexistence est caractérisée par beaucoup d'ambiguïté. Le constat est aussi valable pour les paradigmes des systèmes de production et le passage entre ces derniers.

Mourtzis (2016) observe que ces différents paradigmes peuvent être corrélés essentiellement suite aux mouvements entre trois étapes : (i) les ateliers d'artisanats employant des ouvriers qualifiés, (ii) les systèmes industriels utilisant une automatisation rigide (Long-linked industrial systems using rigid automation), et (iii) les entreprises post-industrielles caractérisées par des ressources flexibles et un travail intellectuel régi par des informations intensives.

Dias-Ferreira (2016)relate les avancements dans le monde industriel avec les déclencheurs des révolutions allant des industrie (1.0 : mécanisation, 2.0 : industrialisation et 3.0 : automatisation) à l'usine de futur (industrie 4.0). De plus, Yin *et al.,*(2017) présentent les évolutions des systèmes de production de l'industrie 1.0 à l'industrie 4.0 en insistant sur les caractéristiques de chaque période. En effet, l'industrie 1.0 a été caractérisée par un marché simple où la demande possède une seule dimension à savoir le volume de production. Pendant l'industrie 2.0, la demande a évolué en acquérant une deuxième dimension qui est la variété des produits. Avec l'introduction des systèmes informatiques et des nouvelles technologies, le marché durant l'industrie 3.0 est devenu volatile. La demande étant volatile a ajouté une troisième dimension liée essentiellement au délai de livraison.

De nos jours, nous constatons un développement rapide des technologies et des concepts tels que l'internet des objets (IoT) et le Big Data. Ceci, a conduit rapidement la société vers l'industrie 4.0. Dans cette industrie, de nombreux aspects sont inconnus et incertains, entre autres les dimensions liées aux demandes clients et aux futurs architectures des produits (Yin *et al.,*2017). En se basant sur les travaux de (Dias-Ferreira, 2016; Yin *et al.*, 2017), nous représentons ces révolutions dans la Figure 1-1.




**Figure 1-1. Les révolutions industrielles et leurs facteurs clés respectifs '(adaptées de Dias-Ferreira, 2016; Yin *et al.*, 2017)**

D'autres études proclament que, les changements majeurs dans les orientations des paradigmes peuvent être illustrés en identifiant trois grandes périodes (Caggiano, 2010). Ces périodes sont respectivement : (i) la période pré-machine-outils à commande numérique (pre-CNC : pre-computer numerical control), (ii) la période des CNC et (iii) la période des connaissances. Dans le même contexte, Barata (2003) considère trois périodes majeures pour caractériser ces développements de paradigmes. En effet les périodes sont respectivement, l'âge industriel, l'âge de l'information et des ordinateurs et l'âge post-informations. L'auteur identifie et présente les caractéristiques de chacune des trois périodes ainsi que leurs déclencheurs majeurs. En se basant sur ces informations, nous résumons dans la Figure 1-2, les différents paradigmes de business ainsi que les paradigmes de productions associés.

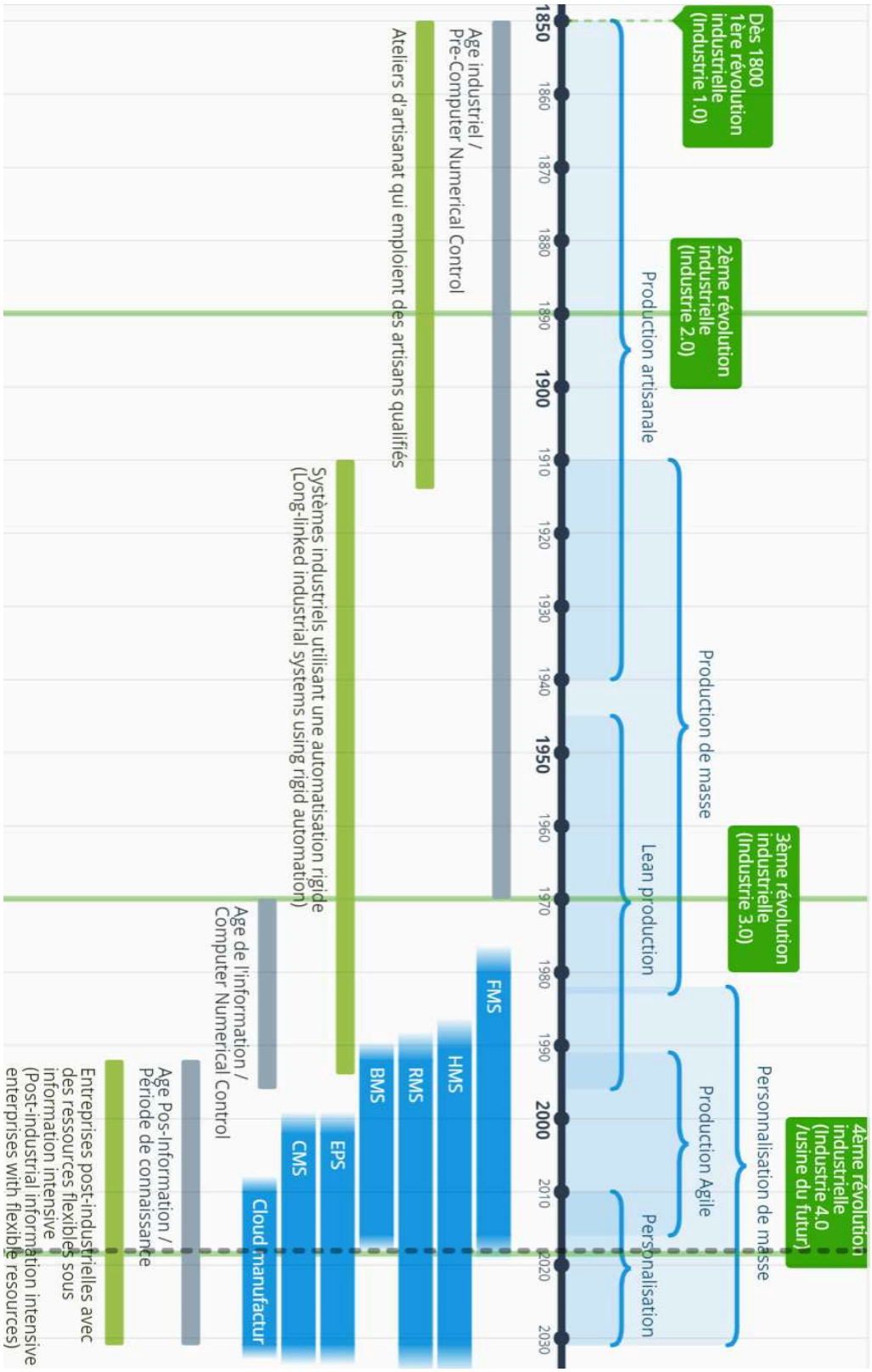



**Figure 1-2. Evolutions des paradigmes de production (adaptées de Barata, 2003; Caggiano, 2010; Dias-Ferreira, 2016; Mourtzis, 2016; Neves, 2016)**

### 1.2.1 Paradigmes de business manufacturiers

#### *A. Production artisanale : (Craft Production)*

Ce paradigme a commencé au début du XIXe siècle. Pendant cette période, les produits étaient conçus pour répondre exactement aux besoins des clients et on faisait un produit à la fois. La production était réalisée par des ouvriers hautement qualifiés capables de participer aux différentes phases de réalisation du produit avec des outils simples mais flexibles (Barata, 2003; Piore et Sabel, 1984; Womack *et al.*, 1990). Les processus de production n'étaient pas standardisés, ce qui impliquait l'impossibilité de créer des pièces interchangeables et communes. Ceci représentait un inconvénient majeur, car des pièces peuvent être manquantes, pour être incorporées dans plusieurs produits identiques.

Le management des entreprises artisanales était décentralisé. Les fournisseurs et les clients étaient en contact direct avec l'entreprise. Chaque producteur était spécialisé dans une ligne de travail et dépendait des autres partenaires.

La production était lente, caractérisée par une grande variété de produits, mais les produits étaient chers. Ce qui permet de répondre d'une manière flexible à des marchés uniques, imprévisibles et changeants (Barata, 2003; Neves, 2016).

#### *B. Production de masse (Mass Production)*

Le passage du XIX au XX siècle est une charnière entre deux ères industrielles. La production et la consommation de masse bouleversent un univers d'industries lourdes ou artisanales exploitant des richesses naturelles au profit d'une minorité. En effet, ce paradigme est arrivé pour répondre aux lacunes de la production artisanale. Pendant cette période, le client a dû s'adapter aux produits disponibles et non pas le contraire. L'objectif principal derrière ce paradigme est de produire de grandes quantités non diversifiées à un prix accessible. Ceci est devenu possible, entre autres, grâce à l'utilisation de composants standards (Barata, 2003; Leitao, 2004; Neves, 2016). Les caractéristiques principales sont (Barata, 2003) :

- Les coûts marginaux sont faibles ;
- L'usine pousse le produit vers le client ;
- Les produits ne sont pas diversifiés, mais fabriqués en grandes quantités ;
- Les outils sont hautement spécialisés ;
- Les relations entre les fournisseurs et les clients sont faibles ;
- Le marché est prévisible.

Ce paradigme permet de fabriquer des produits spécifiques en gros volumes à travers l'utilisation des ***systèmes manufacturiers dédiés (DMS Dedicated Manufacturing Systems).*** La production est considérée

comme rentable et possédant la qualité requise (Caggiano, 2010). Les principaux éléments des DMS sont : les lignes de transfert, les stations d'assemblage, les outils fixes et les processus d'automatisation dédiés.

L'évolution de la demande des clients et les changements socio-économiques ont engendré une pression croissante pour réduire les coûts et augmenter la qualité. En effet, l'évolution de l'automatisation, l'introduction de nouvelles technologies, de nouveaux systèmes d'information et des produits avec des cycles de vies très courts, ont imposé le remplacement des systèmes dédiés par une production encore plus automatisée (Barata, 2003; Dias-Ferreira, 2016). Ce contexte a introduit une turbulence qui a rendu le paradigme de la production de masse de moins en moins approprié.

### *C. Production Lean : (Lean Manufacturing)*

Dès le début des 1960s, les entreprises japonaises ont commencé à utiliser le modèle développé par Taiichi Ohno en 1988. Ce Modèle est nommé Système de production Toyota (TPS Toyota Production System). Il est considéré comme l'une des premières bases de la production Lean (Barata, 2003; Dias-Ferreira, 2016).

Ce paradigme est apparu dans les années 70. Son objectif principal est d'atteindre un rendement élevé en minimisant au mieux les stocks, éliminant efficacement les déchets, réduisant les coûts et améliorant la qualité. Cela est possible en examinant tous les aspects, du développement des produits, au service client en passant par la production et l'organisation des ressources physiques et humaines (Setchi et Lagos, 2004). Les principes de la production Lean sont respectivement : une qualité parfaite en temps et en heure, la minimisation voir l'irradiation des déchets en supprimant toutes les activités sans valeur ajoutée (Barata, 2003; Neves, 2016), l'amélioration continue, la flexibilité et les relations à long terme avec l'ensemble des acteurs internes et externes de l'entreprise (Caggiano, 2010; Rossitza *et al.*, 2004).

Les principales applications de la production Lean peuvent être retrouvées dans les secteurs de l'automobile et de l'électronique. Ces deux secteurs sont caractérisés par des marchés stables avec des volumes élevés et une faible variété de produits. Dans le cas contraire, à savoir les secteurs caractérisés par des volumes faibles et une grande variété de produits, les chercheurs ont souligné que les applications de la production Lean sont rares (James-Moore et Gibbons, 1997). Selon Barata (2003), les inconvénients de la production Lean sont :

- Les pressions permanentes pour réduire les déchets entraînent une réduction des effectifs (moins de personnes, moins de ressources, moins de tout).
- Trop de réduction peut engendrer des vulnérabilités vis-à-vis des turbulences du marché. Ceci implique aussi le ralentissement de l'innovation en raison du manque de ressources.
- L'influence des institutions sociales et politiques est largement ignorée.
- Les variations ou les réductions de la demande des produits finis sont mal gérées.

Malgré l'introduction des principes Lean, les entreprises manufacturières ont dû mal à confronter et satisfaire la situation sociale et la mondialisation des marchés. De plus, en raison de l'amélioration continue, de nouvelles exigences ont émergé comme les changements et les adaptations. Les demandes de produits personnalisés, de haute qualité et simultanément moins chers augmentent. Ces exigences sont aussi le fruit de la complexité des systèmes de production qui elle aussi augmente.

Ce contexte a conduit à l'émergence du paradigme de la personnalisation de masse. Ce paradigme a changé l'orientation des systèmes de production vers les objets produits et s'est concentré sur la demande exclusive et individualisée.

### *D. Personnalisation de masse : (Mass Customization)*

Ce paradigme a émergé dans les années 1980 en réponse à l'augmentation de la demande pour la variété des produits (Davis, 1987; Hu, 2013b), ainsi qu'à la mondialisation omniprésente des marchés. Ce paradigme est défini par le principe « développer, produire, commercialiser et livrer des biens et des services abordables avec assez de variété et de personnalisation que presque tout le monde peut trouver exactement ce qu'il veut » (Koren, 2010a).

La personnalisation de masse est basée sur la satisfaction des clients en individualisant les produits. Cela implique que sa réussite dépend principalement de l'utilisation d'une approche modulaire en termes de développement et de production des produits (Ribeiro *et al.*, 2014).

L'établissement de ce paradigme est toujours en cours (Mourtzis, 2016). Il cible, d'une part, une économie de gamme en concevant des variantes basées sur l'architecture de famille de produits et en permettant aux clients de choisir entre des combinaisons de conception (Hu *et al.*, 2011). D'autre part, il s'adresse à un marché de masse où il doit réaliser des économies d'échelles, à un degré comparable à celui de la production de masse.

### *E. Production Agile : (Agile manufacturing)*

Dans les années 90s, la personnalisation, les incertitudes des marchés, de la société et des technologies ont commencé à être de plus en plus visibles (Barata, 2003; Neves, 2016). Les objectifs des paradigmes ont été orientés vers la réalisation de systèmes de production, qui pourraient être continuellement ajustés de manière rapide et rentable face aux exigences imprévues des marches. Dans ce contexte, la production agile a été proposée. Ce paradigme est utilisé comme un cadre qui intègre à la fois les principes Lean avec la personnalisation de masse (Nambiar, 2010). Nous pouvons ainsi définir l'agilité comme étant la capacité de se développer et de répondre aux exigences dans un environnement caractérisé par des changements constants et imprévisibles (Barata, 2003).

### *F. Personnalisation*

L'un des principaux facteurs qui ont conduit à l'émergence de ce nouveau paradigme est la volonté des clients d'influencer et de participer à la conception des produits (Hu, 2013a). La personnalisation est adaptée aux besoins individuels et aux préférences des clients. En effet, les clients participent eux même avec les acteurs de l'entreprise dans le processus de conception de leurs besoins.

La personnalisation est différente de la personnalisation de masse en termes d'objectifs ainsi qu'au niveau de la participation des clients. La personnalisation de masse vise une double économie de gamme et d'échelle respectivement (Hu, 2013a). En plus de ces deux stratégies, l'objectif de la personnalisation est d'obtenir l'efficacité des produits et d'engager les clients dans la phase de conception. Ce qui permettra de créer la différenciation de la valeur (Neves, 2016). Basées sur les travaux de Mourtzis (2016), Hu (2013a) et Hu *et al.*(2011), ces différences sont résumées dans la Figure 1-3.

## 1.2.2 **Paradigmes manufacturiers**

Dans cette section, nous nous intéressons à la personnalisation de masse et les paradigmes de production modernes associés. La personnalisation de masse a imposé l'augmentation de la flexibilité et de l'agilité dans les systèmes de production (Neves, 2016). Afin de répondre à ces exigences, plusieurs paradigmes de production ont été proposés. Nous citons : les systèmes manufacturiers flexibles (Flexible Manufacturing Systems FMS), les systèmes manufacturiers bioniques (Biological Manufacturing Systems BMS), les systèmes manufacturiers holoniques (Holonic Manufacturing Systems HMS), les systèmes manufacturiers reconfigurables (Reconfigurable Manufacturing Systems RMS), les systèmes manufacturiers changeables (Changeable Manufacturing Systems CMS), les systèmes de production évolutifs (Evolvable Production Systems EPS) et la production cloud (Cloud Manufacturing). À l'exception de FMS, ces paradigmes de production n'ont pas encore atteint une maturité suffisante pour avoir des applications industrielles (ElMaraghy, 2009; Neves, 2016).

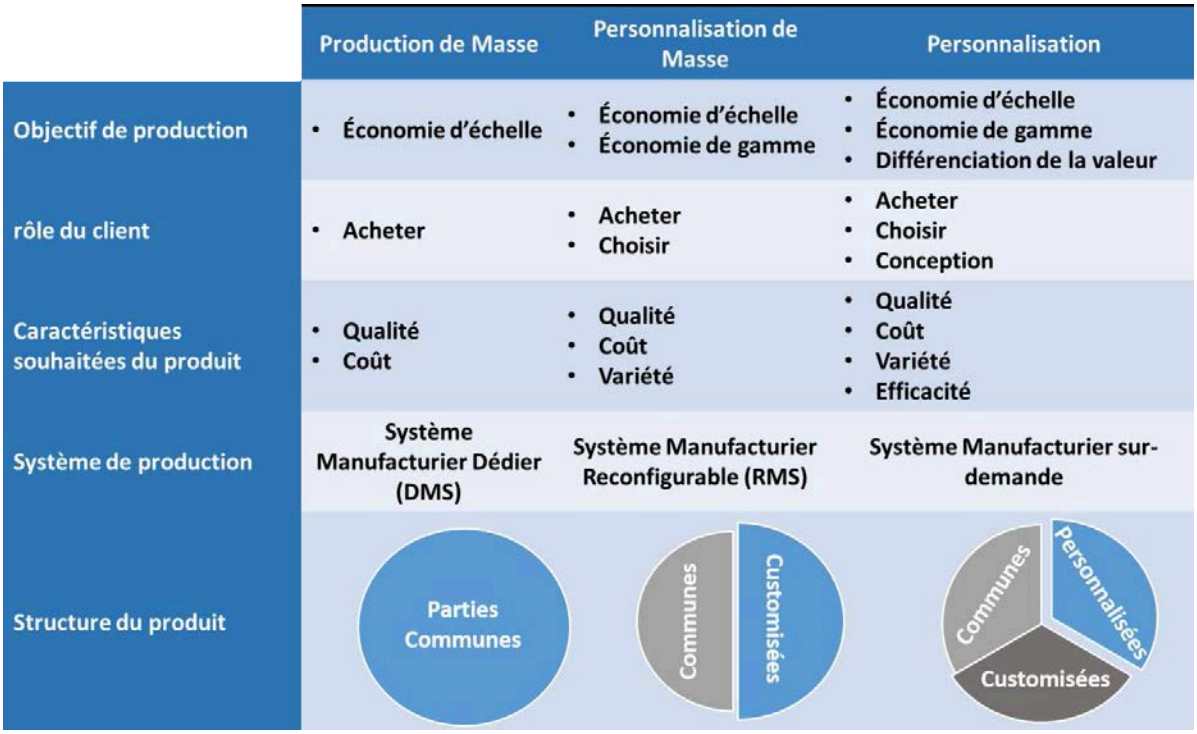



**Figure 1-3. Différences entre les paradigmes de production de masse, personnalisation de masse et personnalisation (adaptées de Hu *et al.*, 2011, Hu, 2013 et Mourtzis, 2016)**

### *A. Systèmes Manufacturiers Flexibles (Flexible Manufacturing Systems FMS)*

Ce paradigme est défini comme "un système de production contrôlé par ordinateur capable de traiter une variété de types de pièces (Looveren *et al.*, 1986). Le FMS est considéré comme l'une des raisons de la propagation de la personnalisation de masse, atteignant rapidement un pic à la fin des années 1990 et au début des années 2000 (Mourtzis, 2016).

Ce système offre une flexibilité généralisée intégrée (ElMaraghy *et al.*, 2013). Il est développé pour satisfaire une production de mi-volume et de mi-variété. Pour cela, le système utilise les similitudes entre les parties dans la conception et/ou la production (Caggiano, 2010). Ceci est possible par une focalisation sur la technologie de groupe et la création des familles de produits (Renzi *et al.,* 2014).

Les principaux composants des FMS sont les machines à commandes numériques par ordinateur (Computer Numerically Controlled CNC), les outils pour les faire fonctionner, les robots et les systèmes de manutention automatisés (Setchi et Lagos, 2004). Suivant les objectifs de l'entreprise, la flexibilité peut être quantifiée en tant que métrique pour guider la conception du FMS (Michalos *et al.*, 2012).

Bien que la flexibilité soit définie comme *la capacité des systèmes manufacturiers à gérer les changements et/ou les instabilités de leurs environnements* (Buzacott et Mandelbaum, 1985; Mascarenhas, 1981), la

flexibilité généralisée du FMS permet des changements et des adaptations des processus et des volumes de production dans les limites prédéfinies, sans un changement physique du système (ElMaraghy et Wiendahl, 2009). Ce type d'architecture ne permet pas de modifier la structure du système (Caggiano, 2010), mais implique un coût initial d'investissement très élevé et les attributs de flexibilité sont parfois sous-utilisés.

Par constat, le FMS est un système à capacités fixes, prédéterminées qui convient à la production d'une variété prédéterminée de produits. Si la variété change, l'ensemble du système devient obsolète (AlGeddawy, 2011). En effet, les capacités limitées en termes d'évolutivité (mise à niveau, ajouts) et de personnalisation, impactent fortement la réactivité du FMS. Par conséquent, ce système est désavantageux en termes d'investissement initial.

Les prochains paradigmes manufacturiers modernes que nous allons voir sont apparus pour surmonter les limites du FMS. Ces paradigmes sont axés sur l'incertitude et les changements imprévisibles.

### *B. Systèmes manufacturiers biologique (Biological Manufacturing Systems BMS)*

Connu aussi sous le nom de Bionic Manufacturing Systems (BMS), ce paradigme s'inspire de la biologie et est conçu pour s'adapter dynamiquement à des changements non pré-déterministes. Pour ce faire, le paradigme utilise plusieurs concepts. Parmi ces derniers, nous trouvons, l'apprentissage, l'adaptation (à l'aide des algorithmes génétiques GA), et l'auto-organisation (Ueda, 2007). Les BMS suivent une architecture hiérarchique où les mécanismes de régulation sont atteints par les deux méthodes d'échanges d'informations (descendante ou ascendante) (Dias-Ferreira, 2016).

Le paradigme BMS dépend des simulations informatiques pour poursuivre l'émergence du comportement du système, sans un modèle de système formel ou d'analyse (AlGeddawy, 2011). Il répond à la nature imprévue des systèmes manufacturiers en commençant avec les relations entre les différents composants du système, et en construisant plus de connaissances sur ces entités et leur structure au fur et à mesure que le temps passe. Grâce à l'auto-organisation, les informations sont propagées dans les couches inférieures, ce qui conduit finalement à l'établissement d'une structure hiérarchique capable d'effectuer des tâches complexes.

### *C. Systèmes manufacturiers holoniques (Holonic Manufacturing Systems HMS)*

Tout comme BMS, le paradigme Holonic Manufacturing Systems (HMS) a été développé sur la base que les systèmes manufacturiers nécessitent une structure hiérarchique pour atteindre une véritable agilité (Leitão, 2009). HMS est basé sur des blocs de construction appelés *holons*, qui sont des agents de coopération autonomes travaillant dans une *holarchie*. L'*holarchie* est définie comme un ensemble d'*holons* hiérarchisés, qui coopèrent et partagent des connaissances pour atteindre des objectifs de plus haut niveau (Leitão, 2009). Ce qui fait du HMS un modèle multi-agent. Un holone, dans le contexte de production, peut

représenter une entité coopérative autonome, soit logique et/ou physique (machine, commande ou opérateur humain).

HMS a été proposé comme un paradigme de contrôle hautement distribué, qui est nécessaire d'une part, pour gérer les incertitudes dans le système lui-même comme les incertitudes des processus de production et d'autre part, pour gérer des incertitudes dans l'environnement du système (AlGeddawy, 2011). Son objectif est de développer des systèmes manufacturiers évolutifs, reconfigurables, flexibles et réactifs (Barata, 2003). Néanmoins, ce dernier est considéré comme un simple modèle de contrôle (AlGeddawy, 2011). De plus, la structure physique du système ne change pas à travers un modèle de contrôle, donc, il n'est pas vraiment conforme à la notion d'évolution (AlGeddawy, 2011).

### *D. Systèmes manufacturiers reconfigurables (Reconfigurable Manufacturing Systems RMS)*

Dès le début des années 90s, beaucoup d'industriels ont constaté que les systèmes de production doivent être réactifs davantage. Un système est réactif, s'il a la capacité d'ajuster sa production face à la fluctuation de la demande et d'adapter ses fonctionnalités aux nouveaux besoins (Koren 2010)

Dans ce contexte, Koren a introduit le système manufacturier reconfigurable qui est basé sur la reconfigurabilité et l'évolutivité (Koren *et al*., 1999). Le RMS est aussi défini sur les bases de hauts niveaux de réactivité. Alors que l'agilité est davantage une philosophie d'entreprise, qui répond aux défis posés par le changement et l'incertitude, la reconfigurabilité est principalement axée sur la réactivité des systèmes de production face à la volatilité des marchés (Mehrabi *et al.*, 2000).

La reconfigurabilité est considérée comme l'une des caractéristiques essentielles pour s'adapter efficacement à la complexité croissante des environnements manufacturiers. Elle permet une adaptation rapide, efficace et facile tout en étant proactif, opportun et économiquement réalisable. L'objectif est de répondre entre autres aux nouvelles contraintes internes et externes en termes de globalisation, variétés des produits, personnalisation de masse et les délais de plus en plus courts. Ce paradigme est détaillé davantage ci-après dans la section 1.5.

### *E. Systèmes manufacturiers évolutifs (Evolvable Production Systems EPS)*

Ce paradigme possède beaucoup de concepts communs avec les paradigmes mentionnés précédemment. Parmi ces points, nous retrouvons la modularité et l'auto-organisation au niveau modulaire (Dias-Ferreira, 2016). Cependant, l'objectif principal de ce paradigme est axé à la fois sur l'adaptation et l'évolution (Dias-Ferreira, 2016). L'EPS s'appuie sur une solution de contrôle multi-agents pour gérer et combiner des modules d'assemblage afin de servir les fonctionnalités agrégées ciblées (Barata *et al.*, 2007).

L'EPS utilise une approche bio-inspirée pour répondre aux exigences de RMS. D'une part, ce paradigme remplit la majorité des exigences RMS en étant modulaire avec une granularité plus fine. D'autre part, l'EPS décrit une architecture de contrôle pour résoudre les exigences du RMS (Barata *et al.,* 2007).

En comparaison avec RMS, l'EPS représente l'un des cadres qui apporte une réponse aux exigences définies par RMS (Barata *et al*., 2007)

### *F. Systèmes manufacturiers changeables (Changeable manufacturing Systems CMS)*

Un système manufacturier changeable est défini comme étant un système de production ayant les capacités pour faciliter les changements adéquats, permettant d'ajuster ses structures et ses processus à tous les niveaux en réponse aux différents besoins et exigences internes et externes (ElMaraghy et Wiendahl, 2009). Cet ajustement doit être proactif, opportun et économiquement réalisable, afin de répondre d'une manière continue et efficace aux transformations des fonctionnalités ainsi qu'aux besoins en capacité (Andersen, 2017).

La changeabilité est un cadre général qui englobe de nombreux paradigmes, tels que l'agilité, l'adaptabilité, la flexibilité et la reconfigurabilité (ElMaraghy *et al.*, 2013). De plus, elle utilise la modularité et l'évolutivité comme lignes directrices (Wiendahl *et al.*, 2007). Le terme modularité est utilisé pour décrire l'utilisation d'unités communes pour créer des variantes de produits (Huang et Kusiak, 1998). Elle est également utilisée pour décrire la structure modulaire d'un système. Alors que la modularité s'intéresse à la structure des objets ; l'évolutivité préconise la taille. En prenant les deux, un format changeable peut être obtenu (AlGeddawy, 2011).

### *G. Cloud manufacturing Systems (CMfg)*

La convergence entre les technologies du cloud computing, l'internet des objets et les exigences manufacturières modernes ont conduit à l'émergence de ce paradigme (Zhang *et al*., 2014). Ce paradigme combine des logiciels en libre-service, faciles à utiliser et en ligne pour télécharger des spécifications de conception et gérer des projets avec des services de prototypage et de production de pointe.

En s'appuyant sur ces technologies (cloud computing, IoT…), le CMfg peut être considéré comme un modèle de service manufacturier intelligent et collaboratif (Ren *et al.*, 2015). Il a transformé l'orientation des industries, de la production vers le service (Dias-Ferreira, 2016). L'objectif est de transformer les ressources et les capacités manufacturières en un ensemble de services manufacturiers, qui peuvent être gérés et exploités de manière intelligente et unifiée pour permettre un partage ainsi qu'une circulation complète des ressources et des capacités de production (Zhang *et al.,* 2014). Par conséquent, c'est un modèle

manufacturier centré sur le client qui exploite l'accès à la demande à une collection partagée de ressources de production diversifiées et distribuées.

Malgré l'immaturité de ce paradigme, il promet une flexibilité et une adaptabilité grâce au provisionnement (terme utilisé dans le monde de l'informatique, désignant l'allocation automatique de ressources) à la demande des ressources de fabrication en tant que service, permettant ainsi des fonctionnalités fondamentales et nécessaires comme l'évolutivité (Zhou *et al.,* 2011). Le CMfg peut transformer l'industrie manufacturière en une industrie axée sur les services, hautement collaborative et innovante.

## 1.3 Synthèse

Des précédentes définitions et analyses, nous pouvons lister les constats suivants :

1. L'ensemble des paradigmes de production peuvent être classées en deux catégories (AlGeddawy, 2011). La première catégorie contient les paradigmes où le système et l'ensemble de ses composants ont une influence physique les uns sur les autres. Nous pouvons citer par exemple le FMS et le RMS (les CMS en générale). La deuxième catégorie s'appuie sur la modélisation du système par simulation pour gérer ou contrôler les composants de ce dernier, sans toucher à sa structure physique (AlGeddawy, 2011). Nous pouvons citer les BMS et HMS.
2. À travers cette classification, nous observons que, les paradigmes manufacturiers changeables sont les plus adaptés pour faire face aux exigences de l'environnement manufacturier actuel. Beaucoup de chercheurs et industriels se sont concentrés sur ces systèmes, vu leur capacité à réagir rapidement aux changements avec le minimum de coût par rapport aux autres systèmes manufacturiers (Rosio et Safsten, 2013). Néanmoins, et au contraire du RMS, le FMS possède un certain nombre d'inconvénients qui limitent sa réactivité. D'un point de vue de changeabilité et sa réalisation, il y a une grande différence entre FMS et RMS. Un autre point qui limite à la fois la réactivité et la changeabilité du FMS, c'est la pré-planification de trop de fonctionnalités, ce qui implique une capacité limitée d'évolutivité vu que l'enveloppe des fonctionnalités est limitée (ElMaraghy et Wiendahl, 2009; Koren, 2006). De ce point de vue, le RMS est conçu dès le départ pour intégrer l'évolutivité ainsi que les changements au niveau des fonctionnalités et/ou de ses capacités (Koren, 2010b).
3. Pour les productions futures dans des environnements de plus en plus complexes, la production personnalisée, flexible et de haute qualité semble prometteuse (Andersen, 2017). Donc, pour répondre à ces exigences, nous avons besoin non seulement des produits bien conçus, mais aussi des systèmes de production bien conçus.

4. Les problèmes de conception des systèmes reconfigurables sont plus complexes. Ceci est dû, d'une part, au fait que ces systèmes se caractérisent par des capacités dynamiques pour changer et intégrer le changement. D'autre part, ses propriétés, entre autres la reconfigurabilité, émergent après le déploiement du système manufacturier (Andersen, 2017; Farid, 2016). Donc, pour qu'un système répond à ces exigences avec ces propriétés, il faut intégrer dès le départ dans sa conception la reconfigurabilité afin d'avoir la meilleur réactivité face aux changements (Koren, 2010b). Dans ce contexte, l'ensemble des composants du système ainsi que ses différents niveaux doivent être considérés et préparés en vue du changement. Cette perspective du système sur la production et sur le problème de conception, est favorisée par la reconfigurabilité (ElMaraghy et Wiendahl, 2009).
5. La reconfigurabilité représente une exigence non fonctionnelle du système, liée à son comportement sur le long terme (Andersen, 2017). Ceci implique que les approches classiques qui tiennent compte uniquement des exigences immédiates du système ne conduiront pas forcément à des systèmes dynamiquement changeables. De plus, elles font que le système conçu devient rapidement obsolète face aux variations des marchés au lieu d'atteindre les objectifs de la reconfigurabilité.
6. Pour terminer, il y a une nécessité d'adapter ces approches et/ou développer de nouvelles méthodologies de conception pour concevoir des systèmes avec une capacité dynamique de changement en incluant les paramètres essentiels de la reconfigurabilité. Ces méthodologies doivent prendre en considération la reconfigurabilité en tant que propriété dynamique du système manufacturier. Ainsi, une caractéristique clé de la réalisation de l'usine de futur est le développement des systèmes manufacturiers changeables et reconfigurables. Ce qui permet d'être réactif et faire face aux exigences de l'environnement manufacturier moderne (globalisation, volatilité, hétérogénéité accrue et incertitude).

## 1.4 RMS : concepts et définitions

Liles et Huff (1990) ont été les premiers à proposer l'idée initiale derrière les RMS. Pour les auteurs, le RMS est un système de production capable d'utiliser intelligemment sa configuration pour répondre à la demande dynamique de production. Suite à cela, en 1993, un concept très similaire à celui du RMS a été proposé par Tsukune *et al.* (1993) qui concerne la production modulaire. Ce dernier, s'appuie sur la modularité et intègre des machines intelligentes et complexes. Le système est construit et opéré en combinant les différents modules (les équipements ainsi que les activités de conception et d'exploitation). En 1996, l'Université du Michigan a créé le Centre de recherche en ingénierie pour les systèmes manufacturiers reconfigurables (ERC / RMS) afin de concevoir, développer et mettre en œuvre des RMS. Dans la même université, Koren *et al.* (1999) définissent le RMS comme étant « *un système conçu dès le*

*départ pour des changements rapides dans sa structure, ainsi que dans ses composants matériels et logiciels, afin d'ajuster rapidement sa capacité de production et la fonctionnalité au sein d'une famille de produits* ».

Un RMS est composé d'un ensemble de machines à outils reconfigurables (RMTs) et des CNC. Il peut simultanément fabriquer plusieurs types de produits au sein d'une même famille en quantités imprévisibles tout en maintenant une efficacité de production de masse (Koren *et al.,* 1999). Le système peut être reconfiguré physiquement (hard) et/ou logiquement (soft) (ElMaraghy, 2005). Cette capacité d'ajouter, de supprimer et/ou de réorganiser les composants et les fonctions d'un système de manière opportune et rentable est représentée par la *reconfigurabilité.*

Pour atteindre cette reconfigurabilité, la conception des RMS est basée autour de famille de produits. L'objectif est de s'adapter aux caractéristiques géométriques et de fabrication distincte de chaque produit. De plus, le RMS s'appuie sur des matériaux et des logiciels reconfigurables tels que les contrôleurs à architectures ouvertes et les machines à outils reconfigurables (RMTs). Il est axé sur l'évolutivité et la réactivité, soutenues par l'ajout ou la suppression de fonctionnalités (Mostafa, 2000). *Cette capacité d'ajout et/ou de suppression rend ces systèmes facilement évolutifs pour maintenir le cycle de vie du système de fabrication lui-même.*

En plus des approches de contrôle ouvertes et des outils modulaires, et pour qu'un système soit facilement reconfigurable, un certain nombre de caractéristiques doivent être remplies comme la modularité, l'intégrabilité, la convertibilité, la diagnosticabilité, la personnalisation et l'évolutivité (Koren *et al*., 1999, ElMaraghy, 2005), sans oublier l'automatisation (en anglais automatibility) (Wiendahl *et al*., 2007, Wiendahl *et al*., 2004).

### 1.4.1 Caractéristiques clés du RMS

#### *A. Modularité*

Cette caractéristique fait référence à la structure du système ainsi que ses composantes qui doivent être modulaires. La structure modulaire concerne les deux niveaux physique et logique. Elle consiste à avoir des composants totalement séparés et découplés du système afin que l'ajout, le remplacement et/ou la modification d'un module (composant) soit possible.

#### *B. Intégrabilité*

Il s'agit de la capacité d'un système (respectivement ses composants) d'intégrer facilement de nouveaux modules (nouvelles machines, axes et degrés de liberté) et l'introduction future de nouvelles technologies.

### *C. Convertibilité*

Cette caractéristique représente la capacité du système à changer facilement et à transformer ses fonctionnalités pour satisfaire les nouvelles exigences. Elle permet au système un changement rapide entre les produits existants et une adaptabilité rapide pour les futurs produits de la même famille.

### *D. Diagnosticabilité*

C'est la capacité de détecter les pannes et à reconnaître leurs conséquences sur la qualité des produites. Les problèmes de qualité et de fiabilité dans la reconfiguration doivent être facilement et rapidement identifiables lors de la reconfiguration et de la montée en cadence. Cette fonctionnalité est essentielle dans RMS, car le système reconfiguré doit être rapidement réglé.

### *E. Personnalisation*

C'est l'une des principales caractéristiques qui différencie le RMS du FMS. En effet, l'objectif majeur derrière la personnalisation est d'éviter une flexibilité excessive du système. Cela implique que la flexibilité doit être limitée pour répondre aux exigences des familles de produits en question. La flexibilité du système (hardware et software) doit être adaptée aux produits fabriqués en concevant les capacités nécessaires.

### *F. Évolutivité*

Cette caractéristique représente la capacité du système à modifier facilement sa capacité de production pour augmenter la productivité afin de répondre à la nouvelle demande en ajoutant et/ou en supprimant des outils et des machines. Elle permet l'adaptabilité du système aux changements de la capacité de production grâce à sa reconfiguration.

### *G. Mobilité*

La mobilité désigne la capacité d'un système à changer l'emplacement de ses modules et ses stations de travail. Ces derniers doivent être facilement déplacés pour permettre leur réaménagement et améliorer la flexibilité dans le changement des itinéraires opérationnels.

### *H. Automatisation*

Cette caractéristique représente la capacité de changer facilement le niveau d'automatisation afin de permettre une automatisation réglable. L'objectif est de choisir le niveau d'automatisation le plus approprié pour permettre la reconfigurabilité.

Pour terminer, il est important de signaler que les différentes caractéristiques du RMS sont liées entre elles par le fait que :

1. *La personnalisation est atteinte grâce à la convertibilité et l'évolutivité. L'accomplissement de ces deux derniers est basé sur la modularité, l'intégrabilité, la mobilité et la capacité d'automatisation (Djordje, 2018).*
2. *L'objectif principal est de satisfaire le paradigme du RMS, qui considère les caractéristiques de la personnalisation, la convertibilité et l'évolutivité comme nécessaires (Koren, 2006). Le reste notamment la modularité, l'intégrabilité et la diagnosticabilité sont considérées comme caractéristiques de soutiens pour le RMS.*

### 1.4.2 **La famille de produits**

La famille de produits est définie comme étant un ensemble de produits similaires partageant un certain nombre de parties, de composants et/ou de modules communs (Djordje, 2018). L'architecture de la famille de produits (Figure 1-4a) est un concept très important qui facilite la réalisation de la personnalisation de masse. La Figure 1-4b illustre un exemple de cette architecture sur une famille de bouilloires domestiques.

Avec cette architecture, le fabricant peut développer une stratégie de famille de produits où certains modules fonctionnels sont partagés tandis que d'autres sont fournis avec plusieurs variantes chacun, de sorte que la combinaison de ces derniers fournira une grande variété dans les produits finaux (Hu, 2013). Une telle approche permettra la fabrication de produits personnalisés demandés par le consommateur.

L'attribut clé dans une famille est le fait que tous les produits peuvent avoir besoin de ressources de production similaires. Ce qui implique qu'un système de production peut produire la totalité de cette famille de produits (Hasan *et al*., 2014).

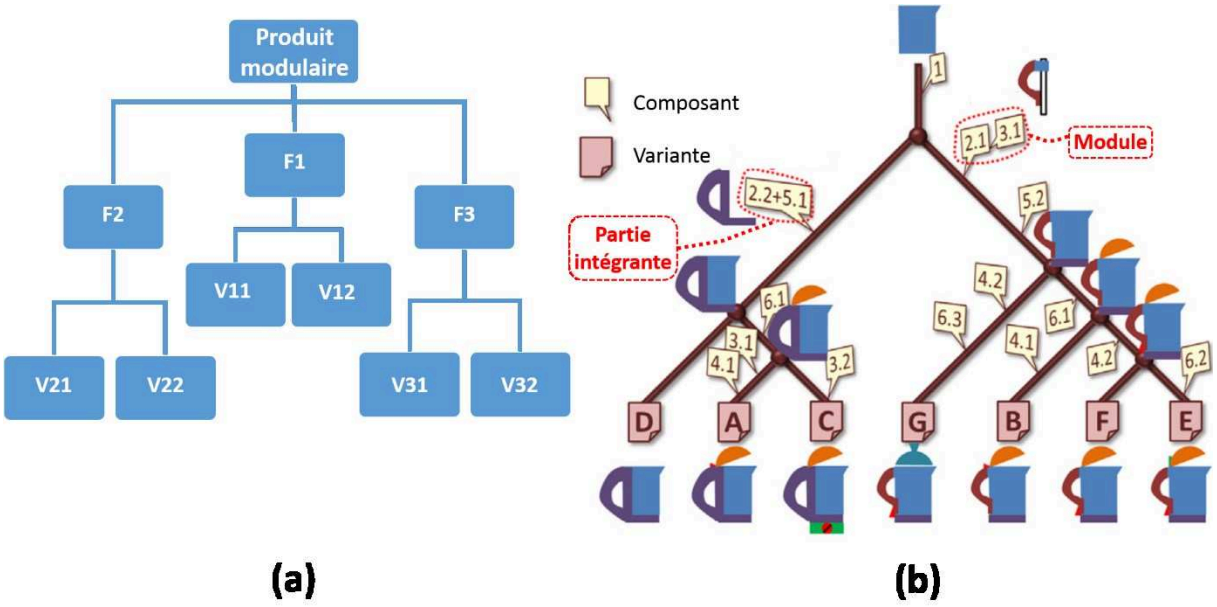



**Figure 1-4 Architecture de la famille de produits (adaptée de ELMaraghy *et. al.*, 2013, Hu, 2013)**

### 1.4.3 Machine-outils reconfigurables (RMTs)

Les machines-outils reconfigurables (Reconfigurable machine tools : RMT) sont conçues pour une gamme spécifique d'exigences opérationnelles et peuvent être rapidement modifiées d'une configuration à l'autre. Les RMTs sont considérés comme une nouvelle catégorie d'équipements possédant des architectures mécaniques modifiables et des systèmes de contrôle ouverts.

Depuis l'introduction des RMS, l'importance des RMTs, leur conception et leur mise en œuvre sont devenues des sujets intéressants et attirent l'attention de beaucoup de chercheurs. Le développement des RMTs nécessite d'envisager différents principes et lignes directrices (Landers *et al.*, 2001). Généralement, leur conception est centrée sur une famille de produits spécifique. Par conséquent, cette machine doit être rapidement ajustable aux changements dans sa structure et/ou ses opérations pour satisfaire les diverses exigences des produits de la même famille. Leur développement a suscité des débats stimulant les efforts internationaux de recherche afin de trouver une solution de conception unifiée sur les caractéristiques et architectures que ces machines doivent présenter (Padayachee, 2009)

Les premiers travaux pour développer les RMTs ont été réalisés par Koren et Kota (1999). Les auteurs ont introduit une structure de machine capable de réaliser plusieurs opérations distinctes. D'un point de vue économique, le coût de la flexibilité de ces RMTs ne fait pas partie de l'investissement initial grâce à leur capacité à être personnalisé au moment de l'achat. Cette flexibilité fonctionnelle de la machine peut être reconfigurée à un stade ultérieur grâce à l'intégration d'autres modules de la bibliothèque des modules (Abele *et al.*, 2007).

### 1.4.4 Gamme de fabrication

La génération des gammes de fabrication (en anglais Process planning) représente toutes les activités nécessaires pour donner des instructions sur la façon d'amener un produit virtuel dans le monde physique. Une gamme de fabrication est définie comme étant la séquence que le processus de production doit suivre (Nallakumarasamy *et al.*, 2011). Elle décide des processus de production et des machines qui doivent être utilisées pour effectuer les différentes opérations nécessaires à la fabrication d'un produit. La génération des gammes de fabrication peut être illustrée comme une fonction intermédiaire entre la conception et la production. Sans oublier, que le temps et l'expérience nécessaires pour la génération des gammes de fabrication, ont été réduit grâce à l'introduction du concept de la génération assistée par ordinateur (Computer-aided process planning CAPP).

Les gammes de fabrication sont classifiées en trois niveaux (multi-domaines, macro et micro) (ElMaraghy, 2007).

- Le niveau multi-domaine est le plus haut niveau, l'objectif de ce dernier est de sélectionner la technologie de production la plus appropriée.
- Le niveau macro a pour objectif de sélectionner la séquence optimale des différentes étapes du processus, des machines et des configurations.
- Le niveau micro cherche à optimiser chaque opération par rapport à l'utilisation des outils, aux paramètres d'usinage et aux trajectoires d'outils nécessaires (Anderberg, 2012).

## 1.5 Questions de recherche et objectifs

Nos travaux de recherche visent à *proposer de nouvelles méthodologies de conception pour les systèmes manufacturiers reconfigurables qui peuvent être appliqués pour soutenir la transition vers une production de masse axée sur la variété, la réactive et de haute qualité.* La reconfigurabilité est essentielle, car les systèmes manufacturiers doivent avoir une capacité de changement dynamique plutôt que statique. Dans un RMS, cette reconfigurabilité est basée sur six caractéristiques clés, à savoir la modularité, la convertibilité, l'intégrabilité, l'évolutivité, la convertibilité et la diagnosticabilité.

Pour réussir cette conception, nous devons intégrer dans ce processus les catalyseurs de changements. Ces catalyseurs, illustrés dans la Figure 1-5, représentent les concepts fondamentaux de la changeabilité.

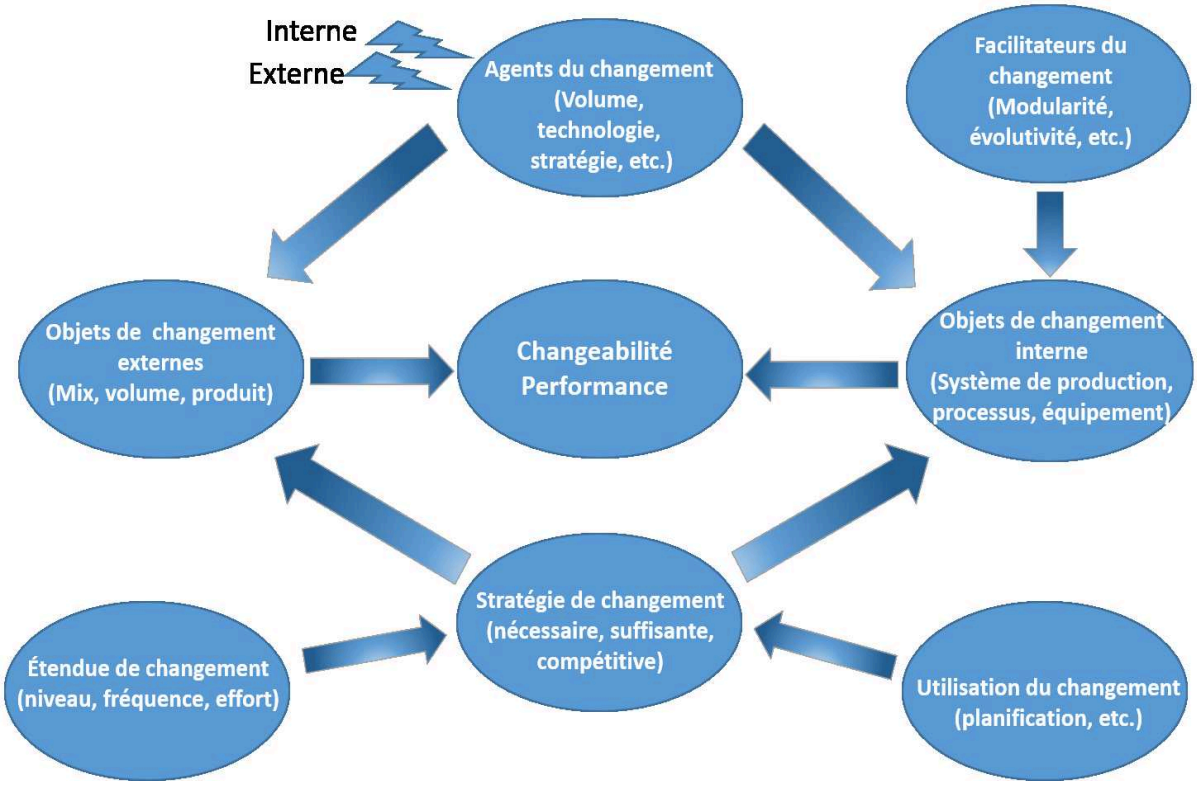



**Figure 1-5. Concepts fondamentaux de la Changeabilité (adaptés de ElMaraghy et Wiendahl, 2009 et Andersen, 2017)**

Ils sont généralement différenciés en fonction :

(i) De leur caractère physique (RMS avec la modularité, personnalisation et évolutivité) ou logique (gammes de fabrication reconfigurables avec leurs évolvabilité et ajustabilité…) (ElMaraghy et Wiendahl, 2009).

(ii) Du niveau d'usine où ils sont implémentés (usine, système, équipement).

(iii) De leur type (modularité, évolutivité…) (Andersen, 2017).

Ici, les caractéristiques de la reconfigurabilité sont considérées comme catalyseurs des changements au niveau du système et de ses équipements. Elles peuvent être conçues et implémentées dans les composantes du système de production et à différents niveaux pour répondre aux besoins imposés par le contexte manufacturier actuel et accomplir les changements requis. Les composantes du système couvrent les parties physiques et logiques et peuvent être conçues pour la reconfigurabilité et la flexibilité comme nous pouvons le voir dans la Figure 1-6.

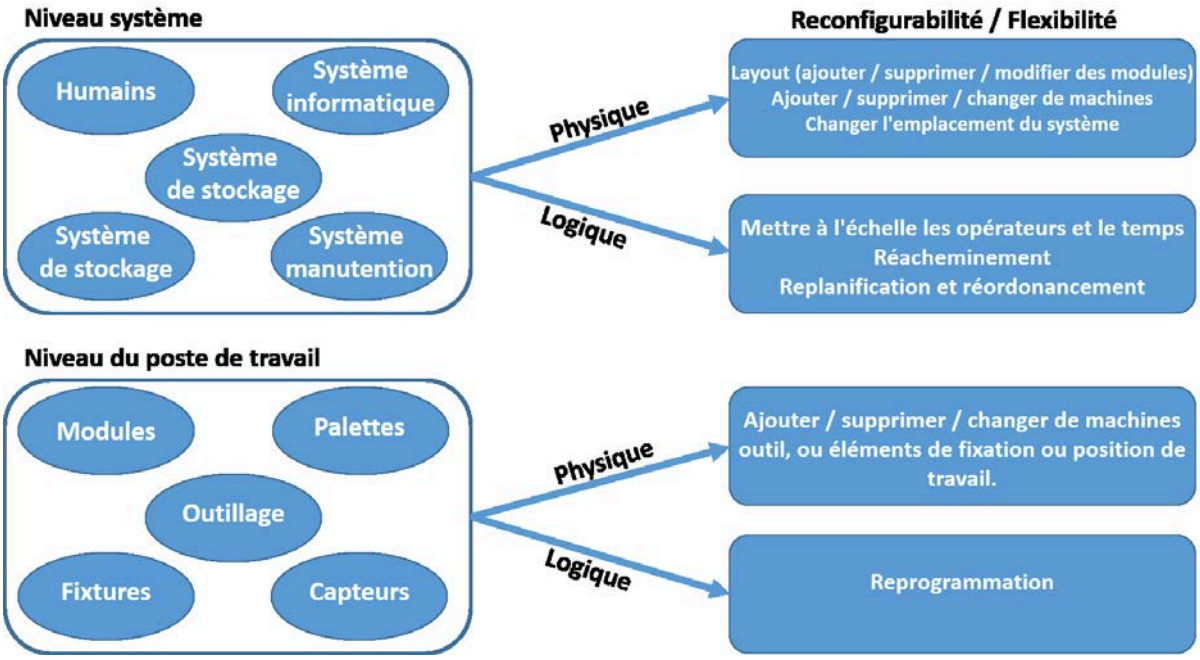



**Figure 1-6. Composantes du système de fabrication et implémentation de la changeabilité correspondante (adaptées d'Andersen 2017)**

Plus précisément, à travers cette thèse, notre objectif est de garantir *une meilleure changeabilité de notre système en assurant des hautes performances.* Pour influencer la changeabilité et les performances, nous nous appuyons, comme le montre la Figure 1-5, sur :

(i) Les catalyseurs de changements qui ont un impact direct sur les objets de changement internes (system de production, processus, équipement...) et

(ii) L'utilisation du changement via la planification ainsi que l'étendu du changement qui se traduit par la quantification de l'effort et de son niveau.

Dans ce contexte, nous avons étudié un problème de conception des RMS sur trois niveaux. Pour chaque niveau, nous avons abordé une problématique de recherche et nous avons développé des indicateurs de performance afin d'assurer une meilleure réactivité ainsi qu'une haute performance du système conçu tout en se basant sur les caractéristiques clés du RMS citées précédemment.

1. Le premier niveau couvre *la problématique de la modularité du système en considérant ses composantes principales qui sont les machines-outils reconfigurables (RMTs)*. L'objectif est de renforcer la modularité du système à travers ses composantes élémentaires pour assurer la meilleure reconfigurabilité possible (voir Chapitre 3).
2. Le deuxième niveau aborde *la problématique des interactions entre les machines qui entrent dans la conception du système en tenant compte des contraintes d'incertitudes et d'indisponibilités de*

*ces dernières*. L'objectif ici est de concevoir un système plus réactif face à ces incertitudes (voir Chapitre 4).

3. Le dernier niveau représente le niveau système qui traite *la problématique de positionnement des machines qui entrent dans la conception d'un RMS dans un atelier*. L'objectif de cette dernière étape est de mieux répondre aux défis engendrés par le contexte évolutif des environnements manufacturiers en offrant une réponse rapide et rentable aux exigences des marches (voir Chapitre 5).

## 1.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une synthèse des différents paradigmes de business et de production afin de contextualiser notre travail. Une attention particulière a été portée sur les systèmes manufacturiers reconfigurables (RMS). Nous avons présenté les concepts et les technologies liés au RMS entre autres, la gamme de fabrication et les machine à outils reconfigurables (RMTs). Ces concepts constituent un facteur important pour l'avancement des RMS. À partir de ce contexte, nous avons présenté notre problématique générale à travers laquelle nous avons dérivé l'ensemble des problèmes traités dans cette thèse.

Le chapitre qui suit vise un double objectif : positionner nos travaux de recherche à nouveau à travers l'analyse de l'état de l'art relative aux RMSs et aux défis associés, et identifier les approches utilisées.

# 2 Chapitre 2 : Systèmes Manufacturiers Reconfigurables (RMS) : état de l'art

Ce chapitre est dédié essentiellement à la présentation et à l'analyse de notre état de l'art sur les RMSs et les défis associés. L'objectif derrière cette analyse est de positionner notre problématique par rapport aux travaux de recherche existants dédiés aux systèmes de production manufacturiers et aux problématiques associées. De plus, nous cherchons à identifier les approches développées pour traiter ces problématiques

## 2.1 Introduction

De plus en plus, la conception des systèmes de production modernes intègre trois objectifs majeurs à savoir l'amélioration de la productivité, la réduction des imprécisions et la diminution des gaspillages suite aux changements des produits (ElMaraghy, 2006). Dans ces circonstances, les systèmes de production doivent être plus flexibles, robustes et reconfigurables. Ces systèmes doivent aussi avoir une réponse agile et réactive face aux conditions changeantes dans le système et son environnement. Ce type de réponse est possible grâce à la capacité de ces systèmes d'être reconfigurés dynamiquement sans interrompre leurs fonctionnements.

Les avantages offerts par les systèmes de production reconfigurable (RMSs) par rapport aux systèmes de production conventionnels (FMS, DMS…) ont fait du RMS un domaine de recherche très actif sur plusieurs axes. Nous présentons à travers ce chapitre, une analyse de l'état de l'art dédiée aux RMSs et aux problèmes associés. L'objectif derrière cette analyse est double : positionner notre problématique de recherche par rapport aux travaux existants dédiés aux systèmes de production manufacturiers et aux problématiques frontières, et chercher à identifier les approches développées.

## 2.2 RMS vs systèmes conventionnels

Koren (2006) a présenté une analyse comparative riche entre les systèmes dédiés (DML) et les systèmes flexibles (FMS) afin de montrer l'importance des RMSs. En fait, un RMS pourrait combiner les avantages des deux systèmes FMS et DMS. L'auteur indique que les bases dans la conception d'un RMS sont une combinaison simultanée des contrôleurs reconfigurables à architectures ouvertes et des machines modulaires reconfigurables. De plus, il définit les caractéristiques générales d'un RMS ainsi que ses composantes principales. Il insiste sur le fait que la reconfigurabilité doit être envisagée et intégrée dès la conception du système et de ses machines, sinon le processus d'intégration de cette dernière sera long et impossible.

De même, Koren (2010a) a identifié que les trois systèmes respectivement RMS, DML et FMS sont différenciés par les caractéristiques relatives à la capacité, aux fonctionnalités et aux coûts. L'auteur argumente que pour les DML et FMS, les fonctionnalités et les capacités sont généralement fixées, alors que les RMSs, elles peuvent évoluer au fil du temps en fonction de l'évolution des conditions du marché. Par conséquent, les RMSs ne sont pas limités ni par les capacités ni par les fonctionnalités. En effet, le plus grand avantage du RMS est sa capacité à maintenir l'efficacité de la production de masse tout en produisant simultanément et en quantités imprévisibles divers produits au sein d'une famille de produits.

À la différence du FMS, le RMS a la capacité d'être continuellement changeant, afin d'avoir les fonctionnalités exactes et les capacités nécessaires pour produire des produits/familles de produits, ainsi

que de nouveaux produits suivant les marchés (Anderson, 2017). Ceci est possible en ajustant les capacités de production ainsi que les fonctionnalités au sein de la famille de produits à travers des reconfigurations physiques et/ou logiques du RMS (ElMaraghy, 2006).

Nous pouvons trouvez d'autres différences qui donnent l'avantage du RMS par rapport aux FMS. Nous pouvons lister ces différences par :

- RMS offre une flexibilité ciblée et sur mesure en un peu de temps, tandis que le FMS offre une flexibilité généralisée conçue pour des variantes anticipées et intégrées de produits à priori (ElMaraghy, 2006).
- RMS est conçu pour des changements structurels et logiques du système pour répondre aux fluctuations brusques des marchés, telles que les variations de la demande et les défaillances majeures des équipements. Tandis que le FMS n'intègre pas des changements structurels mais permet des changements logiques (Dupont-Gatelmand, 1981, Koren, 2010)
- RMS est évolutif à un débit non constant (flexible) qui dépend essentiellement de la conception initiale et des circonstances du marché. A l'inverse, le FMS est évolutif à un débit constant en ajoutant des machines en parallèle qui sont trop chères. Ainsi, le FMS ne peut pas accomplir une évolutivité rentable à travers des modifications physiques (Koren, 2010).

L'objectif principal de la reconfigurabilité est la *réactivité* des systèmes de production face aux nouvelles conditions des marchés (Mehrabi *et al*., 2000a). En plus de sa réactivité, le RMS permet également une *évolutivité*. En effet, les deux aspects, réactivité et évolutivité sont couverts par le concept de reconfiguration à travers la suppression ou l'ajout de fonctionnalités et des composants (Mehrabi *et al*., 2000b). Cette capacité d'ajouter et de supprimer facilite la mise à niveau du système de production et elle est considérée comme vitale pour le maintien de son cycle de vie.

À travers des revues de la littérature sur les recherches effectuées dans le domaine de RMS, Bi *et al*. (2008), Babu *et al*. (2013) et Andersen *et al*. (2015) ont analysé l'importance du RMS, sa conception ainsi que son positionnement vis-à-vis de l'environnement industriel. Dans le même contexte, Andersen *et al*. (2016) ont tenté d'identifier les prérequis nécessaires pour concevoir et développer un RMS. Les auteurs présentent les défis et les obstacles possibles à l'adoption de ce nouveau concept dans l'industrie. De même, dans une autre analyse plus poussée, Andersen *et al*. (2017) invoquent l'importance du développement d'une méthode de conception systématique pour les RMSs afin de fournir aux industriels les connaissances nécessaires sur la façon de développer et de profiter des avantages de la reconfigurabilité. L'objectif étant de proposer et de synthétiser une méthode de conception générique en se basant sur une analyse comparative des différentes méthodes qui existent dans la littérature.

Dans le même contexte, aux USA, le Visionary Manufacturing Challenges Committee (1998) a classé le RMS comme étant l'un des six plus grands défis pour l'industrie de 2020 (Rosselli, 2003, Bollinger *et al*., 1998). En Europe, l'Union européenne a encouragé le développement des RMSs à travers les développements des concepts, des outils et des techniques de production pour répondre aux mieux aux attentes des marchés. Cela a été fait en soutenant plusieurs projets comme par exemple I * PROMS (Innovative production machines and systems project) (Pham, 2004).

D'autres chercheurs comme Lokesh *et al*. (2008a, 2008b) et Lee (1997) attestent que la conception des systèmes manufacturiers et des produits doit tenir compte de la reconfigurabilité en tant qu'exigence majeure.

## 2.3 Conception des RMSs

Afin de déterminer le processus de conception d'un RMS, Deif et ElMaraghy (2006) ont proposé une architecture mixte ouverte. Les différentes étapes de conception sont décrites dans cette architecture, de la définition de la demande du marché jusqu'à la configuration au niveau du système. De même, Abdi et Labib (2003) ont abordé un problème stratégique lié aux choix du type de système de production à mettre en place ainsi que les sélections des produits et leurs regroupements en famille. Le problème est résolu en utilisant la méthode AHP (Analytical Hierarchy Process). Dans le même contexte, une approche de conception d'un système de production cellulaire reconfigurable est proposée par Lokesh et Jain (2010).

Pour résoudre le problème de conception d'un RMS, Guan *et al*. (2012) ont adapté un mécanisme semblable à l'électromagnétisme pour réduire les coûts du système, y compris le coût de la manipulation du matériel et le coût de la reconfiguration au niveau du système. Wang et Koren (2012) ont étudié la reconfiguration d'un système existant pour augmenter graduellement sa capacité. Pour ce fait, ils proposent une méthodologie de planification de l'évolutivité du RMS, où de nouvelles exigences sont satisfaites en ajoutant ou en supprimant des machines pour atteindre une nouvelle configuration. L'objectif est de définir la reconfiguration la plus économique du système. Dans le même contexte, Koren *et al*. (2016) ont abordé l'importance de la valeur économique de l'évolutivité dans les RMSs. L'objectif est d'ajouter la capacité exacte nécessaire pour satisfaire la demande croissante du marché à un coût d'investissement minimum. Les auteurs proposent une approche systématique pour la planification de l'évolutivité et développent les principes de conception pour cette dernière.

Récemment, Kahloul *et al*. (2016) ont proposé une approche de conception en utilisant des réseaux de Petri reconfigurables. L'objectif est de simuler et d'analyser la conception du RMS pour détecter les anomalies dans le système. Battaïa *et al*. (2016a) ont tenté de concevoir un système d'usinage reconfigurable pour produire plusieurs familles de produits. Le problème est modélisé comme un problème d'optimisation

combinatoire en utilisant la programmation mathématique. Les auteurs proposent un outil d'aide à la décision pour la conception du RMS. Lozano *et al*. (2017) ont évalué l'efficacité technique et les coûts associés à un RMS en adoptant une analyse d'enveloppement de données (DEA). Renna (2017) a proposé un modèle d'investissement décisionnel pour concevoir un système manufacturier hybride. Le système comprend des machines flexibles, dédiées et reconfigurables. L'auteur utilise les algorithmes génétiques et la simulation de Monte-Carlo pour déterminer la machine la plus rentable à acquérir parmi les trois types de machines dans la conception du système. Dans le même contexte, Gyulai et Monostori (2017) ont introduit un cadre de gestion à deux niveaux. L'objectif est de soutenir la planification de la capacité et de la production des systèmes d'assemblage modulaires à long et à moyen termes. Les auteurs considèrent un système manufacturier hybride avec des machines dédiées, flexibles et reconfigurables. De plus, le cadre proposé optimise à la fois la taille du lot et les ressources nécessaires pour assurer une planification rentable de la production.

## 2.4 Quels sont les indicateurs de performance dans les RMSs et comment sont-ils utilisés ?

Cette section traite les problèmes de définitions et d'utilisation des indicateurs de performance dans les RMSs. En effet, les exigences élevées d'incertitudes observées dans le système poussent à considérer d'autres mesures pour évaluer les performances du système plutôt que le seul coût d'investissement initial (Delorme *et al*., 2016). Dans cette optique, Mittal *et al* (2014) ont présenté un ensemble d'indicateurs de performances comprenant la fiabilité du système, la qualité du produit, l'utilisation et le coût des machines. L'objectif est de permettre une conception d'un RMS réactif et de trouver la meilleure configuration possible du système. Gupta *et al*. (2015) ont également pris en compte l'importance des indicateurs de performance lors de la conception d'un RMS. En effet, ils proposent une approche utilisant les caractéristiques clés du RMS comme un ensemble d'indicateurs de performance, à savoir le coût, l'évolutivité, la productivité et la convertibilité. L'objectif est d'identifier et de sélectionner la meilleure configuration du système.

Plus récemment et dans le même contexte, un nouvel indicateur/indice de performance mesurant l'effort de reconfigurabilité dans les RMSs a été développé par Dahane et Benyoucef (2016). Les auteurs considèrent deux fonctions à optimiser respectivement, la maximisation de l'indice de reconfiguration basée sur la capacité globale de reconfiguration du système et le niveau de reconfigurabilité requis par le produit à réaliser, et la minimisation du coût total incluant le coût de maintenance des machines. Le problème est résolu en utilisant une adaptation de l'algorithme NSGA-II. Goyal et Jain (2016) ont utilisé la convertibilité de la configuration, les capacités opérationnelles et le coût d'utilisation des machines comme critères contradictoires pour guider la conception des lignes de production reconfigurables. Les auteurs cherchent

à améliorer la rentabilité et les capacités de reconfiguration rapides des lignes en proposant une méthodologie à deux-phases basée sur une optimisation d'essaim de particules à critères multiples (multiple-objective particle swarm optimization MOPSO) et une méthode d'écart maximal (maximum deviation method) de détermination des poids des critères.

## 2.5 Comment les RMTs sont considérés dans les RMSs ?

Rappelons que pour un RMS, la reconfigurabilité est possible grâce à la machine-outil reconfigurable (RMT). Le RMT est considéré comme l'un de ses principaux composants du RMS. De nombreux auteurs se sont concentrés sur l'impact de ce type de machine sur le système.

Pour évaluer la réactivité des RMTs, Goyal *et al*. (2013) ont proposé une nouvelle approche basée sur l'évaluation de la reconfigurabilité des machines ainsi que leurs capacités opérationnelles. Les auteurs montrent que les RMTs avec un haut niveau de réactivité sont privilégiées pour assurer les opérations de production avec une augmentation insignifiante du coût du système.

En utilisant la théorie de l'utilité multi-attributs et une approximation de la fonction de puissance, Hasan *et al*. (2013) ont tenté d'évaluer la reconfigurabilité d'une RMT en développant des modèles de reconfigurabilité. Ces modèles ont contribué à l'évaluation de la reconfigurabilité du RMT en tant que machines modulaires. Les auteurs considèrent la machine comme un sous-système afin d'estimer l'effort de reconfigurabilité et les attributs associés à cet effort. Cela, sans prendre en considération tout le système ou d'autres paramètres tels que le temps et le coût, qui peuvent influencer significativement la reconfigurabilité. Maniraj *et al*. (2015) ont utilisé les capacités des RMTs pour aider à planifier la reconfiguration du système. Ils proposent d'obtenir la meilleure configuration pour une ligne de production RMS mono-produit en utilisant une approche basée sur les colonies de fourmis où le critère est de minimiser le coût total des configurations sélectionnées.

Plus récemment, Dou *et al*. (2016) ont proposé une approche pour résoudre le problème de sélection des configurations du système en se basant sur les RMTs. L'approche est basée sur deux critères : la minimisation du retard total et la minimisation du coût total du système. Elle consiste à optimiser et à planifier plusieurs produits au sein d'une même famille en intégrant l'optimisation de la configuration physique du système. Le problème est résolu en utilisant un nouveau modèle de programmation mathématique multicritère en nombres entiers mixtes (Multi-Objective Mixed Integer Programming MoMIP). De plus, Gadalla et Deyi (2016) ont présenté une revue de la littérature sur le développement des RMTs en se basant sur plusieurs perspectives, comme la conception et l'optimisation de la configuration, l'intégration et le contrôle des systèmes, ainsi que l'architecture de la conception. Selon les auteurs, pour permettre l'ajout et la suppression de différents modules de la machine, l'architecture choisie doit être basée

sur une approche de conception modulaire. Ils notent également que le critère est souvent la minimisation de l'effort de reconfiguration tout en assurant une variété de configuration. Ceci est atteint à travers l'analyse et l'optimisation des opérations des processus de reconfiguration, comme par exemple : les changements entre configuration, routage...

## 2.6 L'importance de la modularité

D'autre part, en plus des RMTs, dans les RMSs la modularité est considérée comme l'un des facteurs clés de la reconfigurabilité au niveau de la machine. Il s'agit d'un catalyseur qui favorise l'élaboration de nouveaux concepts de conception relatifs aux machines-outils reconfigurable (Elgeddawy et ElMaraghy, 2009). D'un point de vue technique, la modularité aide à gérer la complexité du système. La conception modulaire vise à organiser un système complexe comme un ensemble de composants distincts qui peuvent être développés de manière indépendante et ensuite branchés ensemble (Baldwin et Clark, 2006). Nous observons aussi que l'utilisation de composants modulaires réduit le coût de production en raccourcissant le temps de changement ainsi qu'en réduisant les dépenses de planification. Une augmentation de la valeur résiduelle est également attendue pour les composants adaptables qui peuvent être réutilisés (Heisel et Meitzner, 2006).

Dans cette optique, Bi et Zhang (2001) ont abordé la modularité en présentant une taxonomie ainsi que les problèmes de la technologie de la modularité dans la production. Les auteurs présentent un cadre général pour le développement de la modularité dans les systèmes manufacturiers. De plus, ils identifient quelques problèmes qui peuvent être étudiés et résolus dans les travaux futurs. Tseng *et al*. (2004) ont abordé cette problématique en s'inspirant du concept des connecteurs. Ces derniers sont des unités de base d'assemblage, réalisant une fonction requise lorsqu'ils sont combinés avec d'autres connecteurs. Les auteurs introduisent un concept clé de la conception modulaire en développant une méthodologie pour élaborer des modules en se basant sur le concept des modèles de combinaison de connecteurs. De même, Pérez *et al*. (2004) ont traité le problème en appliquant une conception concurrente à travers un cadre de modularité pour les machines-outils reconfigurables. Ce cadre se base sur une connaissance préalable des exigences des machines. Pattanaik *et al*. (2007) ont proposé une approche pour concevoir des cellules de machines en utilisant des machines modulaires. L'objectif est de satisfaire les caractéristiques du RMS dans un système de production cellulaire. Les machines considérées sont constituées de modules de base et d'autres modules dits auxiliaires.

Dans la même perspective, Mesa *et al*. (2015) se sont concentrés sur la reconfiguration des systèmes manufacturiers en proposant une première approche pour classer et sélectionner les principes d'architecture modulaire. L'objectif consiste à offrir, dans la phase de conception, une sélection objective de la meilleure

architecture modulaire. En se basant sur le concept de modularité, Shaik et Rao (2015) ont mené une étude sur la conception des systèmes de production modulaires avec une prise en compte des coûts et des performances du système. Après avoir présenté les méthodologies existantes pour concevoir les systèmes de production modulaires, les auteurs montrent que la modularité est un facteur clé qui doit être inclus lors de la phase de conception pour améliorer la flexibilité et la qualité du produit ainsi que la facilité de production. Abou-El-Hossein *et al*. (2015) ont discuté de la conception d'une machine-outil en fonction des caractéristiques de reconfigurabilité. Cette machine peut être utilisée à faible coût grâce à l'effort de conception qui vise à avoir le niveau de flexibilité nécessaire afin de fournir toutes les modifications possibles dans un cadre d'automatisation personnalisé.

Plus récemment, Puik *et al*. (2016) ont proposé une méthodologie de conception axiomatique. Les auteurs s'intéressent à l'évaluation des différentes alternatives pour implémenter la reconfiguration d'un RMS où ils identifient trois niveaux de reconfiguration pour les RMSs. Les niveaux de configuration identifiés selon ces processus de production sont respectivement i) utilisés de façon répétée (les processus sont utilisés dans leurs fenêtres de fonctionnement spécifiées), ii) nécessitent une adaptation (les processus sont utilisés en dehors des fenêtres d'opération définies ou d'une manière alternative, pas encore testée), ou iii) nécessitent une extension (les processus n'existent pas encore et doivent être développés). Ces niveaux de configuration aident à évaluer l'impact des alternatives proposées selon la nature des processus de production. De même, Lameche *et al* (2017) ont analysé l'importance de la modularité et de la façon dont elle pourrait être utilisée pour développer les RMSs. Les auteurs proposent une approche standard basée sur la matrice de structure de conception DMS (Design Structure Matrix) pour concevoir un RMS avec une architecture modulaire générale. Cependant, les auteurs n'ont considéré que les fonctionnalités du système dans le processus de conception.

## 2.7 Comment la gamme de fabrication est définie pour RMS, et quelles sont les approches existantes utilisées pour sa génération ?

La gamme de fabrication est un pont entre la conception et la production. Comprendre le type de système de production affecte l'approche de la génération des gammes de fabrication, ce qui est une étape importante. Dans les systèmes conventionnels, lors de la génération assistée par ordinateur (CAPP) des gammes de fabrication, les composants du système de production sont considérés comme statiques et une seule gamme de fabrication est proposée.

Avec l'introduction des FMSs et des RMSs, chaque fois que le système doit réaliser un nouveau produit, une nouvelle gamme de fabrication est requise. Pour répondre à ce problème, les chercheurs ont cherché de développer des systèmes CAPP qui génèrent des gammes de fabrication alternatives. L'objectif est de s'adapter à la nature dynamique de ces systèmes de production.

Dans les RMSs, il faut que la gamme de fabrication prenne en compte plusieurs familles de produits ou plusieurs générations de produits (Koren *et al*., 2017). Une génération efficace des gammes de fabrication peut réduire le coût de la reconfiguration, améliorant ainsi l'efficacité et la réactivité du système. D'où l'importance de l'intégration de cette étape dès le départ dans le processus de conception.

Dans cette optique, ElMaraghy a proposé une génération de gammes de fabrication reconfigurable (en anglais Reconfigurable process planning RPP) (ElMaraghy 2007). L'approche prend en considération les variations dans les gammes de fabrication résultant d'un changement des parties des familles de produits et des produits eux-mêmes. Ces changements nécessitent différentes affectations des machines, ce qui implique une augmentation ou une diminution des capacités de production du système. Les changements au niveau des capacités du système impliquent l'émergence du besoin d'ajouter ou de retirer différentes machines et/ou de modifier leurs configurations structurales (Shabaka *et al*. 2007, ElMaraghy 2009). Chaube *et al*. (2012) ont également étudié le problème de génération des gammes de fabrications dans un environnement de production reconfigurable. Ils proposent une solution guidée par la minimisation de deux critères : le coût total du système et le temps d'achèvement total de la production. La solution est basée sur l'adaptation d'un algorithme génétique multicritère (NSGA-II). L'approche planifie différentes parties sur un ensemble de machines, en fonction des types d'opérations, des types de machines (avec leurs configurations et outils appropriés) et du type de pièce.

Dans le même contexte, Bensmaine *et al*. (2013) ont fourni un ensemble de solutions non-dominées. En effet, les auteurs proposent une approche basée sur une adaptation de NSGA-II pour résoudre à la fois le problème de la sélection des machines lors de la conception d'un RMS et le problème de génération des gammes de fabrication. De plus, l'approche prend en compte les capacités des machines reconfigurables RMTs et les spécifications des produits à fabriquer. D'autres chercheurs ont envisagé une planification de l'installation pour la génération des gammes de fabrication et l'intégration de l'ordonnancement (Mohapatra *et al*. 2014). Les auteurs utilisent une approche multicritère pour résoudre ce problème. Elle est basée sur trois critères à savoir, la minimisation du temps d'achèvement total, le coût d'exploitation et le temps d'inactivité des machines. Pour optimiser ces critères, les auteurs proposent une version adaptée et améliorée de NSGA-II. De même, Niroomand *et al*. (2014) abordent le problème de génération des gammes de fabrication en proposant une méthodologie basée sur la programmation mathématique (mixed integer programming MIP). Ils considèrent à la fois le DML et RMS pour répondre aux exigences des changements de capacités demandées. L'approche est validée à travers un modèle de simulation à événements discrets où l'objectif est d'identifier l'impact de la configuration de séquençage ainsi que l'allocation optimale de la capacité, sur la réactivité. Ceci est réalisé en évaluant la configuration la plus appropriée pour un producteur en termes de coût et de niveau de service.

Une nouvelle approche pour la planification de la production dans les RMSs est présentée par Hees et Reinhart (2015). À travers cette approche, les auteurs intègrent les caractéristiques du RMS pour améliorer les processus de planification. Ceci est possible en utilisant des modèles de données et la gestion de la configuration. De plus, Battaïa *et al*. (2016b) ont proposé une approche de génération de gammes de fabrications et de configuration de système intégré. L'objectif est d'améliorer le rapport coût-efficacité des machines du système.

Plus récemment, Hees *et al*. (2017) ont défini les caractéristiques clés et les exigences de planification d'un RMS en se basant sur les caractéristiques clés de la reconfigurabilité. L'objectif principal est d'intégrer l'évolutivité en termes de capacité et de fonctionnalité dans la planification de la production. Ils ont résolu le problème en utilisant une méthode basée sur la programmation linéaire mixte en nombres entiers (mixed integer linear programming MILP) pour traiter l'évolutivité de la capacité et les changements de fonctionnalités au sein des gammes de fabrication. Xia *et al*. (2018) ont étendu le concept de la génération des gammes de fabrication reconfigurables (RPP) à un concept de génération de gamme de fabrication d'usinage reconfigurable (reconfigurable machining process planning RMPP). Ceci est réalisé avec l'aide de la modularité et des techniques basées sur la configuration et la plate-forme des produits. L'objectif est de générer des gammes de fabrication pour une famille de produits. Les auteurs proposent un modèle basé sur les fonctionnalités pour représenter la famille de produits. Ils définissent le RMPP comme un ensemble de composants modulaires qui peuvent être configurés / reconfigurés en une gamme de fabrication d'usinage pour n'importe quelle variante de la famille. L'approche proposée génère les composants des gammes de fabrication pour une variante de pièce spécifique tout en configurant cette variante de pièce à partir de la famille.

## 2.8 Quel est l'impact de l'agencement sur la conception du RMS ?

La conception d'un RMS repose entre autres sur deux problèmes principaux et distincts, à savoir la sélection des machines (généralement résolu à travers la génération des gammes de fabrication) et l'agencement de ces machines sélectionnées dans un atelier (Oke *et al*., 2011, Bensmaine *et al*., 2013). D'une part, le problème d'agencement est critique dans la conception des RMSs car il a une influence majeure sur la productivité du système (Hasan, 1994). L'importance vient du fait que l'agencement détermine comment les produits, les opérations de fabrication et les processus circulent dans le système. Ainsi, un changement relativement faible dans la position d'une machine peut influencer considérablement le débit, le coût et le temps de manutention du produit (material handling), ainsi que la productivité et la réactivité du système. D'autre part, la manière d'agencer les machines dépend largement du type de système de production envisagé (Kusiak, 1990).

Dans un environnement reconfigurable et évolutif, les modifications de l'agencement, des composants, des machines ou des unités de manutention sont censées s'adapter et faire face à des changements rapides (Andrisano *et al*., 2012). Dans ce type d'environnement, un mauvais agencement d'installation peut entraîner une flexibilité réduite et la modification peut s'avérer coûteuse et difficile. Par conséquent, nous devons diminuer ou empêcher les modifications fréquentes en développant le meilleur agencement possible (Hassan, 1994).

Les machines, l'atelier d'usinage et les cellules de production peuvent être reliées aux installations (Heragu1997). Par conséquent, le problème d'agencement des machines est un problème typique d'agencement des installations (facility layout problem FLP) (Altuntas et Selim, 2012). Le FLP gère le positionnement d'un nombre spécifique de machines dans un emplacement donné. Décider qu'elles sont les machines qui doivent être situées l'une à côté de l'autre est un problème critique pour les problèmes d'agencement des machines (Wascher et Merker 1997).

Donc, les décisions impliquées dans la conception de l'agencement des installations concernent la minimisation ou la maximisation de certains critères de conception définis (qualitatifs et/ou quantitatifs) en considérant un moyen efficace pour organiser les ressources disponibles.

### 2.8.1 **Problème d'agencement et approches proposées**

De nombreuses études ont été menées pour résoudre le problème d'agencement des installations. Selon Hassan (1994), l'agencement des machines influence le système manufacturier dans son ensemble en termes de productivité et de réactivité. Il a également mentionné que l'agencement des machines a une influence bijective avec des facteurs comme le système de manutention utilisé, les similitudes entre les opérations de la famille de produits ainsi que la similarité de leur séquence, les espaces disponibles dans l'atelier (usine / installation) et la capacité à répondre aux exigences du système manufacturier. De même, Tompkins *et al*. (1996) ont expliqué que les coûts de manutention représentent entre 20% et 50% des coûts du système, ce qui nous permet de gagner jusqu'à 10% à 30% en concevant un agencement des installations efficient.

Pour identifier et couvrir l'effort et les différentes approches utilisées pour résoudre le problème d'agencement de machines, de nombreux auteurs ont effectué une revue de l'état de l'art. Dans cette optique, Drira *et al*. (2007), Singh et Sharma (2006) ont adopté une approche plus large et non restreinte pour analyser la littérature en présentant des travaux existants qui traitent les problèmes d'agencement des installations. Kulturel-Konak (2007) a également présenté un état de l'art couvrant la question de la conception dynamique et stochastique de l'agencement des installations. L'objectif derrière concerne la conception de l'agencement des installations (layout design) sous contraintes d'incertitudes, qui est un sujet

lié aux actuels systèmes manufacturiers intelligents. De même, Farahani *et al*. (2010) ont présenté une revue de l'état de l'art pour identifier les critères utilisés pour résoudre un problème d'agencement multicritères.

Altuntas et Selim (2012) ont considéré l'utilisation des algorithmes de fouille de données à base de règles d'associations pondérées pour résoudre le problème d'agencement des machines. Les auteurs considèrent trois facteurs d'agencement comme critères de pondération, à savoir la demande, le système de manutention des pièces et l'efficacité de l'équipement de manutention. Muther (1973) a proposé la planification de l'agencement systématique (SLP - systematic layout planning). Le SLP est considéré comme une approche procédurale pour l'agencement. La méthode détermine un schéma raisonnable pour l'agencement du système de production. La base de ce schéma est d'analyser une relation entre les blocs et les relations des unités d'exploitation. De plus, il évalue les schémas afin d'obtenir un schéma optimal pour le nouvel agencement. Sharma et Singhal (2016) ont proposé une approche procédurale pour gérer le problème de conception de l'agencement. L'approche est basée sur une version modifiée du SLP traditionnelle et selon les auteurs donne de meilleurs résultats.

### 2.8.2 L'impact du type de système sur le type d'agencement et sa configuration

Le type du système manufacturier à une influence majeure sur la manière d'agencer les dispositifs de production (ex. les machines) (Kusiak 1990). Par conséquent, l'agencement des machines est d'abord déterminé par le type de système de production envisagé. Selon Drira *et al*., (2007), de nombreux facteurs et problèmes de conception influencent la nature du problème traité. Ces facteurs influent sur l'agencement, le système de manutention choisi, le volume de production envisagé et la variété, les mouvements possibles autorisés pour les produits (ex. contournement, retour en arrière), le nombre d'étages et les points de ramassage.

Les configurations des agencements des machines sont généralement déterminées en fonction du système de manutention choisi et des flux possibles pour les produits (Devise et Pierreval, 2000). Très connu, le système de manutention est l'élément responsable de la livraison des pièces et des matériaux d'un endroit à l'autre dans le système. Les équipements qui manipulent les matériaux comprennent des AVG (automated guided vehicles) des convoyeurs, des robots ... etc. (El-Baz, 2004). Comme indiqué dans Yang *et al*. (2005), Drira *et al*. (2007) et Luggen (1991), la littérature a identifié cinq configurations différentes d'agencement des machines, qui sont l'agencement en champ ouvert (open field layout), l'agencement en anneau (loup layout), l'agencement en rangée unique (single row layout), l'agencement multi-rangée (multi-row layout) et l'agencement centré sur le robot (Robot centered layout). La Figure 2-1 représente ces configurations.

Les méthodes d'agencement diffèrent par rapport aux objectifs attendus de l'agencement des machines. La différence est dans la représentation de l'espace à utiliser pour l'arrangement. Cette représentation dépend des caractéristiques de l'objet (machine) à placer. Dans ce contexte, Li et Peter (2000) ont identifié trois cas (i) l'espace à utiliser est divisé en parties séparées (dans ce cas, l'arrangement est réalisé sur le principe : un objet-un endroit) (ii) l'espace est représenté comme surface libre (les objets sont placés sur la surface commune) (iii) représenter l'espace en tant que surface et forme. D'autres facteurs peuvent affecter le problème d'agencement des machines sont liés aux exigences de la machine elle-même.

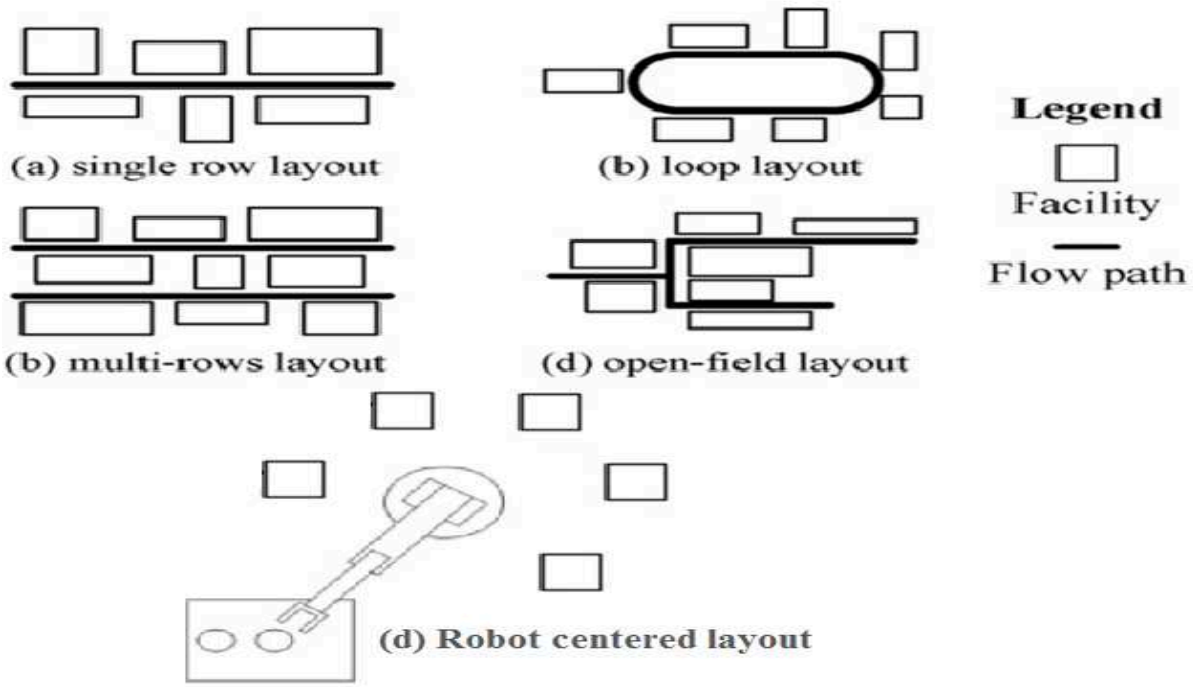



**Figure 2-1 Layout configurations (adaptée de Drira *et al*. 2007)**

### 2.8.3 **RMS et Agencement**

La nature NP difficile du FLP ainsi que celle du problème de sélection des dispositifs de manutention (handling devices) rendent la résolution conjointe de ces problèmes (agencements des machines et le choix du système de manutention) très compliquée (Co *et al*., 1989, Hassan, 1994, Moslemipour, 2012). Cela est également dû à l'impact des deux problèmes l'un sur l'autre. De ce fait, la plupart des travaux rencontrés dans la littérature considèrent une approche séquentielle pour résoudre ces problèmes, où la solution de l'un d'entre eux (ex. FLP) représente l'entrée de l'autre problème (ex. la sélection système de manutention ou vice versa) (Hassan, 1994).

Les nouveaux systèmes de production, comme les RMSs, ont également un impact sur l'agencement et le système de manutention. Dans ce type de système, les machines et les composantes du système peuvent être reconfigurées, ajoutées, supprimées et modifiées en fonction des nouveaux besoins et des nouvelles

exigences. Dans ce cas, chaque fois que le système est modifié (par exemple, ajout/ suppression d'une machine), le système de manutention ainsi que l'agencement du système doivent être adaptés pour satisfaire les nouvelles entrées du système.

Dans ce contexte, Yang et hu (2000) ont utilisé des modèles de fiabilité des machines pour étudier l'influence de divers agencements sur la productivité du système, y compris les configurations en parallèle et en série. D'autres chercheurs, comme Heragu *et al*. (2001), ont tenté de déterminer l'agencement du système de production dans lequel les volumes des produits et leurs variétés changent constamment. Ils présentent un cadre (framework) qui permet le développement et l'évaluation de plusieurs alternatives d'agencements en se basant sur des critères déterministes et stochastiques. De même, Benjafaar *et al*. (2002) ont identifié deux approches qui peuvent être utilisées pour traiter les problèmes de conception pour les usines du futur. La première approche prend en compte diverses périodes de production. Ici, le concepteur doit développer des agencements plus robustes qui sont adaptées pour toutes les périodes concernées. La deuxième approche consiste à développer un agencement plus flexible et reconfigurable. Cette reconfiguration d'agencement doit être réalisée avec un minimum d'effort pour répondre et satisfaire les systèmes de production avec des capacités importantes tout en assurant les changements fréquents des besoins de production.

Selon Guan *et al*. (2012) la reconfiguration et la re-conception de l'agencement d'un RMS de manière réactive et rentable est possible. Cela est dû à la flexibilité de certains systèmes de manutention comme les AGV qui peuvent facilement changer de voie. Les auteurs ont remarqué que les AGV sont conformes aux exigences des RMSs en ce qui concerne la manipulation du matériel (material handling). Par conséquent, ils proposent une conception d'agencement d'un RMS basée sur une adaptation d'un mécanisme semblable à l'électromagnétisme (electromagnetism-like mechanism). De plus, ils utilisent les AGVs et reconfigurent leurs chemins, qu'ils considèrent comme des changements d'agencement. L'objectif est de réduire les coûts du système, notamment les coûts de manutention et les coûts de reconfigurations. Cependant, comme nous pouvons le constater dans le travail de Koren *et al*. (2016), les AGVs actuelles sont coûteux et lents, donc ne sont pas un choix approprié pour ce type de systèmes de production. Les auteurs indiquent que ce type de système utilise souvent des convoyeurs à portique au lieu des AGVs.

## 2.9 Positionnement de nos problématiques de recherche

En se basant sur les travaux présentés précédemment, nous pouvons observer que la conception des RMSs, comparée à celle des systèmes de production conventionnels, est une tâche plus difficile (Rösiö, 2012, Tracht et Hogreve, 2012). Un RMS permet également la fabrication simultanée et réactive de plusieurs types de produits au sein d'une famille de produits. La conception et le pilotage d'un RMS impliquent la

résolution de problèmes d'optimisation plus difficiles et nécessitent donc le développement de nouvelles méthodes plus appropriées. En outre, la reconfigurabilité implique que plusieurs aspects doivent être inclus dans le processus de conception à savoir la reconfigurabilité, son domaine d'utilisation, les efforts requis, l'étendue de la reconfigurabilité et les possibilités et limites du système de production reconfigurable (Heisel et Meizner, 2007). De plus, compte tenu du niveau élevé d'incertitude sur la demande, les décideurs se tournent maintenant vers d'autres critères et ne se limitent pas au seul coût d'investissement.

Cependant et malgré la richesse de l'état de l'art, nous constatons que plus de travaux doivent se focaliser sur l'intégration et la quantification des caractéristiques clés de la reconfigurabilité. Notre travail de thèse et l'ensemble des problématiques abordées s'inscrivent dans cette perceptive afin d'identifier les outils et les méthodologies nécessaires pour une meilleure conception (assurant la réactivité) des RMSs. Pour ce faire, nous nous sommes basés sur *la génération des gammes de fabrication au niveau macro* qui réfère à la sélection de la meilleure séquence des différentes étapes du processus, des configurations et de la sélection des machines.

Nous avons d'une part la conception du système modulaire qui présente de nombreux avantages qui permettront de réaliser le paradigme du RMS et de réaliser la personnalisation de masse nécessaire. De plus, si la modularité est incorporée dans le processus de conception dès le départ, le coût du cycle de vie du système sera réduit. Plus la modularité est grande, plus le coût du cycle de vie sera faible (Gurumurthy, 1998), où les interfaces de modules normalisées ont un impact positif puisqu'elles harmonisent le contenu du travail (Fredriksson, 2006).

### 1. Problématique 1

Du point de vue du système, la modularité permet de réduire les coûts de production et les délais d'exécution (Gershenson et Prasad, 1997). Les RMTs et leur structure modulaire deviennent des facteurs importants à prendre en compte lors de la conception des RMSs pour l'évolutivité de la capacité (Moghaddam, 2017). Ce cadre rend la modularité un objectif majeur, en particulier lorsque les entreprises luttent pour rationaliser les processus de production et de soutien afin de produire une grande variété de produits à moindre coût. Dans cette optique, nous abordons notre première problématique qui considère la *prise en compte explicite de la modularité des machines à outils reconfigurables (RMTs) lors de la conception d'un système de production reconfigurable (chapitre 3).*

Plus précisément nous avons considéré une approche multicritère en considérant la modularité du système, le temps d'achèvement total et le coût total du système. Cette approche s'appuie sur la métathéorique connu AMOSA (Archived Multiobjective Simulated Anealing) ainsi qu'une technique d'aide à la décision multicritère nommée TOPSIS (Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution)

### 2. Problématique 2

D'autre part, nous remarquons davantage que les systèmes sont plus complexes, distribués et reconfigurables, ce qui implique également que la probabilité de dysfonctionnement du système augmente (Trentesaux 2009). Cependant et à notre connaissance, très peu de travaux de recherche abordent la prise en compte de la gestion des incertitudes dans RMS, comme par exemple les indisponibilités des machines. Ce type d'indisponibilité peut être le résultat d'une défaillance, de la maintenance, des erreurs de reconfiguration ou des erreurs de manipulation. Par conséquent, la réactivité du système peut être affectée et le processus de production peut être retardé ou même bloqué, alors qu'il est possible d'éviter ce genre d'obstacles. Dans ce contexte, nous abordons notre deuxième problématique qui traite *la prise en compte explicite des contraintes d'indisponibilité des machines à outils reconfigurables (RMTs) et leurs interactions lors de la conception d'un RMS (chapitre 4)*.

Dans la même optique, nous avons abordé cette problématique en s'appuyant sur trois approches multicritères. La première considère la flexibilité du système à côté du temps total d'achèvement de ce dernier. L'approche est basée sur une deuxième métaheurisque connue pour ses bons résultats dans la résolution de ce type de problème qui est NSGA-II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II) ainsi que sur TOPSIS pour aider le décideur à choisir la meilleure solution selon ses préférences. La deuxième approche considère la robustesse du système ainsi que son temps d'achèvement total. Cette deuxième approche s'appuie aussi sur la métaheuristique NSGA-II. La dernière approche considère l'indisponibilité du système à un niveau opérationnel en améliorant sa robustesse. Cette dernière s'appuie sur une heuristique hybride basée sur NSGA-II.

### 3. Problématique 3

Finalement, nous constatons que la conception d'un RMS ne doit pas prendre en compte exclusivement la sélection des machines, mais doit tenir compte des agencements de ces dernières (Oke *et al*, 2011, Bensmaine *et al*. 2013). De plus, nous avons remarqué qu'il existe un nombre très faible des travaux de recherche ainsi qu'un manque significatif dans la littérature en ce qui concerne l'incorporation du problème d'agencement des machines au paradigme RMS. Par conséquent, notre dernière problématique s'inscrit dans cette perspective et elle vise *la prise en compte explicite des positionnements des machines à outils reconfigurables (RMTs) dans un atelier et leurs impacts sur la conception d'un système de production reconfigurable (Chapitre 5)*.

Pour cette problématique, nous avons proposé deux approches. La première est une approche monocritère qui s'appuie sur une heuristique pour trouver l'agencement des machines dans un RMSs. La deuxième,

représente une approche multicritère basée sur AMOSA. L'approche considère l'effort d'évolution du système en passant d'une famille de produits à une autre tout en gardant ses hautes performances.

Nous visons, à travers cette dernière problématique, de répondre à la déficience de l'état de l'art vis-à-vis des problèmes d'agencement des machines en proposant des solutions tout en prenant en compte les exigences des RMSs

## 2.10 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une analyse de l'état de l'art dédiée aux RMSs et aux problèmes associés. Cet état de l'art, nous a montré la richesse de ce type de problématique et l'importance des RMSs dans l'environnement manufacturier moderne. Pour terminer, nous avons positionné l'ensemble de nos trois problématiques vis-à-vis de l'état de l'art et des défis associés.

Le chapitre qui suit présente notre première contribution où nous nous intéressons *au problème de génération et de sélection des meilleures gammes de fabrication nécessaires lors de la phase de conception d'un RMS avec la prise en compte de la modularité des machines à outils reconfigurable (RMTs)*.

# 3 Chapitre 3 : Prise en compte de la modularité des machines à outils reconfigurables (RMTs) lors de la conception d'un RMS

Ce chapitre présente notre première approche dédiée au problème de prise en compte explicite de la modularité des machines à outils reconfigurables (RMTs) lors de la phase de conception d'un RMS. L'objectif est de générer et sélectionner les meilleures gammes de fabrication nécessaires lors de cette phase. Un modèle mathématique multicritère est proposé afin de maximiser la modularité du système (indicateur de modularité que nous avons proposé), de minimiser le temps d'achèvement de la dernière opération sur la dernière machine de la gamme de fabrication (appelé Completion Time en anglais) et de minimiser le coût total du système incluant les coûts de changements des configurations des machines, les coûts d'utilisation des modules de ces configurations et les coûts d'exploitation des machines. De plus, nous avons adapté une technique de codage en nombres réels permettant d'éviter les solutions non réalisables lors de l'utilisation de la métaheuristique AMOSA pour résoudre notre problème d'optimisation. Pour terminer, la méthode TOPSIS est utilisée pour sélectionner la meilleure solution (gamme de fabrication) selon les préférences du décideur. Un exemple numérique est donné afin d'illustrer l'applicabilité de notre approche de résolution.

## 3.1 Introduction

Le RMS offre une flexibilité personnalisée et une variété d'alternatives et de fonctionnalités grâce à ses machines à outils reconfigurables (Reconfigurable Machine Tool – RMTs). Les RMTs sont considérés comme des composantes essentielles des RMSs et sont basés sur des structures réglables, modulaires et reconfigurables, d'où la grande importance de la modularité du système.

Comme nous l'avons indiqué dans le chapitre 2, de nombreux auteurs se sont intéressés aux impacts des RMTs sur les performances des RMSs. Dans ce cadre, Gadalla et Deyi (2016) ont constaté que les RMTs doivent avoir une architecture modulaire pour permettre l'ajout et la suppression de différents modules de la machine. Ils ont également souligné que lors de la conception et l'optimisation de la configuration, l'un des critères est de minimiser l'effort de reconfiguration tout en assurant une variété de configurations. De même, Goyal *et al*. (2013) ont montré que si le problème de sélection des machines est basé uniquement sur le coût sans tenir compte de l'effort de reconfiguration, la réactivité du système conçu sera réduite. Pour cette raison, les auteurs ont proposé des métriques de reconfigurabilité de la machine et de sa capacité opérationnelle, pour évaluer la réactivité des machines RMTs. Grâce à cette approche, les auteurs ont prouvé que plus le niveau de réactivité du RMT est élevé, plus la disponibilité pour les opérations requises est grande, moins l'augmentation des coûts est importante. La base de la métrique de reconfigurabilité de la machine correspond à l'effort nécessaire pour basculer entre les configurations de la machine.

Dans ce chapitre, nous abordons le problème de la prise en compte explicite de la modularité des RMTs lors de la phase de conception d'un RMS. La conception du RMS est faite autour d'une famille de produits (voir section 1.4.2). Le problème d'optimisation résultant consiste à sélectionner les machines les plus adéquates parmi un ensemble de machines candidates pour fabriquer un produit donné. Nous présentons une approche d'optimisation multicritère basée sur trois critères respectivement :

1. La maximisation de la modularité du système, qui repose sur les caractéristiques des RMTs et leurs modularités.
2. La minimisation du temps total de fabrication d'une unité du produit.
3. La minimisation du coût total de fabrication d'une unité du produit.

L'approche proposée utilise une version adaptée de la métaheuristique recuit simulé multicritère (Archived Multi-Objective Simulated Annealing – AMOSA). Une fois la métaheuristique appliquée, le front de Pareto des solutions obtenues est trié selon la technique d'aide à la décision multicritère "TOPSIS" (Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution" (TOPSIS). Cette technique permet de choisir la meilleure solution parmi un ensemble de solutions non dominées selon les préférences du décideur. Pour

illustrer l'applicabilité de notre approche, un exemple illustratif est détaillé et les résultats numériques sont analysés. Nous terminons le chapitre par une conclusion pour résumer les résultats obtenus.

## 3.2 Description du problème

La conception des RMSs inclue une flexibilité personnalisée--atteinte entre autres via la modularité des RMTs-- pour augmenter la réactivité du système face *aux perturbations et aléas*. La modularité est considérée comme une caractéristique primordiale pour la mise en œuvre des RMSs (Koren et Shpitalni, 2010). Toutefois, elle engendre une grande augmentation de la variété des processus (gammes de fabrication) dont la production a besoin (grâce à la diversité des machines, modules, tâches, configurations et outils).

Dans ce contexte, notre problème vise à :

1. Sélectionner parmi un ensemble des RMTs candidats, le meilleur sous-ensemble des RMTs à intégrer dans la conception du système.
2. Déterminer le meilleur ensemble des modules qui composent les RMTs sélectionnés.

L'étude de ce problème est basée sur les hypothèses suivantes :

- **Hypothèses 1 : Le produit**

Le produit considéré est défini par un ensemble des caractéristiques (En Anglais : *Features*), représentant les divers aspects de sa conception. Chacune de ces caractéristiques est composée d'un nombre déterminé d'opérations ayant des relations de précédence spécifiques. La Figure 3-1 illustre un exemple d'un produit à usiner présentant trois caractéristiques chacune avec un ensemble d'opérations.

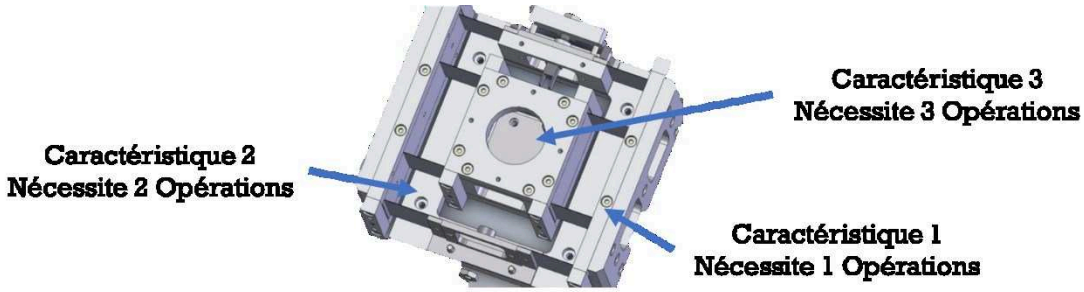



**Figure 3-1 exemple d'un produit à usiner**

- **Hypothèses 2 : Contraintes de précédences**

Les différentes opérations associées aux différentes caractéristiques sont reliées entre elles par des contraintes de précédences. Ces contraintes définissent l'ordre de succession des différentes opérations lors

de l'usinage/réalisation du produit. La Figure 3-2 représente un exemple des contraintes de précédence relatives au produit de la Figure 3-1.

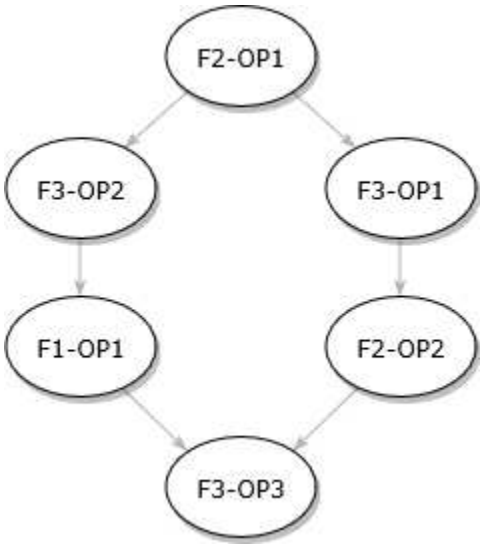



**Figure 3-2 Exemple d'un graphe de précédences des différentes opérations**

- **Hypothèses 3 : La gamme de fabrication**

Nous utilisons la gamme de fabrication pour pouvoir déterminer les différents composant à intégrer dans la conception de notre RMS. Elle permet aussi de déterminer les associations entre ces composantes (machines-opération-configuration-outils), ainsi que pour déterminer le meilleur séquencement qui nous permettra de produire une seule unité du produit.

Dans notre cas cette gamme de fabrication est représentée sous la forme d'une matrice 5x*N*. Le chiffre 5 correspond aux cinq éléments respectivement : caractéristique, opération, machine, configuration et outil. *N* représente le nombre total d'opérations à réaliser. Chaque colonne décrit la caractéristique à réaliser, l'opération associée, la machine en charge de sa réalisation, la configuration de la machine et l'outil utilisé. Le Tableau 3-1 présente un exemple de gamme de fabrication pour un produit avec 3 caractéristiques, 6 opérations sollicitant 4 machines avec un total de 11 configurations possibles utilisant 4 outils.

**Tableau 3-1 Exemple d'une gamme de fabrication**

| *Caractéristique* | *F2* | *F3* | *F1* | *F3* | *F2* | *F3* |
|---|---|---|---|---|---|---|
| *Opération* | OP1 | OP2 | OP1 | OP1 | OP2 | OP3 |
| *Machine* | M3 | M1 | M1 | M4 | M3 | M2 |
| *Configuration* | C1 | C2 | C4 | C3 | C1 | C3 |
| *Outil* | T2 | T3 | T1 | T4 | T1 | T2 |

Dans ce tableau, la gamme de fabrication est interprétée de gauche à droite, colonne par colonne. Par exemple, la dernière colonne est interprétée comme suit : pour la caractéristique F3, l'opération OP3 fait appel à la machine M2 avec sa configuration C3 en utilisant l'outil T2.

- **Hypothèses 4 : Les RMTs**

Les RMTs considérés sont modulaires et comportent chacun un nombre précis de modules (Figure 3-3). La librairie de modules contient un ensemble des modules dits de bases (BMod) et un ensemble des modules auxiliaires (AMod). Chaque RMT sélectionné doit avoir la possibilité de réaliser au moins une des opérations requises pour le produit/famille de produits à fabriquer.

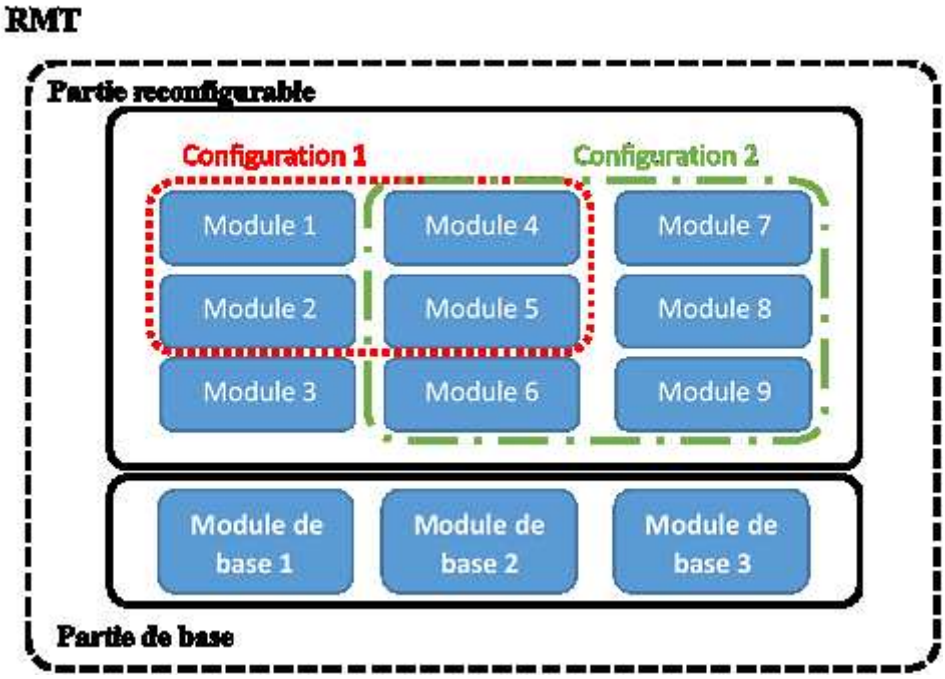



**Figure 3-3 Différentes parties d'une machine reconfigurable (modules de base et auxiliaires)**

Les modules de bases (BMod) représentent la partie fixe d'un RMT, généralement de natures structurelles, commune pour l'ensemble des configurations du RMT. Ainsi, ces modules ne sont pas partageables et ne sont pas concernés par le processus de reconfiguration de la machine. Les modules auxiliaires (AMod) peuvent être changés, ajoutés ou retirés, et représentent la partie reconfigurable du RMT. Très souvent, ces modules représentent des modules cinématiques ou des modules de mouvement (par exemple : adaptateurs, changeurs d'outils, structures angulaires). On constate généralement que les modules auxiliaires sont moins chers, plus légers et plus petits, et permettent des modifications économiques et rapides avec moins d'efforts (Hassan *et al*. 2013).

- **Hypothèses 5 : Contraintes de reconfiguration**

Un RMT offre dans ses différentes configurations une plage de mouvements le long des axes cartésiens (x, y et z) permettant d'effectuer les opérations qui lui ont été affectées. Ainsi, il est nécessaire d'identifier les besoins de chaque opération (le type de l'outil et les directions des outils (TAD – Tool Approach Direction). Une opération peut avoir besoin de plusieurs TADs parmi les six TAD possibles (±x, ±y and ±z). Notons que chaque configuration de chaque RMT offre un ensemble de TAD différent.

*Rappelons que notre objectif consiste à identifier les séquencements qui constituent la gamme de fabrication. Autrement dit, les associations machines – configurations – opérations, en déterminant pour chaque opération, la machine pouvant la réaliser et la configuration correspondante ainsi que l'outil requis. Il est à noter qu'une configuration de la machine dépend aussi des différents modules du RMT utilisé.*

*Il est important de signaler que les modules des RMTs sont considérés comme des ressources limitées et partagées, avec une ou plusieurs occurrences. Nous supposons que les modules sont compatibles avec les machines qui les partagent. De plus, il est possible de combiner des modules pour obtenir une nouvelle configuration si besoin.*

## 3.3 Notations et variables de décisions

Dans ce qui suit, nous détaillons : les notations utilisées tout au long de ce chapitre et des chapitres suivants, ainsi les variables de décisions.

**Notations**

| | |
|---|---|
| $k$ | Indice des caractéristiques |
| I | Indice des modules |
| J | Indice des machines |
| L | Indice des configurations |
| U | Indice des opérations |
| R | Indice des outils |
| $N$ | Nombre des caractéristiques du produit |
| $F_1, \dots, F_k, \dots F_N$ | Les caractéristiques du produit |
| NuM | Nombre total de modules auxiliaires |

| | |
|---|---|
| BNuM | Nombre total de modules de base |
| Nm | Nombre total des différentes machines candidates |
| $M_1, \dots, M_j, \dots, M_{Nm}$ | Ensemble des machines candidates |
| TNC | Nombre total des configurations |
| $NC_j$ | Nombre des configurations disponibles pour une machine $M_j$ |
| $C_1^j, C_2^j, \dots, C_{NC_j}^j$ | Configurations d'une machine $M_j$ |
| $OPTN$ | Nombre total des opérations de toutes les caractéristiques d'un produit |
| Ncop | Nombre d'opérations communes entre tous les produits de la famille de produits |
| $T_1^j, T_2^j, \dots, T_L^j$ | Les outils disponibles pour une machine $M_j$ |
| $NOPF_k$ | Nombre des opérations d'une caractéristique Fk |
| $OP_1^k, \dots, OP_u^k, \dots, OP_{np_k}^k$ | Les opérations d'une caractéristique Fk |
| $u.m$ | Unité monétaire |
| $u$.t | Unité de temps |
| $CCTime_j[C_l^j][C_{l'}^j]$ | Temps de changement de configuration pour la machine $M_j$ de la configuration l vers la configuration l' |
| $McTime[M_j][M_j']$ | Temps de changement de machine de la machine j vers la machine j' |
| $TcTime[T_q][T_{q'}]$ | Temps de changement d'outil pour une machine de l'outil q vers l'outil q' |
| $PrTime[M_j][OP_u^k]$ | Temps de traitement de l'opération u de la caractéristique k sur la machine $M_j$ |
| $MC[M_j]$ | Coût d'utilisation de la machine $M_j$ |
| $Amod_i$ | i$^{ème}$ Module auxiliaire |
| $Amod_i^j$ | Besoin du module auxiliaire i : égal 1 si la machine Mj à besoin du module i, 0 sinon |
| $Amod_i^u$ | Besoin du module auxiliaire i : indique si le module auxiliaire i est requis pour l'opération u, égale à 1 si l'opération u a besoin du module i, 0 sinon |
| $Amod_i^{cop}$ | Besoin du module auxiliaire i : indique si le module auxiliaire i est requis pour les opérations communes cop, égale à 1 si l'opération commune cop a besoin du module i, 0 sinon |

| | |
|---|---|
| $Pmod_i^j$ | Besoin du module auxiliaire : indique si le module auxiliaire i et la machine j sont compatible : égale à 1 si la machine m est compatible avec le module i, 0 sinon |
| $NmodOP_u$ | Nombre des modules requis par l'opération u |
| $Conf_j[\,]$ | Matrice des configurations disponibles pour la machine $M_j$ |
| $MT_j[\,]$ | Matrice des outils disponibles pour machine $M_j$ |
| $RTOP[OP_u^k]$ | Matrice des outils requis par l'opération u de la caractéristique k |
| $CTAD_j[C_l^j][6]$ | Matrice des six TAD offerts par la configuration l de la machine $M_j$ |
| $OPTAD_j[OP_u^k][6]$ | Matrice des six TAD requis par l'opération u de la caractéristique k |
| $MTOP[OP_u^k]$ | Matrice des outils requis par l'opération u de la caractéristique k |
| $PRM[OP_u^k][OP_{u'}^k]$ | Matrice des contraintes de précédence des opérations |

**Variables de décision**

Pour toute gamme de fabrication, on a besoin de déterminer :

- Séquence des caractéristiques
- Séquence des opérations respectant les contraintes de précédences
- Séquence des machine sélectionnées
- Séquence des configurations associées
- Séquence des outils utilisés

| | |
|---|---|
| $Nmod_i$ | Nombre d'occurrences disponibles d'un module auxiliaire i |
| NSM | Nombre des machines sélectionnées pour la conception du RMS |

**Critères à optimiser**

| | |
|---|---|
| $f_{time}$ | Temps total d'achèvement |
| $f_{\mathrm{mofularity}}$ | Modularité totale du système |
| $f_{\mathrm{Cost}}$ | Coût total |

## 3.4 Formulation mathématique et complexité

En se basant sur les notations ci-dessus ainsi que nos hypothèses détaillé dans la section 3.2, notre problème peut être formulé comme suit : un ensemble de machines $M_j$ $(j = 1 \ldots NSM)$ est à sélectionner parmi Nm machines candidates pour accomplir un ensemble d'opérations $OP_u^k$ $(u = 1 \ldots NOPF_k\ ,\ k = 1, \ldots n)$. Les machines sélectionnées comprennent des modules auxiliaires ($nmod \leq NuM$), chacun de ces modules possède un nombre limité d'occurrence $Nmod_i$. Chaque machine dispose d'un ensemble de configurations, dont chacune offre diverses fonctionnalités. Ainsi, le problème de sélection des machines revient à :

*(i)* Déterminer les associations entre les opérations et les machines (i.e. chaque opération est réalisée par quelle machine ?) en prenant en compte les besoins de l'opération et les caractéristiques des machines en matière de configurations, outils et TAD disponibles dans chaque configuration,

*(ii)* Identifier le nombre d'occurrences de chaque module auxiliaire requis par le système conçu,

*(iii)* Déterminer la séquence des opérations à réaliser.

Tout en maximisant la modularité du système (équation 3-6), minimisant le temps total d'achèvement (équation 3-11) et minimisant le coût total nécessaire pour la fabrication d'une unité de produit (équation 3-16).

Ces équations seront détaillées dans les sous sections suivantes (3.4.1-3.4.3). L'ensemble de ces équations sera utilisé pour évaluer les différentes gammes de fabrication (séquencement et association des variables de décision) afin de pouvoir choisir les meilleures gammes de fabrication. La génération de ces gammes de fabrication afin de déterminer les différente séquencement et association de nos variables de décision est détaillé dans la section suivante (3.5). Notre modèle pour la génération des solutions (gammes de fabrication) est sujet à des contraintes qui sont détaillées dans la sous-section 3.4.4.

En ce qui concerne la complexité du problème, nous constatons que notre problème est NP difficile. En effet, si les associations opérations-machines et le nombre d'occurrence de chaque module auxiliaire, pour une gamme de fabrication optimale sont connues, notre problème revient à trouver le séquencement optimal des opérations à réaliser. Dans notre cas, nous pouvons associer un graphe dirigé (G= {V, A}), multiniveaux tels que les sommets d'un niveau sont des opérations qui ne sont pas reliées par des contraintes de précédences. En effet, si nous revenons à l'exemple illustré par la Figure 3-4, nous avons 4 niveaux :

Niveau 1={F2-OP1}, avec |Niveau 1|=1

Niveau 2= {F3-OP2, F3-OP1}, avec |Niveau 2|=2

Niveau 3= {F1-OP1, F2-OP2}, avec |Niveau 3|= 2

Niveau 4={F3-OP3}, avec |Niveau 4|= 1

Ainsi, trouver un séqu0encement d'opérations réalisable est un problème facile. Toutefois, trouver un séquencement optimal, impose de parcourir au moins : |Niveau 1| ! x |Niveau 2| ! x |Niveau 3| ! x |Niveau 4| ! = 1 ! x2 ! x2 ! x1 ! =4 séquencements réalisables.

Par conséquent, pour un graphe à k niveaux, le nombre de séquencements réalisables est tel que :

$$|Ensemble\ des\ séquencements\ réalisables| \geq \prod_{l=1}^{k} N_l\ !$$

avec |Niveau l|= $N_l$!

Pour terminer, trouver un séquencement *optimal* impose de parcourir au moins $\prod_{l=1}^{k} N_l$ ! séquencements réalisables. *Il est important de signaler, que cette étude de complexité est aussi valable pour les problèmes abordés dans les chapitres 4 et 5*.

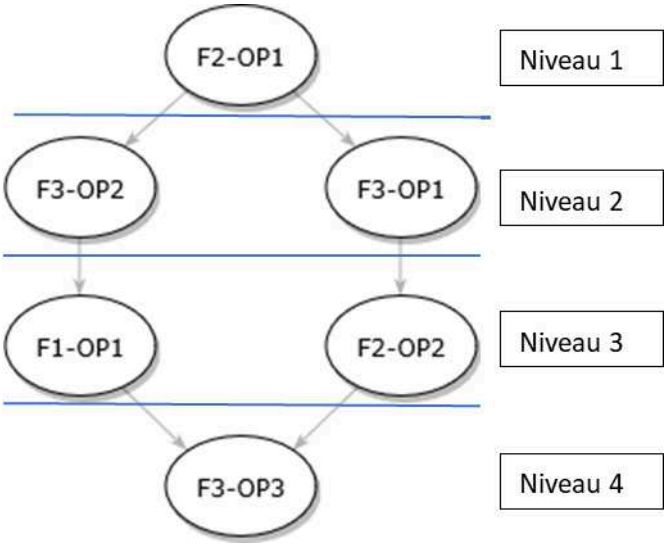



**Figure 3-4 Graphe multiniveaux**

### 3.4.1 Niveau de modularité

La première étape revient à définir l'indicateur de modularité qui permet d'évaluer la modularité du système. Il est basé sur cinq aspects formulés comme suit :

#### *A. Les relations machines – modules*

Les relations entre les machines et les modules décrivent les similitudes entre les machines sélectionnées pour concevoir le système en matière de modules et représentent le nombre de modules communs entre

toutes ces machines (Figure 3-5). Elles permettent d'identifier les modules les plus fréquemment utilisés dans la gamme de fabrication.

Les relations machines – modules sont formulées par l'équation (3-1) comme suit :

$$ComMod = \sum_{i=0}^{NuM} \sum_{j=0}^{Nsm} \frac{Amod_i^j}{NSM} \qquad \textbf{(3-1)}$$

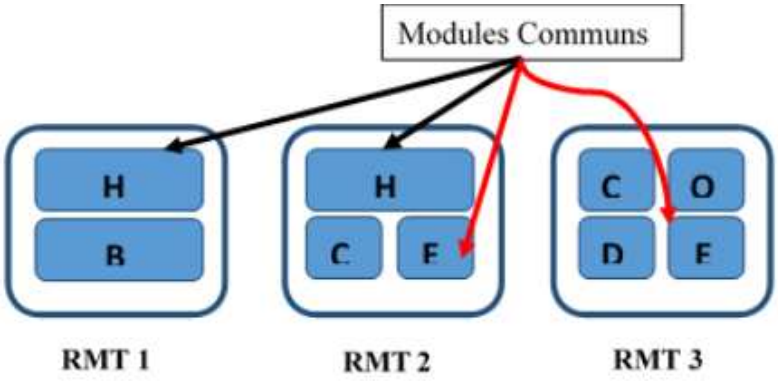



**Figure 3-5 Modules communs**

### *B. Le partage des modules*

En se basant seulement sur les relations machines – modules décrites par l'équation (3-1), il peut y avoir un risque de partage de modules, dû à la limitation du nombre d'occurrences des modules disponibles. La Figure 3-6 illustre un exemple de partage de modules entre machines.

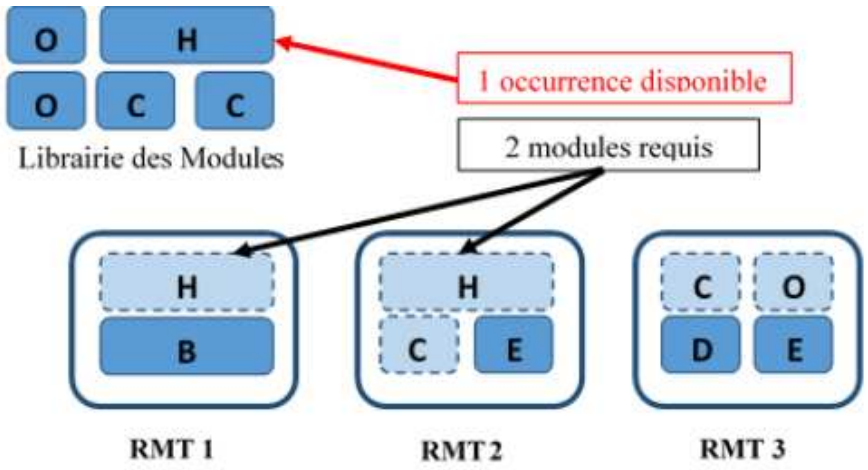



**Figure 3-6 Modules partagés**

Ainsi, dans un contexte de partage de ressources, l'équation (3-2) permet d'identifier le nombre des occurrences requis pour chaque module :

$$SharedMod = \sum_{i=0}^{NuM} \frac{Nmod_i}{\sum_{j=0}^{NSm} \sum_{l=0}^{TNC} MCModR[M_j][C_l][AMod_i]} \quad \textbf{(3-2)}$$

Tel que :

$$MCModR[M_j][C_l][AMod_i] = \begin{cases} 1 \text{ si la configuration } l \text{ de la machine } j \text{ requière le module auxiliaire } i, \\ 0 \text{ sinon} \end{cases}$$

### *C. Les relations produit – modules*

L'équation (3-3) exprime la relation entre les modules sélectionnés et le produit, afin de prendre en compte les besoins de chacune des opérations nécessaires pour la fabrication de ce produit. Elle permet de définir un rapport entre les besoins du produit et les ressources disponibles :

$$ProdMod = \sum_{u=0}^{OPTN} \frac{\sum_{i=0}^{NuM} (Nmod_i \times Amod_i^u)}{NmodOP_u \times \text{NuM}} \quad \textbf{(3-3)}$$

### *D. Les relations gamme de fabrication – machines*

Une grande dépendance de la gamme de fabrication envers une ou plusieurs machines peut entrainer plusieurs situations qui affecteront les performances du RMS (déséquilibre des charges, blocage de la production, …). *Pour remédier à ce problème, nous proposons le facteur Diverf pour quantifier la diversité des machines sélectionnées, points de vue fonctionnalités, configurations et utilisations dans la gamme de fabrication*. Ce facteur est exprimé par l'équation (3-4) comme suit :

$$Diverf = \sum_{j=1}^{NSM} \frac{\sum_{u=1}^{OPTN} M_j(OP_u^k)}{NSM} \quad \textbf{(3-4)}$$

### *E. Les relations famille de produits – modules*

Une famille de produits est caractérisée par un ensemble de caractéristiques communes à l'ensemble des produits, ce qui lui donne son aspect personnalisable (Figure 3-7).

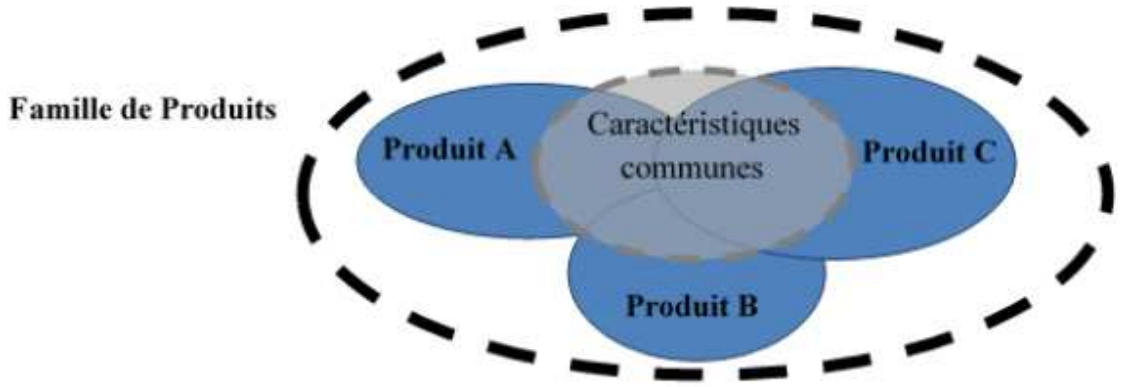



**Figure 3-7 Caractéristiques communes dans une famille de produits**

L'équation (3-5) permet de mesurer la capacité de l'ensemble des modules auxiliaires sélectionnés à répondre aux besoins des opérations correspondant aux caractéristiques communes de la famille de produits

$$FamMod = \sum_{i=0}^{NuM} \sum_{cop=0}^{Ncop} \frac{Amod_i^{cop}}{Ncop \times \mathrm{NuM}} \qquad \textbf{(3-5)}$$

Ainsi, comme nous pouvons le voir, le but est d'augmenter le recours à des modules pouvant réaliser des opérations communes (COP) de la famille de produits pour minimiser le besoin d'ajouter de nouveau modules ou de retirer des modules existants lors d'une évolution vers un nouveau produit de la même famille.

En considérant les cinq aspects décrits à travers les équations (3-1), (3-2), (3-3), (3-4) et (3-5), le premier critère qui consiste à maximiser la modularité du système reconfigurable est exprimé par l'équation (3-6) comme suit :

$$Max\left\{\mathrm{f_{Modularity}}\right\} = \frac{(SharedMod + ProdMod)}{Diverf} + ComMod + FamMod \qquad \textbf{(3-6)}$$

## 3.4.2 Temps total d'achèvement

Le deuxième critère concerne le temps total d'achèvement de fabrication requis pour accomplir toutes les opérations nécessaires à la réalisation d'une unité du produit, en se basant sur la gamme de fabrication générée. Ce temps dépend de plusieurs paramètres tels que : les traitements des opérations, les reconfigurations des machines, les changements d'outils et les transferts du produit entre les machines.

### *A. Temps total de traitement des opérations*

Le temps total de traitement dépend des besoins des différentes opérations (temps, TAD) et des spécificités des différentes machines utilisées (type, configuration).

L'équation (3-7) exprime le temps total de traitement des différentes opérations nécessaires à la réalisation du produit.

$$PrT = \sum_{j=1}^{NSM} \sum_{u=1}^{OPTN} PrTime\left[M_j(OP_u)\right]\left[C_l^j(OP_u)\right] \quad \textbf{(3-7)}$$

Comme nous pouvons le voir, le temps requis par la machine $M_j$ $(j = 1, \dots Nm)$ sous sa configuration $C_l^j\left(i = 1, \dots NC_j\right)$ pour réaliser l'opération$\mathrm{OP}_u$ $(u = 1, \dots OPTN)$ est donné par $PrTime\left[M_j(OP_u)\right]\left[C_l^j(OP_u)\right]$.

### *B. Temps total de changement d'outils*

Le temps total de changement d'outils correspond à l'ensemble des changements d'outils nécessaires à la réalisation du produit. L'équation (3-8) donne ce temps total :

$$TCT = \sum_{u=1}^{OPTN} TcTime[T_r(OP_u)][T_{r'}(OP_{u'})] \quad \textbf{(3-8)}$$

Comme nous pouvons le voir, le temps nécessaire pour changer l'outil $T_r$ afin d'effectuer l'opération requise $OP_u$ est donné par $TcTime[T_r(OP_u)][T_{r'}(OP_{u'})]$ avec $u'$= *min* $(u_k)$, $u < u_k < OPTN$, $k = 1, \dots OPTN$

### *C. Temps total de changements de configurations*

Le temps total de changements de configurations désigne la somme de tous les temps de changements individuels de configurations des machines pour réaliser le produit. L'équation (3-9) donne ce temps total de changements de configurations.

$$CCT = \sum_{u=0}^{OPTN} \sum_{i=0}^{NuM} \left| \begin{matrix} MCModR\left[M_j\right][C_l(u)][AMod_i] \\ -MCModR\left[M_{j'}\right][C_{l'}(u')][AMod_{i'}] \end{matrix} \right| \times ModHT_i \quad \textbf{(3-9)}$$

Comme nous pouvons le voir, la reconfiguration d'une machine donnée dépend du type de la machine en question, de sa configuration de départ, ainsi que des modules requis pour la configuration cible. Il est donné par $\sum_{i=0}^{NuM} \left| \begin{matrix} MCModR\left[M_j\right][C_l(u)][AMod_i] \\ -MCModR\left[M_{j'}\right][C_{l'}(u')][AMod_{i'}] \end{matrix} \right| \times ModHT_i$

avec :

1. $u'$= *min* $(u_k)$, $u < u_k < OPTN$, $k = 1, \dots OPTN$.
2. $C_l(u)$: Configuration *l* désignée pour accomplir l'opération *u*.

3. $MCModR$: une matrice de 3-dimensions décrivant la relation entre les machines, leurs configurations et les modules auxiliaires.

$$MCModR[M_j][C_l(u)][AMod_i] = \begin{cases} 1, & \text{Si la configuration } l \text{ de la machine } Mj \\ & \text{est compatible avec le module } i \\ 0, & Sinon \end{cases}$$

4. *ModHT* : un vecteur de taille NuM qui contient les temps nécessaires pour le changement des modules auxiliaires.

#### *D. Temps total de transfert (changement de machines)*

Le temps total de transfert représente l'ensemble des temps nécessaires pour transporter le produit d'une machine vers une autre. Il est exprimé par l'équation (3-10) :

$$MCT = \sum_{j=1}^{NSM} \sum_{u=1}^{OPTN} MCTime[M_j(OP_u)][M_{j'}(OP_{u'})] \quad \textbf{(3-10)}$$

Comme nous pouvons le voir, ce temps dépend de l'opération en cours de réalisation, de la machine sur laquelle elle est réalisée, la prochaine opération à réaliser et ainsi que la prochaine machine à utiliser. Cette relation est donnée par $MCTime[M_j(OP_u)][M_{j'}(OP_{u'})]$.

En se basant sur les équations (3-7), (3-8), (3-9) et (3-10), le deuxième critère consiste à minimiser le temps total d'achèvement donné par l'équation (3-11) :

$$Min\{f_{Time}\} = PrT + TCT + CCT + MCT \quad \textbf{(3-11)}$$

### 3.4.3 Coût total de fabrication

Le troisième critère représente le coût total généré par le système pour accomplir les opérations nécessaires pour la fabrication d'une unité de produit. Il est exprimé en se basant sur les expressions des coûts suivants :

#### *A. Coût total de changements de configurations*

Le coût total de changements de configurations désigne l'ensemble des coûts générés par les actions de reconfiguration des machines. Ce coût est exprimé par l'équation (3-12)

$$ConfCC = \sum_{u=0}^{OPTN} \sum_{i=0}^{NuM} \left| MCModR[M_j][C_l(u)][AMod_i] - MCModR[M_{j'}][C_{l'}(u')][AMod_{i'}] \right| \times \alpha \quad \textbf{(3-12)}$$

Comme nous pouvons le constater, le coût de changement de configuration d'une machine donnée dépend du type de machine, de sa configuration de départ, ainsi que les modules requis pour la configuration cible. Il est donné par $\sum_{i=0}^{NuM} \left| MCModR[M_j][C_l(u)][AMod_i] - MCModR[M_{j'}][C_{l'}(u')][AMod_{i'}] \right| \times \alpha$

Avec :

- ✓ $ModHC_i$ : un vecteur de longueur NuM qui représente le coût de manipulation pour chaque module auxiliaire.
- ✓ $\alpha = Nmod_i \times ModHC_i$.
- ✓ $u'=min\ (u_k)$, $u < u_k < OPTN$, $k= 1,\dots OPTN$.

### *B. Coût total d'utilisation des modules auxiliaires*

Le coût total d'utilisation des modules auxiliaires est basé sur les coûts unitaires d'utilisation et les temps d'utilisation nécessaires par chacune des opérations qui requièrent ces différents modules. Il est exprimé par l'équation (3-13) :

$$AModUC = \sum_{u=0}^{OPTN} \sum_{i=0}^{NuM} \begin{bmatrix} ModOP[OP_u][AMod_i] \\ \times AModUCost[AMod_i] \\ \times PrTime\left[M_j(OP_u^k)\right]\left[C_l^j(OP_u^k)\right] \end{bmatrix} \quad \textbf{(3-13)}$$

Avec :

- ✓ $AModUCost$: coût unitaire d'utilisation d'un module auxiliaire. Il s'agit d'un vecteur de longueur NuM qui représente le coût engendré par l'utilisation d'un module auxiliaire donné, pendant une seule unité de temps.

### *C. Coût total d'utilisation des modules de base*

Le coût total d'utilisation des modules de base repose sur les coûts unitaires et les temps d'utilisation de chaque module de base sur les différentes machines pour réaliser les différentes opérations de fabrication requises (équation (3-14)).

$$BModC = \sum_{u=0}^{OPTN} \sum_{i=0}^{BNuM} BmodCost_j^r \times \sigma \times PrTime\left[M_j(OP_u^k)\right]\left[C_l^j(OP_u^k)\right] \quad \textbf{(3-14)}$$

Avec :

- ✓ $BmodCost_j^r$: le coût d'utilisation d'un module de base *r* de la machine *j* pour une seule unité de temps.
- ✓ $\sigma = 1$, si la machine *j* est désigné pour réaliser l'opération *u*, 0 sinon

### *D. Coût total d'utilisation des machines*

Le coût total d'utilisation des machines représente les coûts générés par les utilisations des machines (*MuC*) pour réaliser les opérations requises, ainsi que les coûts générés par le transfert (*McC*) entre les machines impliquées dans la fabrication. Son expression est donnée par l'équation (3-15) :

$$MEC = \sum_{u=1}^{OPTN} Muc\left[\mathrm{M_j}(OP_u)\right] + McC\left[\mathrm{M_j}(\mathrm{OP}_u)\right]\left[\mathrm{M_j}(\mathrm{OP}_{u'})\right] \quad \textbf{(3-15)}$$

avec :

- ✓ $MuC\left[\mathrm{M_j}(OP_u)\right]$ : le coût de la machine *j* sélectionnée pour réaliser l'opération *u*
- ✓ $McC$: coût de changement des machines, représenté sous la forme d'une matrice $(Nm \times Nm)$ qui fournit le coût du changement d'une machine *j* à une machine *j'*.
- ✓ $u'$=min $(u_k)$, $u < u_k < OPTN$, $k = 1, \ldots OPTN$

En se basant sur les expressions des différents coûts donnés par les équations (3-12), (3-13), (3-14) et (3-15), le troisième critère consiste à minimiser le coût total de fabrication (3-16):

$$Min\,\{f_{Cost}\} = AModUC + ConfCC + BModC + MEC \qquad \textbf{(3-16)}$$

### 3.4.4 Contraintes du modèle

Notre problème d'optimisation est soumis à plusieurs contraintes, que nous décrivons comme suit :

**Contraintes de type 1 :**

Une machine doit être capable de réaliser toutes opérations désignées pour elle en termes des TADs. C'est-à-dire les TADs requises par une opération u doivent être inclus dans les TADs offerts par la configuration $C_l^j$ de la machine $M_j$ désignée pour réaliser cette opération u (3-17)

$$\mathrm{CTAD_j}\left[\mathrm{C_l^j}\right][d] \geq \mathrm{OPTAD_j}\left[\mathrm{OP_u^k}\right][\mathrm{d}] \qquad \textbf{(3-17)}$$

Avec :

- ✓ $\mathrm{d} \in \{+x, -x, +y, -y, +z, -z\}$ Représente l'indice des six TAD possibles
- ✓ $\mathrm{CTAD_j}\left[\mathrm{C_l^j}\right][d] = 1$ Si la configuration $\mathrm{C_l^j}$ offre le TAD d, 0 sinon
- ✓ $\mathrm{OPTAD_j}\left[\mathrm{OP_u^k}\right][\mathrm{d}] = 1$ Si l'opération u de la caractéristique k a besoin du TAD d, 0 sinon.

**Contraintes de type 2 :**

Toutes les opérations doivent satisfaire les contraintes de précédences (3-18) :

$$\mathrm{PRM}\left[\mathrm{OP_u^k}\right]\left[\mathrm{OP_{u'}^k}\right] = 0 \quad \forall\, \mathrm{u} > u' \qquad \textbf{(3-18)}$$

**Contraintes de type 3 :**

Un outil est en mesure d'effectuer l'opération qui lui a été assignée (3-19) :

$$\mathrm{MT_j}\left[\,\mathrm{RTOP}\left[\mathrm{OP_u^k}\right]\right] = 1 \qquad \textbf{(3-19)}$$

## 3.5 Approche proposée

Dans le cas de cette première problématique, nous avons utilisé une adaptation de la métaheuristique de recuit simulé multicritère connue sous le nom d'AMOSA (*Archived Multi-Objective Simulated Annealing*).

AMOSA est un algorithme évolutionnaire développé par Bandyopadhyay *et al.* (2008), son pseudocode est présenté dans l'algorithme 1. AMOSA fournit un ensemble de solutions caractérisées par un compromis entre les différents critères en incorporant le concept d'une archive de solution. Bandyopadhyay *et al.* (2008) ont prouvé l'efficacité de cette métaheuristique en la comparant à d'autres approches multicritères existantes, y compris NSGA-II. La comparaison prouve qu'AMOSA surpasse ses concurrents dans la plupart des cas et affiche des performances améliorées tout en prenant moins de temps.

**Algorithme 1 Pseudocode AMOSA**

```
Initialiser (Archive, Solution_courante)
Température = temperature_max
Tant que (Température > temperature_min)
    Pour (I=0 ; I<nombre itérations ; I++)
        Nouvelle_Solution ← perturber(Solution_courante)
        /*1er Cas*/
        Si (Solution_courante Domines Nouvelle_Solution) Alors
            Nouvelle_Solution ← Solution_courante avec une probabilité
        Fin Si
        /*Case 2*/
        SI (Solution_courante et Nouvelle_Solution Sont non-dominées entre elles) Alors
            Si (Nouvelle_Solution est dominée par k points dans l'Archive) Alors
                Nouvelle_Solution ← Solution_courante avec une probabilité
            Fin Si
            Si (aucun point de l'Archive ne domine Nouvelle_Solution) Alors
                Nouvelle_Solution ← Solution_courante
                Ajouter Nouvelle_Solution à l'Archive
                Enlever de l'Archive les points dominées Nouvelle_Solution
            Fin Si
        Fin Si
        /*Case 3*/
        Si (Nouvelle_Solution Domine Solution_courante) Alors
            Si (Nouvelle_Solution est dominée par k points dans l'Archive) Alors
                Solution_courante ← choisir une solution à partir de l'archive avec une probabilité
            Sinon Nouvelle_Solution ← Solution_courante
            Fin Si
            Si (aucun point de l'Archive ne domine Nouvelle_Solution) Alors
                Nouvelle_Solution ← Solution_courante
                Ajouter Nouvelle_Solution à l'Archive
                Enlever de l'Archive les points dominées Nouvelle_Solution
            Fin Si
        Fin Si
    Fin pour
    Température = température × Alpha
Fin Tant que
```

Nous rappelons que les solutions considérées dans l'algorithme (Nouvelle_Solution et Solution_courante) sont des gammes de fabrication. Pour déterminer la dominance entre ces solutions, chacune d'entre elle est évaluée en utilisant nos trois critères définis par les équations (3-6) (3-11) et (3-16).

### 3.5.1 La procédure de codage des solutions

En ayant recours aux algorithmes évolutionnaires comme AMOSA, il est primordial de bien choisir la représentation codée des solutions réelles, afin qu'elles soient facilement utilisables par l'algorithme. Cette étape critique est connue comme l'étape du codage. En effet, les différentes opérations réalisées par la métaheuristique peuvent altérer les solutions manipulées, ce qui peut conduire à l'obtention de solutions dites non réalisables. Un exemple de ce scénario est illustré par la Figure 3-8. Dans cet exemple, suite à la perturbation réalisée par AMOSA, la solution obtenue est non réalisable parce qu'elle ne respecte pas les contraintes de précédences des opérations (l'opération OP2 doit être réalisée avant OP5).

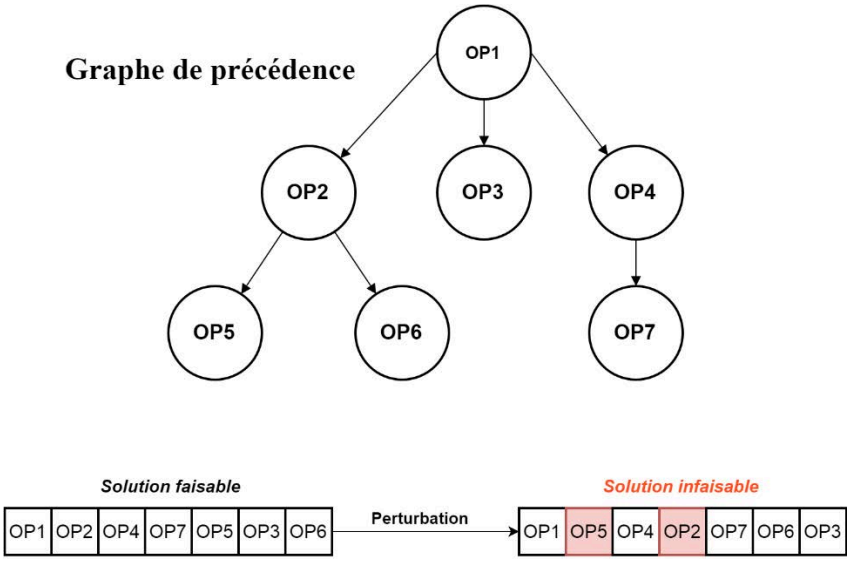



**Figure 3-8 Décodage d'une solution non réalisable**

Pour remédier à ce type de problème, il est possible de procéder à une correction de la solution générée. La Figure 3-9 illustre un exemple de procédure de correction qui consiste à interchanger les opérations de la solution non réalisable.

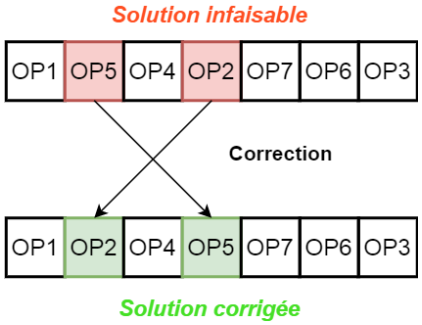



**Figure 3-9 Processus de correction d'une solution non réalisable**

En revanche, il faut noter que le processus de correction peut lui aussi générer d'autres solutions non réalisables. De plus, des corrections répétitives peuvent causer une modification importante de la solution

générée. Dans ce contexte, le processus de correction peut affecter les performances de la métaheuristique en matière de temps de calcul et de qualité des solutions finales.

Afin d'éviter ces situations périlleuses, nous proposons de coder la gamme de fabrication de notre problème en nombres réels compris entre 0 et 1. Le Tableau 3-2 représente un exemple du codage d'une gamme de fabrication par une matrice réelle $6 \times OPTN$ basée sur six éléments (caractéristiques, opérations, machines, configurations, outils et modules). À la différence de la gamme de fabrication originale représentée par une matrice 5xOPTN (Tableau 3-1), nous avons rajouté un sixième élément qui correspond au « Module »

**Tableau 3-2 Exemple du codage d'une gamme de fabrication**

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Caractéristique | 0.94 | 0.53 | 0.26 | 0.85 | 0.40 |
| Opération | 0.23 | 0.42 | 0.44 | 0.96 | 0.57 |
| Machine | 0.25 | 0.53 | 0.03 | 0.76 | 0.25 |
| Configuration | 0.80 | 0.98 | 0.27 | 0.44 | 0.59 |
| Outil | 0.32 | 0.51 | 0.63 | 0.21 | 0.54 |
| Module | 0.26 | 0.69 | 0.75 | 0.64 | 0.13 |

### 3.5.2 Processus de décodage

Une fois que la solution initiale est générée aléatoirement, il est nécessaire de décoder les valeurs de cette matrice afin de la transformer en une gamme de fabrication (Tableau 3-1). La gamme obtenue est évaluée en se basant sur les fonctions objectifs, décrites dans la section 3.4. Afin d'explorer l'espace de recherche, l'algorithme génère des nouvelles solutions en suivant une méthode de perturbation. Dans notre cas, nous avons implémenté une méthode de perturbation pour modifier la gamme de fabrication codée courante à un certain degré déterminé suite à plusieurs tests (par exemple pour ce problème, les valeurs des éléments de la matrice codée associée à la gamme initiale sont modifiées à hauteur de 45%). En effet, la perturbation proposée sélectionne aléatoirement des éléments de la matrice qui représente la solution codée et remplace leurs valeurs par de nouvelles valeurs générées aléatoirement.

Le processus de décodage proposé est basé sur deux phases :

- La première phase concerne les cinq premiers éléments dans le Tableau 3-2, à savoir : caractéristiques, opérations, machines, configurations et outils. Cette phase utilise le processus de décodage décrit dans les travaux de Bensmaine *et al*. (2013) (voir plus en détails le sous-titre suivant).
- La deuxième phase correspond à notre proposition et concerne les modules auxiliaires. Elle permet de vérifier le besoin d'ajouter ou de supprimer les occurrences des différents modules.

La gamme de fabrication codée dans le Tableau 3-2 est décodée de gauche à droite, colonne par colonne en suivant les deux phases selon la démarche suivante.

### *A. Phase 1 : décodage des caractéristiques, opérations, machines, configurations et outils*

Le décodage d'une solution codée, est effectué colonne par colonne, dans un ordre précis : caractéristique, opération, machine, configuration puis outil.

La démarche ci-dessous est décrite pour la première ligne (les caractéristiques), la même logique sera suivie pour le décodage des autres lignes (i.e. Opérations, machines, configurations et outils).

Nous commençons par l'identification parmi l'ensemble des caractéristiques requises, celles qui ne sont pas encore achevées (au moins une opération de la caractéristique n'a pas été réalisée) et qui peuvent être sélectionnées en respectant les contraintes du modèle (comme les contraintes de précédences). Cette étape, nous permet de connaître le nombre d'opérations comprises dans chaque caractéristique et le nombre total d'opérations à décoder.

Une fois l'identification est accomplie, nous pouvons suivre les étapes suivantes :

1. Créer une liste de longueur L, tel que L est le nombre total des opérations restantes de l'ensemble les caractéristiques candidates identifiées lors de l'étape d'identification.
   Prenons l'exemple suivant pour illustrer ce processus : nous avons trois caractéristiques candidates (F1, F2 et F3), qui contiennent respectivement 2,3 et 4 opérations. La caractéristique F1 (respectivement F2 et F3) lui reste encore deux (respectivement une) opérations à décoder. Dans ce cas notre liste sera de longueur (2+1+1), donc L=4.
2. Une fois la longueur de liste est déterminée, placer dans cette liste les caractéristiques candidates par ordre croissant (selon l'indice des caractéristiques). Chaque indice est dupliqué le nombre d'opérations qui reste à effectuer.
   Pour notre exemple la liste sera comme illustré par le Tableau 3-3

**Tableau 3-3 Liste des caractéristiques restantes pour le décodage**

| **Indice** | **1** | **2** | **3** | **4** |
|---|---|---|---|---|
| **Caractéristique** | F1 | F1 | F2 | F3 |

3. Multiplier la valeur réelle dans la cellule correspondante en cours de décodage. Par exemple, la quatrième caractéristique sur la première ligne du Tableau 3-2 (0.85) sera multipliée par la longueur de la liste L=4.
4. Arrondir le résultat à l'entier le plus proche : $0.85 \times 4 = 3.4 \approx 3$). Ainsi, le nombre entier obtenu représente l'indice de la caractéristique à sélectionner dans la liste précédemment établie, il s'agit dans notre exemple de F3.

Pour mieux comprendre le processus de décodage, la Figure 3-10 illustre la phase 1 du décodage de la caractéristique dans la quatrième position.

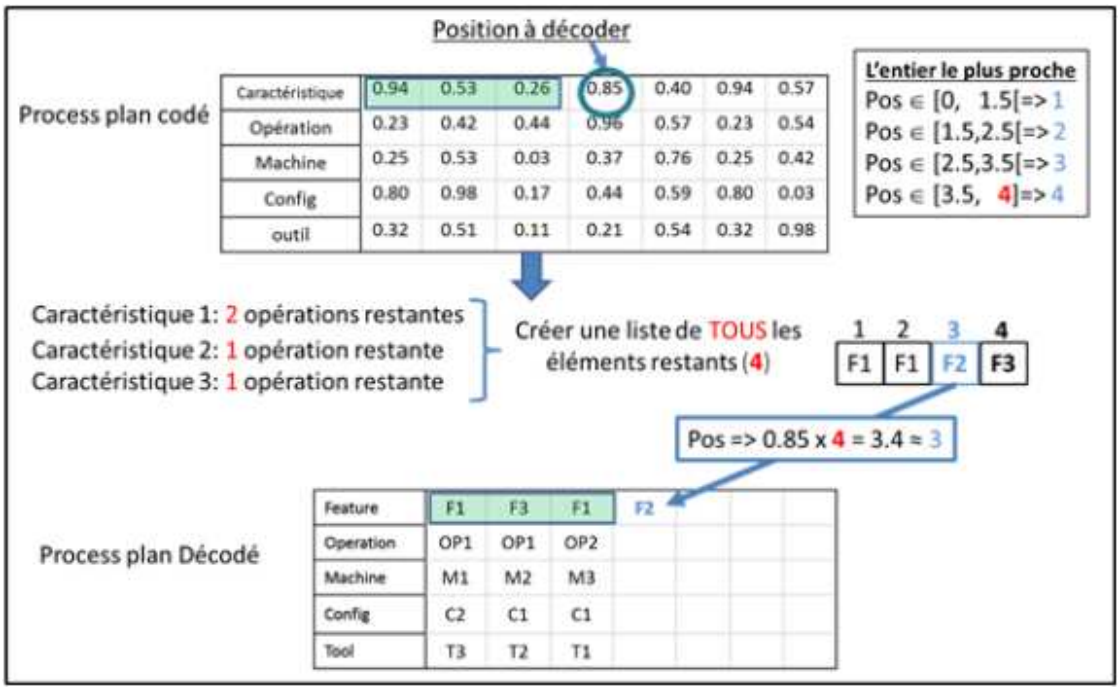



**Figure 3-10 Illustration du processus de décodage (1ère phase)**

### *B. Phase 2 : Déterminer le nombre d'occurrences pour chaque module auxiliaire*

La deuxième phase de décodage concerne la dernière ligne de la gamme de fabrication codée du Tableau 3-2, en se basant sur plusieurs aspects :

- Le nombre des modules auxiliaires distincts (*NuM*).
- Les besoins en modules pour chaque machine $NMODC[AMod_i]$.
- La limite maximale d'occurrence pour chaque module auxiliaire $RefMod[AMod_i]$, défini par le décideur.

$NMODC[AMod_i]$ et $RefMod[AMod_i]$ nous aident à déterminer le nombre des occurrences que le $i^{ème}$ module $AMod_i$ peut y avoir. Ce nombre, noté *Stop_Point*, est égale à $NMODC[AMod_i]$ si $NMODC[AMod_i] < RefMod[AMod_i]$, ou à $RefMod[AMod_i]$ sinon.

La deuxième phase du décodage est réalisée par la procédure décrite comme suit :

1. La valeur réelle dans la case à décoder est multipliée par $2^{NuM}$. Le résultat obtenu de ce produit est ensuite converti en un nombre binaire B1 de taille *NuM* (c'est-à-dire un nombre binaire de *NuM* chiffres).

Par exemple, supposons qu'il existe 6 modules auxiliaires et nous souhaitons décoder la première colonne de la sixième ligne du Tableau 3-2 (0.26). Ainsi, $0.26\times2^6\approx 17$, donc B1 = 010001.

2. Déterminer la relation entre la machine, ses configurations et les modules auxiliaires, en se basant sur la machine décodée ainsi que ses configurations correspondantes dans la même colonne. Cette relation, représentée par la matrice *MCModR,* est définie comme suit : si une machine $M_j$ avec sa configuration correspondante $C_l$ a besoin du $i^{ème}$ module auxiliaire, alors $MCModR[M_j][C_l][AMod_i] = 1$ , sinon $MCModR[M_j][C_l][AMod_i] = 0$.

   En utilisant cette relation, nous créons un second nombre binaire B2 de *NuM* chiffres.

   Par exemple, la machine M1 avec la configuration C1 a besoin de 3 modules auxiliaires parmi 6 modules existants, donc B2 = 110010.

3. Comparer les deux nombres binaires obtenus B1 et B2. La comparaison est réalisée chiffre par chiffre pour décider si le nombre d'occurrences du module auxiliaire sera inchangé (Si $B1[AMod_i] = B2[AMod_i]$), augmenté de 1 (Si $B1[AMod_i] < B2[AMod_i]$) ou diminué de 1 (Si $B1[AMod_i] > B2[AMod_i]$).

La Figure 3-11 présente un exemple illustratif de la deuxième phase du décodage.

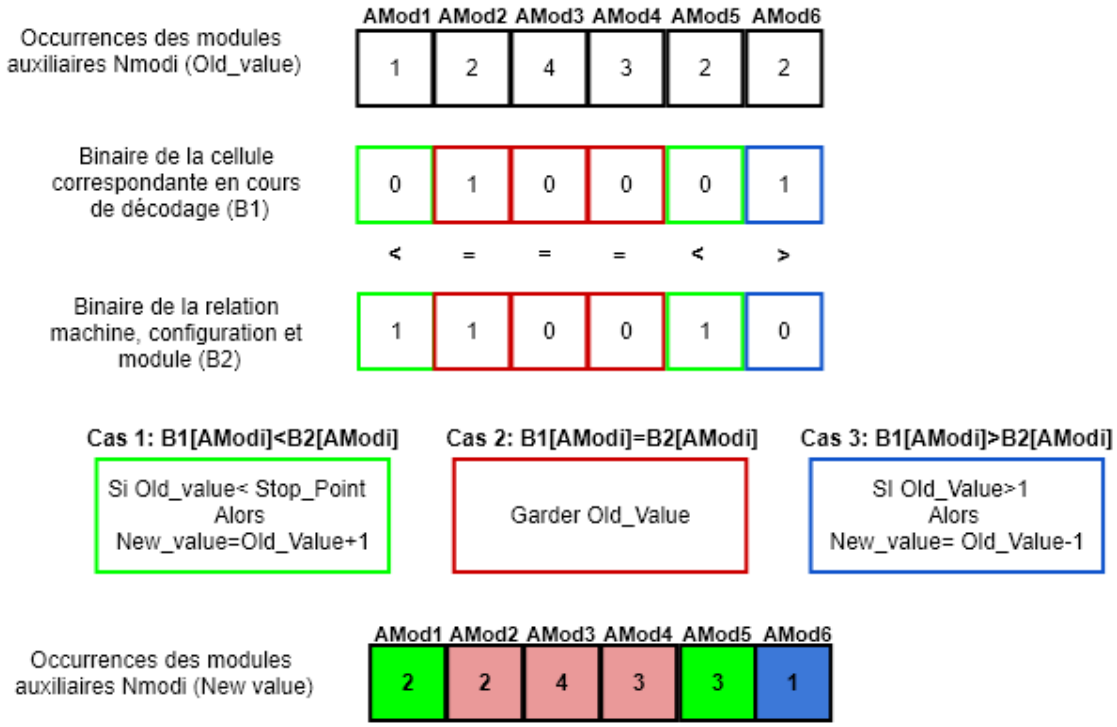



**Figure 3-11 Illustration du processus de décodage des modules (2eme phase)**

### 3.5.3 **Choix des solutions (TOPSIS)**

L'ensemble des solutions non dominées obtenu avec la métaheuristique AMOSA est classé selon les préférences du décideur avec la méthode TOPSIS (*Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution*) proposée par Hwang and Yoon (1993).

La méthode TOPSIS, permet d'attribuer à chaque critère d'optimisation un poids $W_j^*$. Le choix des poids est basé sur les préférences des décideurs et/ou une équipe d'experts, et permet de quantifier l'importance de chaque critère par rapport aux autres critères. TOPSIS suit les étapes décrites ci-dessous :

1. La première étape consiste à créer une matrice d'évaluation NSP × NbO, où NSP représente le nombre des solutions non-dominées (trouvées par AMOSA dans notre cas) et NbO est le nombre de critères considérés (trois critères dans notre cas). L'intersection entre chaque solution et chaque critère est appelée Xij. i = 1, 2, ..., NSP, j = 1, 2, ..., NbO. Une fois la matrice d'évaluation créée nous procédons à sa normalisation en utilisant l'équation (3-20) :

$$Norm_{ij} = \frac{X_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{NSP} X_{ij}^2}} \quad \textbf{(3-20)}$$

2. Par la suit, nous identifions la matrice de décision pondérée et normalisée comme suit :

$$WeightedM_{ij} = Norm_{ij} * W_j \quad \textbf{(3-21)}$$

Avec $W_j = \frac{W_j^*}{\sum_{i=1}^{NO} W_j^*}$ Et $W_j^*$ est le poids initial donné par le décideur

3. Définir les meilleures (SBest) et les pires (SWorst) solutions idéales, Dans notre cas c'est :

$$S_{Best} = \left\{Max\ (WeightedM_{Modularité}), Min(WeightedM_{\text{Coût}}), Min\left(WeightedM_{\text{Temps}}\right)\right\} \quad \textbf{(3-22)}$$

$$S_{Worst} = \left\{Min\ (WeightedM_{Modularité}), Max(WeightedM_{\text{Coût}}), Max\left(WeightedM_{\text{Temps}}\right)\right\} \quad \textbf{(3-23)}$$

4. Nous calculons pour chaque solution non-dominée trouvées sa distance de (SBest) et (SWorst)

$$Dist_{i\ Best} = \sqrt{\sum_{j=1}^{NO}\left(WeightedM_{ij} - WeightedM_{Best\,j}\right)^2} \quad \textbf{(3-24)}$$

$$Dist_{i\,Worst} = \sqrt{\sum_{j=1}^{NO} \left(WeightedM_{ij} - WeightedM_{Worstj}\right)^2} \quad \textbf{(3-25)}$$

5. Nous déterminons par la suite le coefficient de proximité. Ce coefficient est basé sur les meilleures (SBest) et les pires (SWorst) solutions idéales en utilisant l'équation (3-26) :

$$Close_i = \frac{Dist_{i\,Worst}}{(Dist_{i\,Worst} + Dist_{i\,Best})} \quad \textbf{(3-26)}$$

En se basant sur ce coefficient de proximité, nous classons les solutions non-dominées. La meilleure solution est celle qui a le plus grand coefficient de proximité.

## 3.6 Expériences numériques et analyses

Afin de démontrer l'applicabilité de l'approche proposée, nous proposons dans cette section un panel d'expériences numériques permettant d'étudier la problématique de modularité des machines reconfigurables dans la génération des gammes de fabrication et la conception des RMSs. De plus, nous avons analysé les résultats numériques obtenus.

### 3.6.1 Données du problème

Nous considérons un ensemble de dix machines candidates, reconfigurables et modulaires avec une librairie de modules composée de quatre modules de base et six modules auxiliaires (NuM = 6).

Le produit à fabriquer nécessite quatre caractéristiques, qui requièrent respectivement deux, cinq, quatre et trois opérations. La Figure 3-12 présente le graphe de précédences pour la réalisation des quatre caractéristiques.

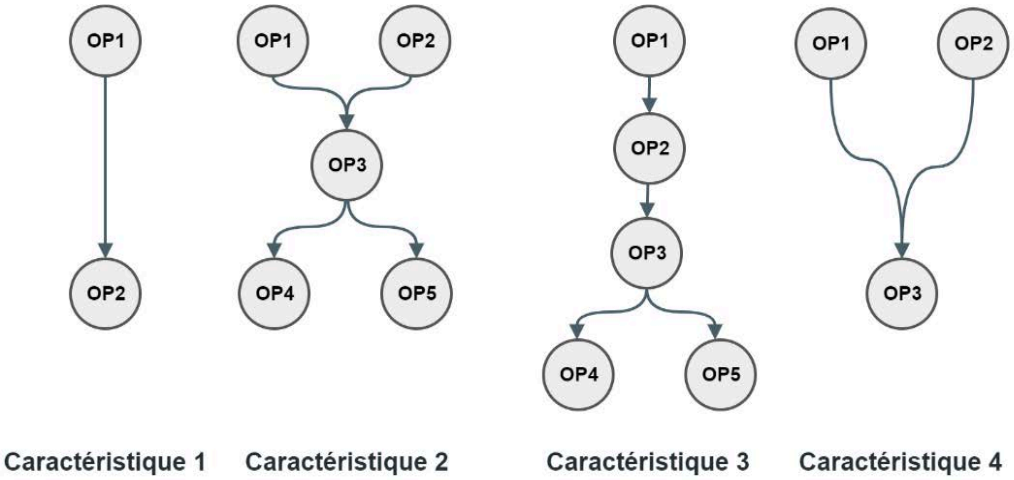



**Figure 3-12 Graphes de précédences des caractéristiques (1), (2), (3) et (4)**

Le Tableau 3-4 détaille les besoins de chaque opération en matière de TAD et de modules (i.e. nombre de modules nécessaires à l'accomplissement de l'opération).

Le

Tableau 3-5, le Tableau 3-6 et le Tableau 3-7 présentent les informations relatives aux outils (coût d'utilisation, temps de changement entre outils, coûts de changement des outils. Nous référons à une unité de temps par (*u.t*) et à une unité monétaire par (*u.m*)

**Tableau 3-4 Besoins des opérations**

| Caractéristique (F) | Opération (Op) | TAD | | | | | | Outil requis | NmodOPu |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | +x | +y | +z | -x | -y | -z | | |
| **F1** | Op1 | X | X | | | | | Outil 1 | 2 |
| | Op2 | | | X | | X | X | Outil 5 | 3 |
| **F2** | Op1 | X | | X | | | | Outil 4 | 3 |
| | Op2 | | | | X | | X | Outil 1 | 3 |
| | Op3 | X | | | | X | | Outil 4 | 2 |
| | Op4 | | | X | | X | X | Outil 5 | 2 |
| | Op5 | X | X | | X | | | Outil 1 | 3 |
| **F3** | Op1 | | X | | X | | X | Outil 1 | 3 |
| | Op2 | | | | X | X | | Outil 5 | 2 |
| | Op3 | X | | | | | X | Outil 1 | 1 |
| | Op4 | | | X | X | | | Outil 5 | 1 |
| | Op5 | | X | | | X | | Outil 2 | 2 |
| **F4** | Op1 | | X | | X | | | Outil 3 | 2 |
| | Op2 | X | | X | | X | | Outil 4 | 3 |
| | Op3 | X | | | X | | | Outil 1 | 1 |

**Tableau 3-5 Spécifications des outils**

| Outils (T) | TADs | | | | | | Coût d'utilisation (*u.m*) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | +x | +y | +z | -x | -y | -z | |
| T1 | X | X | X | X | | X | 8 |
| T2 | | X | | | X | X | 14 |
| T3 | | X | | X | | | 5 |
| T4 | X | | X | | X | | 10 |
| T5 | | | X | X | X | X | 15 |

**Tableau 3-6 Temps de changements entre outils (*u.t*)**

| | **T1** | **T2** | **T3** | **T4** | **T5** |
|---|---|---|---|---|---|
| **T1** | 0 | 59 | 12 | 80 | 70 |
| **T2** | 10 | 0 | 19 | 20 | 15 |
| **T3** | 12 | 18 | 0 | 8 | 15 |
| **T4** | 47 | 15 | 12 | 0 | 20 |
| **T5** | 37 | 10 | 21 | 18 | 0 |

**Tableau 3-7 Coûts de changements entre outils (*u.m*)**

| | **T1** | **T2** | **T3** | **T4** | **T5** |
|---|---|---|---|---|---|
| **T1** | 0 | 6 | 7 | 5 | 8 |
| **T2** | 8.5 | 0 | 6 | 5 | 7.5 |
| **T3** | 2 | 5.5 | 0 | 4.5 | 6 |
| **T4** | 4.5 | 9.5 | 7 | 0 | 3 |
| **T5** | 4 | 8 | 5 | 3 | 0 |

Le Tableau 3-8 et le Tableau 3-9 fournissent les informations relatives aux modules auxiliaires (savoir le temps et le coût de manipulation et le coût d'utilisation) ou de base (le coût d'utilisation pour chacune des 10 machines candidates).

**Tableau 3-8 Modules auxiliaires Coût (*u.m*) / Temps (*u.t*) de manipulation et d'utilisation**

| Modules auxiliaire | A1 | A2 | A3 | A4 | A5 | A6 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Temps de manipulation (U.T) | 9 | 12 | 14 | 6 | 10 | 17 |
| coût de manipulation (U.C) | 0.9 | 1.2 | 1.1 | 0.6 | 1 | 1.3 |
| Coût d'utilisation (*CU/1TU*) | 0.3 | 0.4 | 0.35 | 0.2 | 0.5 | 0.45 |

**Tableau 3-9 Modules de Base : Coût d'utilisation (*u.m/u.t*)**

| | M1 | M2 | M3 | M4 | M5 | M6 | M7 | M8 | M9 | M10 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| B1 | 2.0 | 1.9 | 2 | 2.7 | / | / | / | / | 2.2 | / |
| B2 | 1.5 | / | / | / | / | 2.8 | 1.8 | / | / | 2.6 |
| B3 | / | / | 2.5 | / | 2.5 | 2.4 | / | / | 2 | / |
| B4 | / | 2.9 | / | / | / | / | / | 1.8 | / | / |

Le Tableau 3-10 donne les propriétés des machines candidates (les configurations, les TAD correspondants, les outils, les coûts d'utilisation, les modules de base et les modules auxiliaires nécessaires).

Le Tableau 3-11 détaille les capacités des modules auxiliaires pour répondre aux besoins des opérations communes de la famille de produits. Dans notre cas, nous avons supposé que la famille de produits comporte cinq opérations communes.

**Tableau 3-10 Spécifications des machines candidates**

| Machine | Configuration | TAD | | | | | | *Outils (T)* | Coût d'utilisation (U.C) | Modules de base requis | Modules Modules auxiliaires requis |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | +x | +y | +z | -x | -y | -z | | | | |
| M 1 | C1 | X | | | | X | X | T1, T2, T3, T4, T5 | 50 | B1, B2 | A1, A2, A5 |
| | C2 | X | X | X | X | X | X | | | | A1, A2, A3 |
| | C3 | X | X | | X | | X | | | | A1, A2, A4 |
| M 2 | C1 | X | X | | X | | X | T3. T5 | 20 | B1, B4 | A3, A4 |
| | C2 | X | X | X | X | | | | | | A1, A4 |
| | C3 | | X | | X | | X | | | | A1, A4, A5 |
| | C4 | | | X | X | X | X | | | | A2, A3, A4 |
| M 3 | C1 | | | X | | X | X | T4 | 25 | B1, B3 | A1, A3,A4,A5 |
| | C2 | X | X | X | | X | | | | | A1, A2,A3,A6 |
| M 4 | C1 | X | X | | X | | | T3 | 22 | B1 | A1, A3, A4 |
| M 5 | C1 | X | X | | | X | X | T2 | 30 | B3 | A3, A5, A6 |
| M 6 | C1 | X | X | X | X | | | T3 | 19 | B2, B3 | A2, A3,A4,A5 |
| | C2 | | | | X | | | | | | A2, A3,A1,A6 |
| M 7 | C1 | X | X | | | | | T2 | 26 | B2 | A2, A3, A5 |
| | C2 | | X | | | X | X | | | | A2, A4, A6 |
| M 8 | C1 | X | | | | X | X | T3, T4 | 39 | B4 | A4, A5, A6 |
| | C2 | X | X | X | | X | | | | | A3, A4, A5 |
| | C3 | | X | | X | | X | | | | A3, A4, A6 |
| M 9 | C1 | X | X | | | X | X | T2, T3 | 36 | B1, B3 | A1, A3 |
| | C2 | | X | | X | | | | | | A1, A3, A6 |
| M 10 | C1 | X | X | X | | X | | T3, T4 | 24 | B2 | A1, A2 |
| | C2 | | X | | X | | | | | | A2, A5, A6 |

**Tableau 3-11 Modules auxiliaires requis pour les opérations communes**

| | A1 | A2 | A3 | A4 | A5 | A6 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **COP1** | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| **COP2** | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| **COP3** | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| **COP4** | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| **COP5** | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 |

Le Tableau 3-12 détaille les capacités des machines candidates à réaliser les différentes opérations requises, et dans le cas échéant les temps correspondants.

Les temps et les coûts relatifs aux transferts entre les machines, et aux changements de configuration sont présentés respectivement dans le Tableau 3-13, Tableau 3-14, Tableau 3-15 et le Tableau 3-16.

**Tableau 3-12 Temps de traitement par machine (*u.t*)**

| Caractéristique | Opération | M1 | M2 | M3 | M4 | M5 | M6 | M7 | M8 | M9 | M10 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| F1 | **OP1** | 600 | | | | | | | | | |
| | **OP2** | 700 | 450 | | | | | | | | |
| F2 | **OP1** | 600 | | 420 | | | | | 320 | | 150 |
| | **OP2** | 330 | | | | | | | | | |
| | **OP3** | 800 | | 500 | | | | | 250 | | 350 |
| | **OP4** | 600 | 200 | | | | | | | | |
| | **OP5** | 400 | | | | | | | | | |
| Feature3 | **OP1** | 450 | | | | | | | | | |
| | **OP2** | 600 | 160 | | | | | | | | |
| | **OP3** | 450 | | | | | | | | | |
| | **OP4** | 500 | 300 | | | | | | | | |
| | **OP5** | 550 | | | | 160 | | 200 | | 300 | |
| Feature4 | **OP1** | 650 | 450 | | 160 | | 200 | | 250 | 420 | 290 |
| | **OP2** | 750 | | 260 | | | | | 300 | | 350 |
| | **OP3** | 400 | | | | | | | | | |

**Tableau 3-13 Temps de transfert entre deux machines (*u.t*)**

| | **M1** | **M2** | **M3** | **M4** | **M5** | **M6** | **M7** | **M8** | **M9** | **M10** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **M1** | 0 | 10 | 60 | 18 | 20 | 12 | 15 | 19 | 23 | 28 |
| **M2** | 18 | 0 | 18 | 10 | 25 | 28 | 22 | 18 | 38 | 12 |
| **M3** | 10 | 16 | 0 | 18 | 11 | 20 | 30 | 23 | 11 | 29 |
| **M4** | 60 | 12 | 33 | 0 | 11 | 35 | 22 | 41 | 18 | 51 |
| **M5** | 15 | 30 | 20 | 20 | 0 | 33 | 36 | 27 | 18 | 23 |
| **M6** | 9 | 50 | 11 | 53 | 43 | 0 | 33 | 37 | 18 | 13 |
| **M7** | 19 | 13 | 60 | 26 | 63 | 43 | 0 | 23 | 39 | 30 |
| **M8** | 14 | 25 | 25 | 27 | 13 | 47 | 53 | 0 | 38 | 20 |
| **M9** | 50 | 17 | 28 | 44 | 55 | 23 | 43 | 18 | 0 | 28 |
| **M10** | 33 | 50 | 39 | 34 | 43 | 19 | 12 | 29 | 19 | 0 |

**Tableau 3-14 Temps de changement de configuration (*u.t*)**

| | | **C1** | **C2** | **C3** |
|---|---|---|---|---|
| M1 | **C1** | 0 | 9 | 15 |
| | **C2** | 24 | 0 | 30 |
| | **C3** | 18 | 39 | 0 |

| | | **C1** | **C2** | **C3** | **C4** |
|---|---|---|---|---|---|
| M2 | **C1** | 0 | 45 | 12 | 15 |
| | **C2** | 48 | 0 | 57 | 60 |
| | **C3** | 63 | 30 | 0 | 33 |
| | **C4** | 57 | 27 | 39 | 0 |

| | | **C1** | **C2** |
|---|---|---|---|
| M3 | **C1** | 0 | 45 |
| | **C2** | 30 | 0 |

| | | **C1** | **C2** |
|---|---|---|---|
| M6 | **C1** | 0 | 15 |
| | **C2** | 27 | 0 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| M7 | | **C1** | **C2** |

| | | | |
|---|---|---|---|
| | **C1** | 0 | 30 |
| | **C2** | 36 | 0 |

| M8 | | **C1** | **C2** | **C3** |
|---|---|---|---|---|
| | **C1** | 0 | 45 | 12 |
| | **C2** | 15 | 0 | 24 |
| | **C3** | 60 | 30 | 0 |

| M9 | | **C1** | **C2** |
|---|---|---|---|
| | **C1** | 0 | 21 |
| | **C2** | 36 | 0 |

| M10 | | **C1** | **C2** |
|---|---|---|---|
| | **C1** | 0 | 15 |
| | **C2** | 48 | 0 |

**Tableau 3-15 Coûts de changement de machines (*u.m*)**

| | **M1** | **M2** | **M3** | **M4** | **M5** | **M6** | **M7** | **M8** | **M9** | **M10** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **M1** | 0 | 6 | 10 | 12 | 15 | 17 | 19 | 7 | 14 | 19 |
| **M2** | 7 | 0 | 15 | 10 | 4 | 6 | 13 | 19 | 14 | 11 |
| **M3** | 11 | 19 | 0 | 10 | 15 | 7 | 8 | 17 | 9 | 15 |
| **M4** | 12 | 14 | 20 | 0 | 21 | 11 | 19 | 7 | 9 | 15 |
| **M5** | 16 | 9 | 10 | 13 | 0 | 18 | 12 | 11 | 17 | 13 |
| **M6** | 8 | 5 | 9 | 14 | 5 | 0 | 19 | 7 | 10 | 16 |
| **M7** | 19 | 18 | 12 | 14 | 15 | 13 | 0 | 7 | 8 | 10 |
| **M8** | 14 | 7 | 20 | 12 | 17 | 15 | 19 | 0 | 11 | 13 |
| **M9** | 16 | 11 | 6 | 8 | 13 | 9 | 10 | 7 | 0 | 8 |
| **M10** | 6 | 17 | 11 | 12 | 15 | 19 | 20 | 18 | 14 | 0 |

**Tableau 3-16 Coûts de changement de configuration (*u.m*)**

| M1 | | **C1** | **C2** | **C3** |
|---|---|---|---|---|
| | **C1** | 0 | 3 | 5 |
| | **C2** | 7 | 0 | 9 |
| | **C3** | 6 | 12 | 0 |

| M2 | | **C1** | **C2** | **C3** | **C4** |
|---|---|---|---|---|---|
| | **C1** | 0 | 16 | 5 | 6 |
| | **C2** | 17 | 0 | 19 | 20 |
| | **C3** | 19 | 10 | 0 | 11 |
| | **C4** | 18 | 8 | 13 | 0 |

| M3 | | **C1** | **C2** |
|---|---|---|---|
| | **C1** | 0 | 16 |
| | **C2** | 11 | 0 |

| M6 | | **C1** | **C2** |
|---|---|---|---|
| | **C1** | 0 | 6 |
| | **C2** | 10 | 0 |

| M7 | | **C1** | **C2** |
|---|---|---|---|
| | **C1** | 0 | 11 |
| | **C2** | 13 | 0 |

| M8 | | **C1** | **C2** | **C3** |
|---|---|---|---|---|
| | **C1** | 0 | 16 | 5 |
| | **C2** | 6 | 0 | 9 |
| | **C3** | 21 | 11 | 0 |

| M9 | | C1 | C2 |
|---|---|---|---|
| | **C1** | 0 | 8 |
| | **C2** | 13 | 0 |

| M10 | | C1 | C2 |
|---|---|---|---|
| | **C1** | 0 | 6 |
| | **C2** | 17 | 0 |

### 3.6.2 **Résultats et discussions**

La métaheuristique AMOSA développée dans ce chapitre a été implémentée avec le langage de programmation Java. Le Tableau 3-17 détaille les différents paramètres utilisés pour son adaptation et initialisation. De plus, le processus de recherche s'arrête si aucune amélioration ne survient sur le front de Pareto pendant 3 minutes.

**Tableau 3-17 Paramètres AMOSA**

| Taille d'archive initiale | Taux de perturbation | Taux de refroidissement (Alpha) | Temp. Max | Temp. Min | Soft limit (Sl) | Hard limit (Hl) | Nombre des itérations |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 45% | 95% | 5000 | 1 | 20 | 10 | 1000 |

Les solutions obtenues représentent un ensemble non dominé de gammes de fabrication possibles. Pour chaque gamme obtenue (solution) le Tableau 3-18 détaille l'ensemble des machines sélectionnées, l'ensemble des occurrences des modules auxiliaires, la valeur de l'indicateur de modularité, le temps total et le temps total de fabrication d'une unité du produit considéré.

**Tableau 3-18 Gammes de fabrication générées**

| Solution | Machines sélectionnée | Occurrences des modules auxiliaires | | | | | | Indicateur de modularité | Temps | Coût |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | A1 | A2 | A3 | A4 | A5 | A6 | | | |
| **A** | M1 M2 M3 M4 M7 M8 M10 | 5 | 5 | 4 | 5 | 4 | 2 | 18,99 | 4886 | 66189,85 |
| **B** | M1 M2 M4 M5 M8 M10 | 4 | 3 | 5 | 4 | 4 | 2 | 15,29 | 4865 | 64936,05 |
| **C** | M1 M2 M4 M5 M8 M10 | 4 | 1 | 4 | 1 | 3 | 2 | 11,69 | 4884 | 64775,25 |
| **D** | M1 M2 M4 M5 M8 M10 | 3 | 3 | 3 | 3 | 2 | 2 | 12,32 | 4948 | 64861,35 |
| **E** | M1 M2 M4 M5 M8 M10 | 4 | 4 | 4 | 2 | 2 | 3 | 14,10 | 4886 | 64881,85 |
| **F** | M1 M2 M3 M4 M7 M8 M10 | 5 | 4 | 5 | 5 | 3 | 4 | 19,22 | 5558 | 77170,85 |
| **G** | M1 M2 M3 M4 M5 M8 M10 | 4 | 4 | 5 | 4 | 1 | 1 | 16,39 | 4905 | 65491,25 |
| **H** | M1 M2 M3 M5 M6 M8 M10 | 1 | 4 | 5 | 2 | 2 | 1 | 13,72 | 4852 | 66345,45 |
| **I** | M1 M2 M3 M6 M7 M8 M10 | 2 | 4 | 4 | 4 | 4 | 2 | 15,78 | 4885 | 67072,05 |
| **J** | M1 M2 M3 M6 M7 M8 M10 | 3 | 5 | 5 | 2 | 5 | 3 | 17,53 | 4885 | 67088,65 |
| **K** | M1 M2 M4 M5 M8 M10 | 3 | 5 | 4 | 2 | 3 | 2 | 14,14 | 4865 | 64927,85 |
| **L** | M1 M2 M3 M4 M5 M8 M10 | 4 | 2 | 5 | 3 | 2 | 2 | 14,98 | 4837 | 65425,45 |
| **M** | M1 M2 M4 M5 M8 M10 | 1 | 1 | 3 | 2 | 3 | 2 | 9,51 | 4857 | 64880,05 |
| **N** | M1 M2 M3 M4 M7 M8 M10 | 5 | 4 | 4 | 6 | 1 | 3 | 18,10 | 4926 | 66182,65 |
| **O** | M1 M2 M4 M8 M9 M10 | 4 | 2 | 5 | 4 | 4 | 2 | 14,59 | 5113 | 58097,05 |

| | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **P** | M1 M2 M3 M4 M7 M8 | 4 | 3 | 5 | 2 | 5 | 2 | 15,23 | 5231 | 61411,35 |
| **Q** | M1 M2 M3 M5 M8 M10 | 3 | 2 | 5 | 3 | 2 | 2 | 13,35 | 5023 | 56881,25 |
| **R** | M1 M2 M3 M4 M5 M8 M10 | 5 | 1 | 3 | 1 | 3 | 2 | 12,81 | 4926 | 56601,95 |
| **S** | M1 M2 M3 M7 M8 M10 | 3 | 5 | 3 | 3 | 3 | 1 | 14,31 | 4985 | 58094,65 |
| **T** | M1 M2 M3 M6 M7 M8 M10 | 3 | 6 | 6 | 6 | 1 | 4 | 20,01 | 5119 | 72470,55 |

Pour pouvoir appliquer la technique TOPSIS, nous présentons à travers le Tableau 3-19 les poids initiaux des critères ($W_j^*$) ainsi que la meilleure et la pire solution ($S_{Best}, S_{worst}$) pour chacun des trois critères.

**Tableau 3-19 TOPSIS - Poids des critères**

| | **Les poids initiaux des décideurs** $W_j^*/10$ | $W_j$ | $S_{Best}$ | $S_{worst}$ |
|---|---|---|---|---|
| Indicateur de Modularité | 9.5 | 0.388 | 0,113208618 | 0,053768652 |
| Temps de complétion total | 8 | 0.286 | 0,062119647 | 0,07137916 |
| Coût total | 7 | 0.326 | 0,063711321 | 0,086863735 |

Le Tableau 3-20 illustre le coefficient de proximité de chaque solution non-dominée dans le Tableau 3-18 par rapport au paramètre *SBest* et *Sworst* du Tableau 3-19, ainsi que le classement final pour l'ensemble de ces solutions.

**Tableau 3-20 Classement des solutions avec TOPSIS**

| **Solution** | **Indicateur de modularité** | **Temps** | **Coût** | **Coefficient de proximité** | **Classement TOPSIS** |
|---|---|---|---|---|---|
| **A** | 18,99 | 4886 | 66189,85 | 0,81944595 | 1 |
| **N** | 18,10 | 4926 | 66182,65 | 0,76844058 | 2 |
| **T** | 20,01 | 5119 | 72470,55 | 0,76683948 | 3 |
| **J** | 17,53 | 4885 | 67088,65 | 0,72155016 | 4 |
| **F** | 19,22 | 5558 | 77170,85 | 0,68425525 | 5 |
| **G** | 16,39 | 4905 | 65491,25 | 0,64796938 | 6 |
| **I** | 15,78 | 4885 | 67072,05 | 0,58861962 | 7 |
| **P** | 15,23 | 5231 | 61411,35 | 0,56989883 | 8 |
| **B** | 15,29 | 4865 | 64936,05 | 0,56381511 | 9 |
| **O** | 14,59 | 5113 | 58097,05 | 0,54030719 | 10 |
| **L** | 14,98 | 4837 | 65425,45 | 0,53637734 | 11 |
| **S** | 14,31 | 4985 | 58094,65 | 0,52277315 | 12 |
| **K** | 14,14 | 4865 | 64927,85 | 0,4727631 | 13 |
| **E** | 14,10 | 4886 | 64881,85 | 0,46906223 | 14 |
| **Q** | 13,35 | 5023 | 56881,25 | 0,4610571 | 15 |
| **H** | 13,72 | 4852 | 66345,45 | 0,43170667 | 16 |
| **R** | 12,81 | 4926 | 56601,95 | 0,43055687 | 17 |
| **D** | 12,32 | 4948 | 64861,35 | 0,33579124 | 18 |
| **C** | 11,69 | 4884 | 64775,25 | 0,29984321 | 19 |
| **M** | 9,51 | 4857 | 64880,05 | 0,21527793 | 20 |

En se basant sur les préférences (poids) résumées dans le Tableau 3-19, le classement réalisé par TOPSIS indique que la meilleure solution est celle avec le label A. Pour cette solution, les machines sélectionnées sont : M1, M2, M3, M4, M7, M8 et M10, tandis que les modules auxiliaires retenus sont : A1 (5

exemplaires), A2 (5 exemplaires), A3 (4 exemplaires), A4 (5 exemplaires), A5 (4 exemplaires) et A6 (2 exemplaires). Le Tableau 3-21 présente la gamme de fabrication de cette solution.

**Tableau 3-21 Gamme de fabrication de la meilleure solution de TOPSIS**

| Caractéristique | F3 | F2 | F1 | F2 | F2 | F4 | F2 | F3 | F3 | F1 | F3 | F2 | F3 | F4 | F4 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Opération | OP1 | OP2 | OP1 | OP1 | OP3 | OP1 | OP4 | OP2 | OP3 | OP2 | OP4 | OP5 | OP5 | OP2 | OP3 |
| Machine | M1 | M1 | M1 | M10 | M8 | M4 | M2 | M2 | M1 | M2 | M2 | M1 | M7 | M3 | M1 |
| Configuration | C2 | C2 | C2 | C1 | C2 | C1 | C4 | C4 | C2 | C4 | C4 | C2 | C2 | C2 | C2 |
| Outil | T1 | T1 | T1 | T4 | T4 | T3 | T5 | T5 | T1 | T5 | T5 | T1 | T2 | T4 | T1 |

Nous rappelons que le niveau de modularité du système conçu ne dépend pas uniquement des caractéristiques des machines sélectionnées (configurations et capacités), des similitudes entre ces machines (partage des modules auxiliaires) mais aussi des capacités des modules à répondre aux besoins du produit/famille de produits.

Le Tableau 3-22 détaille les différents aspects de la modularité des solutions 1 et 20.

**Tableau 3-22 Détails de la modularité pour les extrémités de classement TOPSIS**

| Classement TOPSIS | 1 | 20 |
|---|---|---|
| Label | A | M |
| *ComMod* | 4.57 | 4 |
| *SharedMod* | 2.99 | 1.96 |
| *ProdMod* | 22.25 | 9.14 |
| *FamMod* | 2.63 | 1.06 |
| *Diverf* | 0.47 | 0.4 |
| *Nmodi* | 5 5 4 5 4 2 | 1 1 3 2 3 2 |
| *NSM* | 7 | 6 |
| Modularité | 18.99 | 9.51 |

Nous remarquons que la solution 1 possède un niveau de modularité plus important que celui de la solution 20. Cette différence est due à plusieurs raisons :

- Dans la solution 1, la librairie des modules auxiliaires ($Nmod_i$) a une meilleure réponse aux besoins des machines sélectionnées que celle de la solution 20.
- Le nombre des modules communs et le niveau de partage des modules (*ComMod*, *SharedMod*) dans la solution 1 sont plus importants que ceux de la solution 20.
- Dans la solution 1, la composition du système (machines et modules auxiliaires) satisfait au mieux les besoins du produit et de la famille de produits (*ProdMod*, *FamMod*), par rapport à la composition du système définie par la solution 20.

## 3.7 Conclusion

La modularité constitue une des caractéristiques principales des systèmes manufacturiers reconfigurables, qui leur permet d'atteindre un haut niveau de réactivité face aux changements et aléas. Nous avons étudié

dans ce chapitre, le problème de sélection des machines reconfigurables et modulaires, basée sur la génération des gammes de fabrication. L'objectif étant de sélectionner parmi un ensemble de machines candidates, le meilleur sous-ensemble de machines et la meilleure librairie de modules auxiliaires permettant de générer la meilleure gamme de fabrication, de points de vue modularité, coût et temps d'achèvement. Ce problème d'optimisation a été résolu à l'aide d'une adaptation de la métaheuristique recuit simulé multicritères (*Archived Multi-Objective Simulated Annealing* – AMOSA). De plus, nous avons appliqué la technique de décision multicritères TOPSIS (*Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*) pour classer l'ensemble des gammes de fabrications/des solutions du front de Pareto obtenu, selon les préférences du décideur.

Le chapitre suivant est consacré à l'étude de la conception d'un système reconfigurable en prenant en compte les éventuelles indisponibilités des machines reconfigurables et leurs impacts sur les performances du système. En effet, il ne suffit pas d'accroître les capacités des machines reconfigurables (comme celles relatives à la modularité), mais il faut aussi gérer au mieux les relations entre ces machines, pour permettre au système global de réagir efficacement face aux indisponibilités et aux éventuels aléas.

# 4 Chapitre 4 : Prise en compte des contraintes d'indisponibilité des machines à outils reconfigurable (RMTs) lors de la conception d'un RMS

Ce chapitre aborde le problème de prise en compte explicite des contraintes d'indisponibilité des machines à outils reconfigurable (RMTs) et leurs interactions lors de la conception d'un RMS. En effet, les indisponibilités des machines ont des influences certaines sur les choix des RMTs entrant dans la conception du système. Dans un premier temps, nous proposons trois nouveaux indicateurs de performance respectivement (i) l'indicateur de flexibilité, (ii) l'indicateur de robustesse et (iii) une amélioration de l'indicateur de robustesse afin de choisir les meilleures gammes de fabrication. Chaque indicateur, en plus du critère relatif au temps total d'achèvement, est associé à un problème d'optimisation multicritère. Nous proposons trois modèles mathématiques guidés par l'un des indicateurs de performance proposés. Dans un deuxième temps, et pour résoudre les deux premiers problèmes d'optimisation multicritère, des adaptations de la métaheuristique NSGA-II sont proposées et la méthode TOPSIS est utilisée par la suite pour sélectionner la meilleure gamme de fabrication. Pour terminer, une méthode hybride combinant NSGA-II et une heuristique spécifique est proposée pour traiter le troisième problème multicritère. Des exemples illustratifs sont présentés pour démontrer l'applicabilité des trois approches de résolution (deux adaptations de NSGA-II et une méthode hybride combinant NSGA-II et une heuristique spécifique).

## 4.1 Introduction

La réactivité des systèmes de production est de plus en plus un élément critique dans un contexte économique de plus en plus globalisé. En effet, le contexte économique actuel est caractérisé par des changements très fréquents et imprévisibles, amplifiés par plusieurs facteurs tels que la personnalisation de masse, les évolutions sociales et technologiques, des produits et des technologies avec des cycles de vie de plus en plus courts.

Dans ce contexte, selon Koren (2013), l'une des clés de la réactivité réside dans l'aptitude du système à ajuster sa capacité de production. En effet, cet ajustement est possible grâce à deux types de reconfigurations possibles du système. Il s'agit de l'aptitude d'ajustement de la fonctionnalité et l'aptitude d'ajustement de la capacité de production. Dans un environnement reconfigurable, cette réactivité est rendue possible grâce aux machines reconfigurables, qui offrent des flexibilités personnalisées avec des variétés de fonctionnalités alternatives.

Comme nous l'avons signalé dans notre état de l'art dédié aux RMSs (chapitre 2), l'intégration de la reconfigurabilité est réalisée à travers l'intégration de ses caractéristiques clés dans la phase de conception. En effet, de nombreux travaux considèrent cette intégration en étudiant les indicateurs de performance des RMSs (Goyal *et al*. 2013, Mittal *et al.* 2014, Dahane et Benyoucef 2016). Néanmoins, à travers notre étude de l'état l'art et à notre connaissance très peu de travaux ont considéré l'indisponibilité des machines dans un contexte reconfigurable.

Ce chapitre traite le problème de la prise en compte des incertitudes liées aux indisponibilités des machines reconfigurables, impactant la réactivité du système. L'idée est de définir des indicateurs de performance permettant d'évaluer la flexibilité et la robustesse du système afin de concevoir un système avec des capacités de réactivité permettant de pallier à ces indisponibilités. *Cette réactivité permet de trouver des solutions alternatives au système en ayant recours uniquement aux machines présentes, avec le moins de perturbations possibles de la gamme de fabrication générée*.

Plus précisément, nous proposons trois nouveaux indicateurs de performance respectivement (i) l'indicateur de flexibilité, (ii) l'indicateur de robustesse et (iii) une amélioration de l'indicateur de robustesse afin de choisir les meilleures gammes de fabrication. Chaque indicateur, en plus du critère relatif au temps total d'achèvement, est associé à un problème d'optimisation multicritère. Nous décrivons le modèle mathématique associé à chaque problème d'optimisation multicritère. De plus, pour résoudre les deux premiers problèmes d'optimisation multicritère, des adaptations de la métaheuristique NSGA-II sont proposées et la méthode TOPSIS est utilisée pour sélectionner la meilleure gamme de fabrication. Pour

terminer, une méthode hybride combinant NSGA-II et une heuristique spécifique est proposée pour traiter le troisième problème d'optimisation multicritère.

## 4.2 Description du problème

Le problème étudié dans ce chapitre est basé sur les mêmes hypothèses posées dans le chapitre 3. Il consiste à concevoir un nouveau RMS, en sélectionnant parmi un ensemble de machines reconfigurables candidates, *NSM* machines $M_j$ ( $j = 1 \ldots NSM$) capables d'accomplir les opérations nécessaires pour la fabrication d'un produit précis. Chaque machine candidate doit pouvoir réaliser au moins une opération parmi l'ensemble des opérations. L'ensemble des machines sélectionnées doit être capable de satisfaire les besoins de toutes les opérations requises.

Comme pour le chapitre 3, nous nous plaçons dans le cas d'une seule unité du produit caractérisée par un ensemble de *N* caractéristiques, nécessitant chacune la réalisation d'une ou plusieurs opérations $OP_u^k$ ($u = 1 \ldots NOPF_k$ , $k = 1, \ldots N$). Les différentes opérations sont reliées entre elles par des contraintes de précédences.

La structure de la gamme de fabrication est proche de celle utilisée dans le chapitre 3. En effet, dans notre cas, nous ne considérons pas les modules relatifs aux configurations des machines. La gamme de fabrication ne comprend que les éléments relatifs aux caractéristiques, aux machines, aux configurations de machine et aux outils. Chaque machine offre un ensemble de configurations et de fonctionnalités différentes. De plus, la réalisation de chaque opération nécessite des TADs spécifiques $OPTAD_j[OP_u^k][6]$ et des outils particuliers $RTOP[OP_u^k]$. L'*objectif consiste à identifier les séquencements (les associations machines – configurations – opérations-outil) qui constituent la gamme de fabrication.*

*Dans un premier temps, nous nous plaçons dans le cas où nous cherchons à identifier la sélection des machines sur la base de deux critères à savoir, la minimisation du temps d'achèvement* ($f_{time}$) *et la maximisation de l'indicateur de flexibilité* ($f_{Flexibilité}$). *L'indicateur de flexibilité permet d'évaluer le nombre de solutions alternatives (possibilités au sein de la gamme de fabrication) que l'ensemble des machines sélectionnées est en mesure de garantir pour remédier à l'indisponibilité des machines*.

Nous utilisons les mêmes notations et quasiment la même formulation mathématique, que dans le chapitre 3. Les équations détailler dans cette formulation mathématique seront utilisées par la suite pour évaluer les différentes gammes de fabrication (séquencement et association des variables de décision) générées par notre approche (section 4.4) afin de pouvoir choisir les meilleures gammes de fabrication. De plus, pour une meilleure compréhension du problème étudié, nous présentons ci-dessous un exemple illustratif.

**Exemple illustratif**

Le produit considéré est composé de deux caractéristiques, comportant respectivement 2 et 3 opérations. Le Tableau 4-1 détaille les capacités des machines potentielles pour réaliser les différentes opérations.

**Tableau 4-1 Exemple illustratif : relations caractéristiques – opérations – machines**

| Caractéristiques | Opérations | Machines possibles |
|---|---|---|
| **F1** | Op1 | M3 |
| | Op2 | M1/ M4 |
| **F2** | Op3 | M1/ M3/ M4 |
| | Op4 | M1/ M2/ M4 |
| | Op5 | M1/ M2/ M3 |

La gamme de fabrication retenue est illustrée par la Figure 4-1.

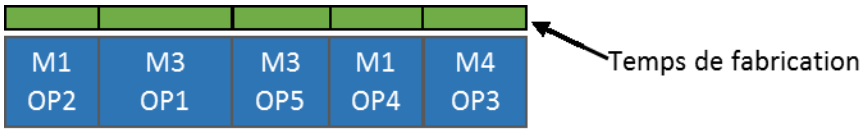



**Figure 4-1 Gamme de fabrication générée**

Comme nous pouvons le voir, la séquence d'opérations présentée par la Figure 4-1 sera réalisée pendant une période de temps finie équivalente au temps d'achèvement donné par la gamme de fabrication, si toutes les machines sont disponibles aux instants de début de réalisation des différentes opérations. Cette situation peut être compromise par l'indisponibilité d'une machine, due à plusieurs causes, telles que la réalisation d'une autre opération d'un autre produit, le partage de ressources entre les machines (comme les outils), les erreurs de manipulation, les défaillances, …

La Figure 4-2 illustre une situation d'indisponibilité de la machine M3 à la troisième position de la gamme de fabrication, c'est-à-dire M3 n'est pas disponible pour réaliser l'opération OP5 (les deux premières opérations OP2 et OP1 sont bien réalisées). Notons $P$ la position courante dans la réalisation de la gamme de fabrication. Dans notre cas, $P = 3$ (Figure 4-2).




**Figure 4-2 Indisponibilité de la machine M3**

Pour remédier à ce problème d'indisponibilités des machines, notre démarche consiste à trouver des alternatives dans la gamme de fabrication. Nous proposons deux solutions possibles :

1. Une première solution revient à chercher une machine de remplacement parmi les machines sélectionnées et disponibles (Figure 4-3). Il est possible de vérifier sur le Tableau 4-2, que l'opération OP5 peut être réalisée par deux autres machines M1 et M2. Cependant, la machine M2 n'a pas été sélectionnée dans la gamme de fabrication, donc seule M1 peut remplacer la machine indisponible M3 (Figure 4-3).

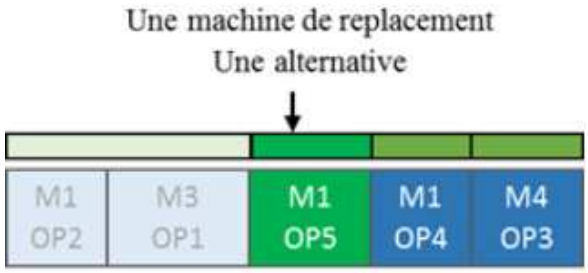



**Figure 4-3 Machine de remplacement**

2. Une deuxième solution consiste à différer le plus tard possible la réalisation de l'opération (ou les opérations) concernées par la machine indisponible. Ce décalage est possible tant que les relations de précédences le permettent, et vise à attendre que la machine redevienne disponible tout en poursuivant la réalisation de la gamme de fabrication. Dans cet exemple, nous observons que l'opération "bloquée" OP5 peut être retardée après les opérations OP4 et OP3. Il s'agit de deux alternatives possibles pour éviter l'arrêt total de la fabrication (Figure 4-4).




**Figure 4-4 Report des opérations**

## 4.3 Formulation mathématique

Rappelons que cette formulation mathématique est dédiée à notre premier problème d'optimisation multicritère où nous cherchons à minimiser de temps total d'achèvement ($f_{time}$) et à maximiser l'indicateur de flexibilité ($f_{Flexibilité}$) pour sélectionner les meilleures gammes de fabrication. Nous cherchons à accroître le niveau de réactivité de notre système reconfigurable face aux aléas internes relatifs aux

machines en augmentant le nombre d'alternatives (solutions) permettant de pallier à chaque indisponibilité. Ces alternatives sont basées sur :

- L'utilisation d'une autre machine.
- Le report des opérations concernées.
- La variété et la diversité de l'ensemble des machines sélectionnées pour accomplir la gamme de fabrication.

### 4.3.1 Temps total d'achèvement

En adaptant les expressions des temps développées dans le chapitre 3, les différents temps composant le temps total de fabrication peuvent être exprimés comme suit :

#### *A. Temps total de traitement des opérations*

Il représente le temps total nécessaire pour que l'ensemble des machines $M_j$ sous leurs configurations $C_l^j$ puissent réaliser l'ensemble des opérations $OP_u^k$. Son expression est donnée par l'équation (4-1).

$$PrT = \sum_{k=1}^{N} \sum_{u=1}^{NF_k} PrTime\left[M_j(OP_u^k)\right]\left[C_l^j(OP_u^k)\right] \quad \textbf{(4-1)}$$

Nous rappelons que ce temps dépend du type de l'opération, du type et de la configuration de la machine utilisée comme suit : $PrTime\left[M_j(OP_u^k)\right]\left[C_l^j(OP_u^k)\right]$

#### *B. Temps total de changement d'outils*

Il représente le temps total nécessaire pour l'ensemble des changements requis pour la réalisation d'un produit. Il est exprimé par l'équation (4-2) :

$$TCT = \sum_{u=1}^{OPTN} TcTime[T_r(OP_u)][T_{r'}(OP_{u'})] \quad \textbf{(4-2)}$$

avec : $u' = min\ (u_k)$, $u < u_k < OPTN$, $k = 1, \ldots OPTN$

#### *C. Temps total de changement de configurations*

Ce temps représente la somme de tous les temps de changements individuels de configurations des machines pour réaliser le produit comme formulé par l'équation (4-3) :

$$CCT = \sum_{u=1}^{OPTN} CCTime\left[C_l^j(OP_u)\right]\left[C_{l'}^j(OP_{u'})\right] \quad \textbf{(4-3)}$$

Comme nous pouvons le voir, ce temps dépend du type de la machine et de ses deux configurations (actuelle et cible) donnée par $CCTime\left[C_l^j(OP_u)\right]\left[C_{l'}^j(OP_{u'})\right]$,

avec : $u' = min\ (u_k)$, $u < u_k < OPTN$, $k = 1, \ldots OPTN$

***D. Temps total de transfert***

Ce temps représente l'ensemble des temps nécessaires pour transférer le produit d'une machine vers une autre. Il est exprimé par l'équation (4-4) suivante :

$$MCT = \sum_{u=1}^{OPTN} MCTime\left[M_j(OP_u)\right]\left[M_{j'}(OP_{u'})\right] \quad \textbf{(4-4)}$$

En se basant sur les équations (4-1), (4-2), (4-3) et (4-4), nous visons à minimiser le temps total d'achèvement donné par l'équation (4-5):

$$Min\{f_{Time}\} = PrT + TCT + CCT + MCT \quad \textbf{(4-5)}$$

### 4.3.2 Indicateur de flexibilité

L'indicateur de flexibilité permet d'évaluer le nombre d'alternatives pour faire face aux éventuelles indisponibilités des machines reconfigurables. Il s'agit d'estimer pour chaque opération de la gamme de fabrication, les alternatives possibles à l'indisponibilité de la machine qui la réalise. L'expression de l'indicateur de flexibilité est basée sur les trois concepts suivants :

1. Le nombre de machines capables de remplacer la machine indisponible pour accomplir une opération spécifique $OP_u$ comme indiqué par l'équation (4-6) :

$$MOP = \sum_{u=1}^{OPTN} \left[ \left( \sum_{j=1}^{Nsm} M_j(OP_u) \right) - 1 \right] \quad \textbf{(4-6)}$$

avec :

$$M_j(OP_u) = \begin{cases} 1, & \text{Si la machine M}j \text{ peut accomplir l'opération } u \\ 0, & Sinon \end{cases}$$

2. Le nombre d'opérations qui peuvent être anticipées avant l'opération courante bloquée à cause de l'indisponibilité d'une machine. Il s'agit de retarder l'opération bloquée pour pouvoir réaliser toutes les opérations tant que les contraintes de précédences sont respectées :

$$NOPP = \sum_{p=1}^{OPTN} \left| P - \left( \sum_{u=1}^{OPTN} \sigma \times PRM\left[OP_p\right]\left[OP_u\right] \right) \right| \quad \textbf{(4-7)}$$

avec :

$$PRM[OP_p][OP_u] = \begin{cases} 1 & \text{Si } OP_p \text{ précède } OP_u \\ 0 & \text{Sinon} \end{cases}$$

et

$$\sigma = \begin{cases} 0 & \text{Si } M_j(OP_p) = M_B(OP_u) \text{ et } B \neq j, \forall B \in (1..NSM), M_B(OP_u) = 0 \\ 1 & \text{Sinon} \end{cases}$$

3. La diversité des machines sélectionnées pour accomplir les différentes opérations (notée *Diverf*) est très importante pour éviter la dépendance de la gamme de fabrication envers quelques machines. En effet, une machine peut réaliser plusieurs opérations de la gamme générée, ce qui rend son indisponibilité très critique, car provoquant le blocage de plusieurs opérations. Le facteur de diversité *Diverf* représente la proportion d'utilisation de la machine par rapport au nombre total de machines sélectionnées. Le meilleur scénario est lorsque chaque machine sélectionnée réalise une opération de la gamme de fabrication. L'expression du facteur *Diverf* est donnée par l'équation (4-8) :

$$Diverf = \sum_{j=1}^{NSM} \frac{\sum_{u=1}^{OPTN} M_j(OP_u)}{NSM} \quad \textbf{(4-8)}$$

En se basant sur les équations (4-6), (4-7) et (4-8), notre deuxième critère à maximiser est donné par l'équation (4-9)

$$Max\{f_{flexibility}\} = \frac{MOP + NOPP}{Diverf} \quad \textbf{(4-9)}$$

Notre problème d'optimisation est soumis aux mêmes contraintes détaillées dans le chapitre 3 (section 3.4.4).

## 4.4 Approche proposée

Pour résoudre notre premier problème d'optimisation multicritère, nous avons opté pour une adaptation d'un algorithme évolutionnaire multicritère appelé NSGA-II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II) développé par Deb *et al.*, (2002). L'algorithme 2 détaille le pseudocode du NSGA-II.

**Algorithme 2 Pseudocode du NSGA-II**

```
Initialiser (nouvelle_Population, i)
Taille de population N
Répéter
        T = Tri-Rapide-nondominé (nouvelle_Population)
        Population_Parent = ∅
        {remplir la population_ parent}
Tant que | Population_Parent | < N
        T = affectation-crowding-distance (T)
        Population_Parent = Population_Parent + T
Fin Tant que
    Trier (Population_Parent, Operateur-crowded comparaison)
    Population_Parent = les premiers N élément dans Population_Parent
// {Utiliser les opérateurs génétiques pour créer une nouvelle population enfant}
    Population_Enfant=CréerNouvellePopulation(Population_Parent)
    Nouvelle_Population= Population_Parent ∪ Population_Enfant //taille de la nouvelle population est 2N
    i=i+1
Jusqu'à (I ≥ nombre d'itérations)
```

La *Tri-Rapide-nondominé (),* permet de trier la population en fonction de la non-dominance sous forme de front. Cette dominance est obtenue en se basant sur les équations (4-5) et (4-9) pour l'évaluation des solutions générées (gammes de fabrication). Le pseudocode de cette fonction est détaillé dans l'Algorithme 3.

**Algorithme 3 Pseudocode Tri-Rapide-nondominé**

```
Pour Chaque p ϵ Population
        Pour Chaque q ϵ Population
                Si (p domine q) Alors
                        Sp= Sp ∪ {q}
                Sinon
                        Si (p domine q) Alors Np= Np+1
                FinSi
        FinPour
        Si Np=0 Alors F1= F1 ∪ {p}
FinPour
I=1
Tant que F1≠∅
        H=∅
        Pour Chaque p ϵ F1
                Pour Chaque q ϵ Sp
                        Nq=Nq-1
                        Si Nq=0 Alors H=H∪ {q}
                FinPour
        FinPour
```

```
        I=i+1
        F1=H
FinTantque
```

La fonction *affectation-crowding-distance()* permet à l'algorithme NSGA-II d'avoir une sélection uniforme des solutions non dominées dans l'espace de recherche. La fonction utilise l'ensemble des critères à optimiser pour affecter cette distance. L'Algorithme 4 décrit le pseudocode de cette fonction.

**Algorithme 4 Pseudocode Affectation-crowding-distance**

```
Nb=|I| //nombre de solution sur le front I
Pour Chaque i ϵ I
        I[i]distance=0
Finpour
Pour Chaque critère n
        I= Trier (I, n) // Trier selon la valeur du critère n
        I[1]distance= ∞
        I[nb]distance= ∞
        Pour i allant de 2 jusqu'à nb-1
                I[i]distance= I[i]distance+( I[i].n- I[i-1].m)
        FinPour
FinPour
```

Tout comme AMOSA (voir chapitre 3), lors de l'implémentation d'un algorithme évolutionnaire, il faut bien choisir la méthode de codage vu que l'ensemble des solutions (gammes de fabrication dans notre cas) sera forcément modifié au cours du processus d'évolution de la population. Pour cette raison, nous reprenons les mêmes principes de codage d'une gamme de fabrication utilisée dans le chapitre 3. En effet, nous utilisons les nombres réels pour coder nos gammes de fabrication représentées par des matrices 5xN, où N représente le nombre total d'opérations à réaliser. Lors de la phase d'initialisation de l'algorithme génétique NSGA-II, nous générons une solution codée de façon aléatoire (suivant une distribution uniforme des nombres entre 0 et 1). Par la suite, le processus d'évolution du NSGA-II explorera et générera les solutions nécessaires jusqu'à obtenir la meilleure solution ou atteindre la condition d'arrêt. À chaque génération, nous procédons au décodage afin de déterminer les machines sélectionnées et d'évaluer les qualités des solutions décodées en fonction des deux critères à optimiser. Pour le décodage des solutions, nous reprenons la procédure de décodage décrite dans le chapitre 3 (Section 3.5.2).

## 4.5 Expérience numérique

À travers cette section, nous présentons une expérience numérique permettant d'illustrer notre première adaptation de l'algorithme évolutionnaire NSGA-II.

### 4.5.1 Données du problème

Nous considérons un ensemble de dix machines candidates, ayant chacune plusieurs configurations dans une perspective de fabriquer un produit de trois caractéristiques. La Figure 4-5 illustre les opérations nécessaires pour chaque caractéristique ainsi que les contraintes de précédences qui régissent la réalisation de ces opérations.

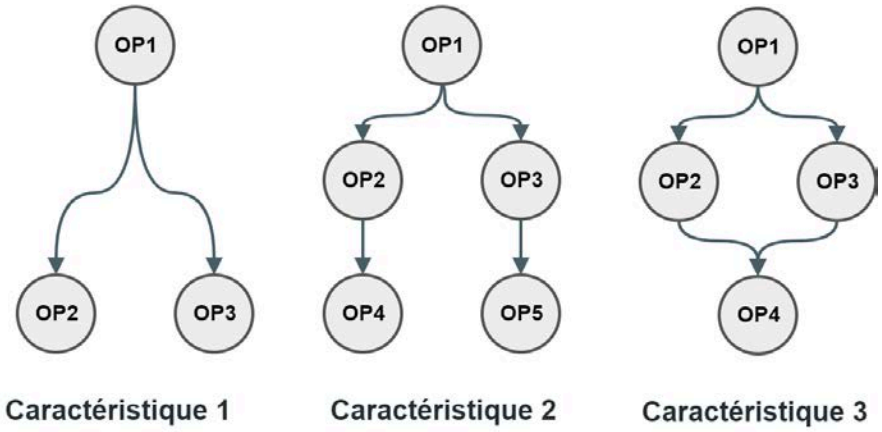



**Figure 4-5 Graphes de précédence des caractéristiques (1), (2) et (3)**

Le Tableau 4-2 détaille les besoins de chaque opération en matière de TADs et d'outils. Le Tableau 4-3 et le

Tableau 4-4 présentent respectivement les spécifications des outils et celles des machines candidates.

**Tableau 4-2 Besoins des opérations**

| Caractéristique (F) | Opération (Op) | TAD | | | | | | Outil requis |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | +X | +Y | +Z | -X | -Y | -Z | |
| F1 | Op1 | X | X | | | | | Outil 1 |
| | Op2 | | | | | X | X | Outil 2 |
| | Op3 | X | | | | | | Outil 4 |
| F2 | Op1 | | X | | | | | Outil 1 |
| | Op2 | | | | | X | X | Outil 2 |
| | Op3 | | X | | | | | Outil 3 |
| | Op4 | X | | | | X | | Outil 4 |
| | Op5 | | | X | X | | | Outil 1 |
| F3 | Op1 | | | X | | | | Outil 1 |
| | Op2 | | X | | | | | Outil 2 |
| | Op3 | | | | X | | | Outil 3 |
| | Op4 | X | | X | | | | Outil 4 |

**Tableau 4-3 Spécifications des outils**

| Outils (T) | TADs | | | | | | Temps de changements entre outils (*ut*) | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | +X | +Y | +Z | -X | -Y | -Z | T1 | T2 | T3 | T4 |
| T1 | X | X | X | X | | X | **0** | **59** | **12** | **80** |
| T**2** | | X | | | X | X | **10** | **0** | **19** | **20** |
| T**3** | | X | | X | | | **12** | **18** | **0** | **8** |
| T**4** | X | | X | | X | | **47** | **15** | **12** | **0** |

**Tableau 4-4 Spécifications des machines candidates**

| **Machine** | **Configuration** | **TAD** | | | | | | ***Outils (T)*** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | **+X** | **+Y** | **+Z** | **-X** | **-Y** | **-Z** | |
| M 1 | C1 | X | | | | X | X | T1, T2, T3, T4 |
| | C2 | X | X | X | X | X | X | |
| | C3 | X | X | | X | | X | |
| M 2 | C1 | X | X | | X | | X | T3. |
| | C2 | X | X | X | X | | | |
| | C3 | | X | | X | | X | |
| | C4 | | | X | X | X | X | |
| M 3 | C1 | | | X | | X | X | T4 |
| | C2 | X | X | X | | X | | |
| M 4 | C1 | X | X | | | X | | T3 |
| M 5 | C1 | X | X | | | X | X | T2 |
| M 6 | C1 | X | X | X | X | | | T3 |
| | C2 | | | | X | | | |
| M 7 | C1 | X | X | | | | | T2 |
| | C2 | | X | | | X | X | |
| M 8 | C1 | X | | | | X | X | T3, T4 |
| | C2 | X | X | X | | X | | |
| | C3 | | X | | X | | X | |
| M 9 | C1 | X | X | | | X | X | T2, T3 |
| | C2 | | X | | X | | | |
| M 10 | C1 | X | X | X | | X | | T3, T4 |
| | C2 | | X | | X | | | |

Le Tableau 4-5, Tableau 4-6 et Tableau 4-7 présentent les temps de traitement de chaque opération par les différentes machines potentielles ainsi que les temps des transferts et les temps de reconfigurations des machines.

**Tableau 4-5 Temps de traitement (*u.t*)**

| **Caractéristique** | Opération | M1 | M2 | M3 | M4 | M5 | M6 | M7 | M8 | M9 | M10 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **F1** | **OP1** | 500 | | | | | | | | | |
| | **OP2** | 700 | | | | 350 | | 200 | | 455 | |
| | **OP3** | 600 | 420 | | | | X | | 200 | | 150 |
| F2 | **OP1** | 330 | | | | | | | | | |
| | **OP2** | 400 | | | | 250 | | 350 | | 100 | |

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | **OP3** | 600 | 200 | 150 | 300 | 320 | 290 | 400 |
| | **OP4** | 400 | 160 | | | 200 | | 100 |
| | **OP5** | 200 | 150 | | 100 | | | |
| F3 | **OP1** | 199 | | | | | | |
| | **OP2** | 750 | | | 300 | 250 | 100 | |
| | **OP3** | 500 | 450 | 250 | 300 | 320 | 290 | 400 |
| | **OP4** | 550 | 160 | | | 200 | | 250 |

**Tableau 4-6 Temps de transfert entre deux machines (*u.t*)**

| | **M1** | **M2** | **M3** | **M4** | **M5** | **M6** | **M7** | **M8** | **M9** | **M10** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **M1** | 0 | 10 | 60 | 18 | 20 | 12 | 15 | 19 | 23 | 28 |
| **M2** | 18 | 0 | 18 | 10 | 25 | 28 | 22 | 18 | 38 | 12 |
| **M3** | 10 | 16 | 0 | 18 | 11 | 20 | 30 | 23 | 11 | 29 |
| **M4** | 60 | 12 | 33 | 0 | 11 | 35 | 22 | 41 | 18 | 51 |
| **M5** | 15 | 30 | 20 | 20 | 0 | 33 | 36 | 27 | 18 | 23 |
| **M6** | 9 | 50 | 11 | 53 | 43 | 0 | 33 | 37 | 18 | 13 |
| **M7** | 19 | 13 | 60 | 26 | 63 | 43 | 0 | 23 | 39 | 30 |
| **M8** | 14 | 25 | 25 | 27 | 13 | 47 | 53 | 0 | 38 | 20 |
| **M9** | 50 | 17 | 28 | 44 | 55 | 23 | 43 | 18 | 0 | 28 |
| **M10** | 33 | 50 | 39 | 34 | 43 | 19 | 12 | 29 | 19 | 0 |

**Tableau 4-7 Temps de changement de configuration (ut)**

M1

| | **C1** | **C2** | **C3** |
|---|---|---|---|
| **C1** | 0 | 3 | 5 |
| **C2** | 8 | 0 | 10 |
| **C3** | 6 | 13 | 0 |

M2

| | **C1** | **C2** | **C3** | **C4** |
|---|---|---|---|---|
| **C1** | 0 | 15 | 4 | 5 |
| **C2** | 16 | 0 | 19 | 20 |
| **C3** | 21 | 10 | 0 | 11 |
| **C4** | 19 | 9 | 13 | 0 |

M3

| | **C1** | **C2** |
|---|---|---|
| **C1** | 0 | 15 |
| **C2** | 10 | 0 |

M6

| | **C1** | **C2** |
|---|---|---|
| **C1** | 0 | 5 |
| **C2** | 9 | 0 |

M7

| | **C1** | **C2** |
|---|---|---|
| **C1** | 0 | 10 |
| **C2** | 12 | 0 |

M8

| | **C1** | **C2** | **C3** |
|---|---|---|---|
| **C1** | 0 | 15 | 4 |
| **C2** | 5 | 0 | 8 |
| **C3** | 20 | 10 | 0 |

M9

| | **C1** | **C2** |
|---|---|---|
| **C1** | 0 | 7 |
| **C2** | 12 | 0 |

M10

| | **C1** | **C2** |
|---|---|---|
| **C1** | 0 | 5 |
| **C2** | 16 | 0 |

### 4.5.2 **Résultats et discussions**

Le Tableau 4-8 résume les différents paramètres utilisés pour l'adaptation et l'initialisation de la métaheuristique NSGA-II.

**Tableau 4-8 Paramètres NSGA-II**

| Taille de la population | Taux de croisement | Taux d'élitisme | Taux de mutation | Taux aléatoire | Critères d'arrêt | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | Nombre d'itérations max | Absence d'amélioration |
| 30 | 80% | 10% | 5% | 5% | 100 | 3min |

Les résultats obtenus par l'application du NSGA-II est un ensemble de solutions non dominées (Tableau 4-9), où chaque solution représente une gamme de fabrication complète. Les machines sélectionnées dans chaque gamme (solution) ainsi que les performances de la gamme (*i.e.* temps d'achèvement total et niveau de flexibilité) sont présentées dans le Tableau 4-9.

**Tableau 4-9 Résultats du NSGA-II : les machines sélectionnées**

| Label Solution | Machines sélectionnées | Indicateur flexibilité | Temps |
|---|---|---|---|
| **A** | M1 M7 M9 M10 | 22.66 | 2767 |
| **B** | M1 M2 M5 M7 M8 M9 M10 | 45.50 | 3522 |
| **C** | M1 M3 M5 M6 M7 M8 | 35 | 2823 |
| **D** | M1 M3 M5 M6 M7 M9 | 43.16 | 2972 |
| **E** | M1 M2 M3 M5 M6 M7 M8 M9 | 52 | 3587 |
| **F** | M1 M5 M6 M7 M8 M9 M10 | 44.91 | 3467 |
| **G** | M1 M3 M5 M6 M7 M9 M10 | 44.33 | 3131 |
| **H** | M1 M2 M3 M7 M8 M9 | 36 | 2927 |

Le Tableau 4-10 présente les paramètres de la technique TOPIS : les poids initiaux des critères ($W_j^*$) ainsi que l'idéal positif et négatif ($S_{Best}, S_{worst}$) pour les deux critères

**Tableau 4-10 TOPIS - Poids des critères**

| | **Les poids initiaux des décideurs $W_j^*/10$** | $W_j$ | $S_{Best}$ | $S_{worst}$ |
|---|---|---|---|---|
| Temps d'achèvement total | 8 | 0.52 | 0,1595 | 0,2068 |
| Indicateur de flexibilité | 7.5 | 0.48 | 0,2153 | 0,0938 |

Le classement final des solutions selon les préférences du Tableau 4-10 est détaillé dans le Tableau 4-11.

**Tableau 4-11 Classement des solutions avec TOPSIS**

| Label Solution | Indicateur Flexibilité | Temps (u.t.) | Classement TOPSIS |
|---|---|---|---|
| **E** | 52 | 3587 | 1 |
| **G** | 44.33 | 3131 | 2 |
| **D** | 43.16 | 2972 | 3 |
| **F** | 44.91 | 3467 | 4 |
| **B** | 45.50 | 3522 | 5 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| **H** | 36 | 2927 | 6 |
| **C** | 35 | 2823 | 7 |
| **A** | 22.66 | 2767 | 8 |

Comme nous pouvons le voir, suite à l'application de la méthode TOPSIS, la gamme de fabrication générée par la solution A est la plus mauvaise. En effet, cette gamme présente un temps total d'achèvement de 2767 u.t et un indicateur de flexibilité de 22.66 (Tableau 4-11). Notons que, même si cette gamme possède le meilleur temps, malheureusement elle présente un niveau de flexibilité le plus bas parmi toutes les solutions non-dominées.

Le Tableau 4-12 présente la gamme de fabrication de la solution A. Nous pouvons observer :

**Tableau 4-12 Gamme de fabrication de la solution A**

| **Caractéristique** | **F2** | **F1** | **F3** | **F2** | **F3** | **F1** | **F2** | **F3** | **F2** | **F1** | **F2** | **F3** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Opération** | OP1 | OP1 | OP1 | OP2 | OP2 | OP2 | OP3 | OP3 | OP4 | OP3 | OP5 | OP4 |
| **Machine** | M1 | M1 | M1 | M7 | M9 | M7 | M10 | M10 | M10 | M10 | M1 | M10 |
| **Configuration** | C2 | C2 | C2 | C2 | C2 | C2 | C1 | C2 | C1 | C1 | C2 | C1 |
| **Outil** | T1 | T1 | T1 | T2 | T2 | T2 | T3 | T3 | T4 | T4 | T1 | T4 |

1. À partir du Tableau 4-12, nous constatons que cette gamme de fabrication dépend principalement de deux machines parmi les quatre sélectionnées respectivement M1, M7, M9 et M10. En effet, la machine M1 réalise 4 opérations et la machine M10 réalise 5 opérations parmi les 12 opérations nécessaires. Cette situation a un effet négatif sur l'indicateur de flexibilité, car elle réduit le facteur de diversité (*Diverf*), égal à 3 pour cette gamme de fabrication.
2. Un autre facteur qui dégrade l'indicateur de flexibilité de cette gamme concerne la capacité de chaque machine à remplacer une autre machine indisponible pour réaliser une opération spécifique. Pour cette gamme de fabrication ce facteur *MOP* est égal à 13.
3. De plus, l'indicateur de flexibilité est impacté par le nombre d'opérations qui peuvent être réalisées en anticipation suite au blocage d'une opération. Pour cette gamme de fabrication, si l'opération OP1 de la caractéristique F2 est bloquée à cause de l'indisponibilité de la machine M1 (i.e. P=1), alors l'ensemble des opérations restantes se retrouve bloqué. Pour cette gamme de fabrication ce facteur *NOPP* est égal à 55.

## 4.6 Extension 1 : Robustesse des gammes de fabrication

Dans la première partie de ce chapitre, nous avons proposé un nouvel indicateur de flexibilité qui permet de mesurer la capacité d'un RMS à répondre à l'indisponibilité de ses machines pour réaliser les opérations de la gamme de fabrication. L'indicateur développé représente le nombre d'alternatives pour éviter le blocage de la fabrication à cause de l'indisponibilité d'une machine quelconque.

Bien que cet indicateur de flexibilité permet de concevoir un RMS et de générer des gammes de fabrication avec des niveaux de réactivités face aux changements et aléas, toutefois il ne permet pas de quantifier l'impact des perturbations sur le système après le recours aux alternatives. En effet, une séquence partielle/alternative d'opérations de la gamme de fabrication peut avoir un temps de traitement différent que la séquence restante de la gamme initiale (qui constitue la meilleure gamme selon le critère donné), ce qui implique forcément une perturbation de la totalité de la gamme de fabrication. Dans ce cadre, nous proposons une extension de la première partie en définissant un nouvel indicateur de performance des systèmes reconfigurables pour augmenter la robustesse de la gamme, en prenant en compte les perturbations causées par l'indisponibilité des machines reconfigurables et leurs impacts sur les temps de fabrication.

### 4.6.1 Description du problème

En se basant sur la même description de la section 4.2, le problème étudié dans cette extension consiste à concevoir un nouveau RMS permettant de fabriquer un produit donné. Ce problème de conception se base sur la sélection de machines reconfigurables candidates, capables de garantir la meilleure gamme de fabrication selon deux critères d'optimisation, à savoir la minimisation du temps total d'achèvement et la minimisation du niveau de perturbation. Dans ce cas, la réduction de l'impact des perturbations causées par les indisponibilités des machines sur la gamme de fabrication générée vise à augmenter la robustesse de la gamme de fabrication, et ainsi renforcer la réactivité du système reconfigurable.

En plus des notations utilisées précédemment, nous introduisons des notations supplémentaires comme suit :

| | |
|---|---|
| $\boldsymbol{TM_j[OP_u^k]}$ | Le temps total nécessaire pour une machine $\boldsymbol{M_j}$ pour réaliser une opération $u$ de la caractéristique $\boldsymbol{F_k}$ (il englobe le temps de traitement, le temps de changement de configuration, le temps de transfert et le temps de changement d'outil) |
| **Variables de décision** | |
| $\boldsymbol{TD_j[OP_u^k]}$ | La différence entre les temps nécessaires pour réaliser l'opération $u$ de la caractéristique $F_k$ par les deux machines $M_j$ et la machine de remplacement $M_j'$ |
| $\boldsymbol{TR_j}$ | La perturbation du temps total causée par la machine $M_j$ |
| **Critères à optimiser** | |
| $\boldsymbol{f_{time}}$ | Le temps total de fabrication |
| $\boldsymbol{f_{pertubation}}$ | La perturbation totale |

Notons qu'une perturbation de la gamme de fabrication est le résultat des différences entre les temps de traitement $\boldsymbol{TD_j[OP_u^k]}$ générés par l'adoption d'une alternative permettant de réaliser une opération bloquée à cause de l'indisponibilité d'une machine. Cette perturbation peut aussi être causée par l'absence d'une alternative de remplacement d'une machine indisponible.

### 4.6.2 Exemple illustratif

Afin de mieux illustrer notre première extension, nous présentons dans cette section un exemple numérique, basé sur les mêmes données détaillées dans l'exemple illustratif de la section 4.2, tout particulièrement les relations caractéristiques – opérations – machines (Tableau 4-1) et la gamme de fabrication générée (Figure 4-1).

L'exécution de la gamme de fabrication peut être perturbée suivant deux scénarios possibles :

1. Perturbation suite au remplacement de la machine indisponible. Dans ce scénario (Figure 4-6), la machine indisponible est remplacée par une autre machine capable de réaliser l'opération bloquée. Dans le cas où l'opération bloquée peut être accomplie par plusieurs machines, alors le choix sera porté sur celle qui entrainera moins de perturbations.

   Prenons l'exemple de l'opération *OP5* affectée à la machine M3. Dans le cas où cette machine devient indisponible, elle peut être remplacée par M1, ce qui causera un temps supplémentaire *T*, qui représente la différence entre le temps de traitement de l'opération *OP5* par la machine M1 et le temps de traitement initial si la machine M3 serait restée disponible. Ce temps supplémentaire représente la durée relative à la perturbation de la gamme de fabrication.

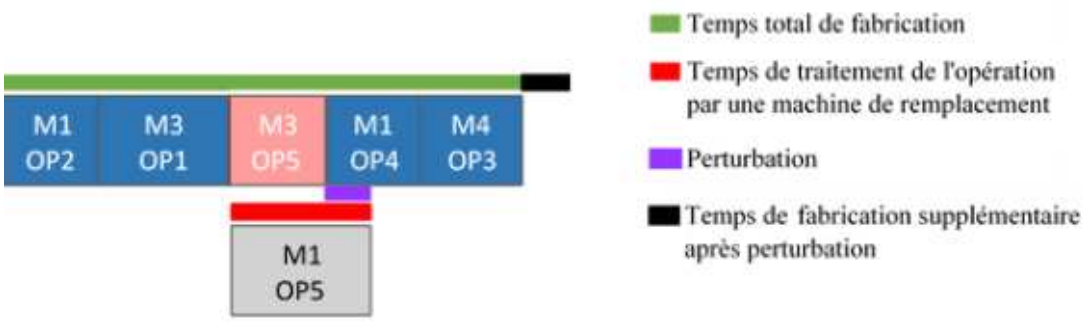



**Figure 4-6 Extension 1 : perturbations avec machine de remplacement**

2. Perturbation sans remplacement de la machine indisponible. Ce scénario (Figure 4-7) peut survenir suite à l'absence de machines capables de remplacer la machine indisponible. En effet, il est possible qu'aucune machine ne puisse réaliser l'opération bloquée. Cependant, dans d'autres cas, il est possible que le système dispose de machines capables de réaliser l'opération bloquée, mais elles ne sont pas disponibles. Dans ce cas, la seule solution est d'attendre que la machine redevienne disponible.

   Prenons l'exemple de l'opération OP1 à réaliser par la machine M3, qui constitue la seule machine capable de réaliser cette opération (Tableau 4-1). Ainsi, si M3 devient indisponible, alors aucune machine ne pourra la remplacer. En plus, il n'est pas possible de réaliser l'opération OP5 à cause de la

contrainte de précédence entre OP1 et OP5, contrairement aux opérations OP4 et OP3 qui peuvent être réalisées à leurs positions respectives. Donc, la perturbation résultante sera égale à la somme des perturbations engendrées par les deux opérations OP1 et OP5.




**Figure 4-7 Extension 1 : perturbations sans machine de remplacement**

### 4.6.3 Formulation mathématique

Le problème multicritère étudié dans cette extension vise à concevoir un système reconfigurable en sélectionnant le meilleur ensemble de machines reconfigurables et la meilleure gamme de fabrication, en minimisant à la fois le temps total d'achèvement et le niveau de perturbation que peut subir le système.

#### *A. Temps total d'achèvement*

Le premier indicateur à optimiser est relatif à la minimisation du temps total d'achèvement. Le calcul de ce temps total utilise les mêmes équations présentées dans la première partie (section 4.3.1). Il est exprimé par

$$Min\{f_{Time}\} = PrT + TCT + CCT + MCT$$

#### *B. Perturbation totale de la gamme de fabrication*

Ce deuxième indicateur à optimiser concerne la minimisation de la perturbation causée par les alternatives adoptées pour faire face aux indisponibilités de machines. Comme expliqué précédemment, il est basé sur deux situations possibles :

1. Remplacement de la machine indisponible $M_j$ par une autre machine $M_j'$ ayant les capacités de réaliser l'opération bloquée. Dans ce cas (équation (4-10)), la perturbation concernera la différence entre le temps de traitement initial $TM_j[OP_u^k]$ et le temps de traitement effectif (suite au remplacement de la machine) $M_j'(OP_u^k)$:

$$TD_j(OP_u^k) = \left|TM_j(OP_u^k) - TM_j'(OP_u^k)\right| \quad \textbf{(4-10)}$$

2. Il n'y a pas de machines de remplacement pour l'opération en cours, dans ce cas (équation (4-11)), nous prenons directement $TM_j(OP_u^k)$ comme différence de temps $TD_j(OP_u^k)$ :

$$TD_j\left(OP_u^k\right) = TM_j\left(OP_u^k\right) \quad \textbf{(4-11)}$$

Par hypothèse, nous nous plaçons dans le cas où une machine indisponible, restera indisponible jusqu'à la fin de la fabrication de la pièce.

En se basant sur les cas mentionnés ci-dessus (les équations (4-10) et (4-11)), le niveau total de perturbation d'une machine $M_j$ peut être formulé par l'équation (4-12) :

$$TR_j = \sum_{u=1}^{\mathrm{OPTN}} TD_j\left(OP_u^k\right) \quad \textbf{(4-12)}$$

Ainsi, le deuxième à minimiser est exprimé par l'équation (4-13) comme suit :

$$\mathrm{MIN}\left\{f_{\mathrm{Robustness}}\right\} = \sum_{j=1}^{\mathrm{NSM}} TR_j\,/NSM \quad \textbf{(4-13)}$$

Comme pour la première version du problème, nous reprenons les mêmes contraintes du modèle mentionnées dans la section (3.4.4).

### 4.6.4 Expérience numérique

Pour résoudre le problème d'optimisation multicritère issu de notre première extension, nous optons pour la même métaheuristique utilisée dans la première partie de ce chapitre. Il s'agit d'une adaptation de NSGA-II (*Non Sorting Genetic Algorithm II*), présentée en détails dans la section 4.4.

#### *A. Données du problème*

Les données du problème relatives au produit, aux machines reconfigurables candidates, aux outils, aux différents temps et coûts unitaires sont identiques à celles utilisées dans la première partie du chapitre.

#### *B. Résultats et discussions*

Nous avons utilisé le langage Java pour implémenter la métaheuristique NSGA-II. Le Tableau 4-13 détaille les différents paramètres utilisés pour l'adaptation et l'initialisation du NSGA-II.

**Tableau 4-13 Extension 1 : paramètres du NSGA-II**

| Taille de la population | Taux de croisement | Taux d'élitisme | Taux de mutation | Taux aléatoire | Critères d'arrêt | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | Nombre d'itérations max | Absence d'amélioration |
| 30 | 80% | 10% | 5% | 5% | 100 | 3min |

Le Tableau 4-14 détaille les machines sélectionnées pour l'ensemble des gammes de fabrication (solutions) non-dominées.

**Tableau 4-14 Extension 1 : résultats du NSGA-II : les machines sélectionnées**

| Solution | Machines sélectionnées | Temps total de fabrication | Perturbation totale |
|---|---|---|---|
| **A** | M1 M3 M5 M7 M8 M10 | 3019.558 | 437.740 |
| **B** | M1 M6 M8 M9 M10 | 2030.4918 | 699.701 |
| **C** | M1 M3 M4 M5 M6 M7 M9 M10 | 3139.0 | 319.875 |
| **D** | M1 M5 M6 M7 M8 M9 | 2788.9331 | 526.177 |
| **E** | M1 M4 M8 M9 M10 | 2659.0 | 595.8 |
| **F** | M1 M4 M5 M8 M9 | 2652.5586 | 611.088 |
| **G** | M1 M4 M5 M8 M9 M10 | 2909.0 | 449.166 |

À travers le Tableau 4-14, nous remarquons que la meilleure solution du point de vu temps total d'achèvement est la solution "*B*". Cependant, la solution "*C*" est la plus robuste, générant la plus petite perturbation et offrant des alternatives qui dégradent le moins possible la gamme de fabrication générée.

Illustrons notre approche sur la gamme de fabrication générée pour la solution *A* détaillée par le Tableau 4-15.

**Tableau 4-15 Extension 1 : gamme de fabrication associée à la solution A**

| **Caractéristique** | F1 | F2 | F2 | F1 | F3 | F2 | F2 | F1 | F3 | F2 | F3 | F3 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Opération** | OP1 | OP1 | OP3 | OP2 | OP1 | OP2 | OP4 | OP3 | OP3 | OP5 | OP2 | OP4 |
| **Machine** | M1 | M1 | M8 | M1 | M1 | M7 | M3 | M10 | M10 | M1 | M5 | M10 |
| **Configuration** | C2 | C2 | C3 | C1 | C2 | C2 | C2 | C1 | C2 | C2 | C1 | C1 |
| **Outil** | T1 | T1 | T3 | T2 | T1 | T2 | T4 | T4 | T3 | T1 | T2 | T4 |

Si nous prenons le cas de la machine *M1*, son indisponibilité causera une perturbation $TR_1 = 1368$. Cette perturbation peut être expliqué, par exemple, par :

i. L'opération en cours n'a pas de machine de remplacement comme par exemple l'opération *F1-OP1* (encadrée en rouge sur le Tableau 4-15). Cette situation engendrera une perturbation supplémentaire $TM_1(OP_1^1) = 500$.

ii. L'opération en cours dispose d'une machine de remplacement mais elle est bloquée à cause d'une contrainte de précédence avec une autre opération bloquée par l'indisponibilité de la même machine. L'opération *F1-OP2* se trouve dans cette situation (encadrée en bleu dans le Tableau 4-15). En effet, elle possède plusieurs machines de remplacement (M5, M7 et M9), mais reste bloquer à cause de la contrainte de précédence avec l'opération *F1-OP1*. Cette situation engendrera une perturbation supplémentaire qui correspond au temps de traitement de l'opération *F1-OP2*, avec $TM_1(OP_2^1) = 113$.

Prenons maintenant le cas de l'indisponibilité de la machine M7, qui provoquera le blocage de l'opération *F2-OP2* (encadrée en vert dans le Tableau 4-15). Cette opération dispose de plusieurs machines de remplacement, à savoir M1 ou *M5* (la machine M9 n'est pas sélectionnée dans la conception du RMS).

Dans cette situation, la machine de remplacement sélectionnée sera celle entrainant la plus petite perturbation. Ainsi, la machine *M1* sera sélectionnée pour remplacer la machine M7, car elle génère une perturbation $TD_7(OP_2^2) = \left| TM_1(OP_2^2) - TM_7(OP_2^2) \right| = 50$.

Pour voir la différence avec l'indicateur de flexibilité, nous calculons la perturbation totale de la meilleure solution classée par TOPSIS dans la section 4.5. La meilleure solution selon TOPSIS est la solution E avec une flexibilité de 52 et un temps d'achèvement total de 3587u.t. Malgré que cette dernière contienne un bon nombre d'alternatives, sa perturbation totale égale à 664.75 (Tableau 4-16) et reste moins bonne en comparant au résultat obtenu dans le Tableau 4-16. Ceci est dû au fait que l'indicateur de flexibilité cherche à maximiser le nombre d'alternatives dans une solution donnée sans tenir compte de l'impact d'utilisation de ces alternatives sur le processus de fabrication.

**Tableau 4-16 Extension 1 : robustesse de la meilleure solution trouvée en termes de flexibilité**

| Label Solution | Machines sélectionnées | Indicateur Flexibilité | Temps | Perturbation totale |
|---|---|---|---|---|
| **E** | M1 M2 M3 M5 M6 M7 M8 M9 | 52 | 3587 | 664.75 |

## 4.7 Extension 2 : Approche hybride pour la gestion des indisponibilités des machines reconfigurables

Dans les deux premières parties de ce chapitre, nous nous sommes intéressés à la flexibilité et la robustesse d'une gamme de fabrication afin d'augmenter la réactivité de notre système reconfigurable face aux indisponibilités des machines qui le composent. Il s'agit d'indicateurs de performances permettant de mesurer les alternatives possibles (flexibilité) ou de déterminer la qualité de chaque alternative en matière de perturbation globale générée (robustesse), avec l'hypothèse restrictive que si la machine est indisponible, elle le restera jusqu`à l'achèvement de la gamme de fabrication.

Dans cette deuxième extension, nous proposons une approche hybride qui permet de trouver la meilleure alternative parmi celles offertes par la capacité du système et la gamme de fabrication au niveau opérationnel (au moment de son déploiement). De plus, nous relâchons l'hypothèse restrictive relative à l'indisponibilité totale des machines.

### 4.7.1 Description du problème

Le problème étudié dans cette extension vise à gérer les indisponibilités des machines reconfigurables suivant une gamme de fabrication préalablement générée pour réaliser les opérations relatives à un produit donné. En plus des notations utilisées précédemment, nous introduisons des notations supplémentaires données par :

| | |
|---|---|
| $Nam$ | Nombre de machines disponibles |
| $M_1, \dots, M_{NAm}$ | Machines disponibles* |
| $TT$ | Temps de fabrication initial de la gamme de fabrication initiale |
| $CT$ | Temps écoulé depuis le début de l'exécution de la gamme de fabrication |
| $UT_j$ | Temps d'indisponibilité d'une machine $j$ |
| $ST_j$ | Temps de préparation de la machine $j$ |

**Variables de décision**

| | |
|---|---|
| $DisT_j$ | Durée de la perturbation causée par l'indisponible de la machine $j$ |

Rappelons qu'une perturbation est le résultat de l'indisponibilité d'une machine pour réaliser une opération de la gamme de fabrication. Elle est ainsi provoquée par :

- Un temps de traitement différent de l'opération correspondante, engendré par le remplacement de la machine indisponible,
- Un temps de blocage du processus de réalisation des opérations, engendré par l'absence d'une machine de remplacement et l'attente que la machine indisponible soit à nouveau disponible,
- Un temps de fabrication total différent, résultat de l'anticipation (avance) des opérations non liées par des contraintes de précédences à l'opération bloquée.

Le travail réalisé dans cette deuxième extension est basé sur la robustesse des gammes de fabrication. En effet, le travail réalisé dans l'extension 1 permet d'avoir des informations sur les alternatives possibles à l'indisponibilité d'une machine à chaque étape (réalisation d'une opération) de la gamme de fabrication, et la qualité de chaque alternative, en matière de perturbation générée. Ainsi, l'objectif de cette extension est de développer une approche permettant de déterminer la meilleure alternative faisant face au changement d'état d'une machine (disponibilité – indisponibilité – disponibilité – …) pour ainsi continuer l'exécution de la gamme de fabrication.

### 4.7.2 Exemple illustratif

Illustrons cette deuxième extension en utilisant la gamme de fabrication détaillée par le Tableau 4-17.

**Tableau 4-17 Extension 2 : exemple illustratif**

| **Caractéristique** | F1 | F1 | F1 | F1 | F1 |
|---|---|---|---|---|---|
| **Opération** | Op5 | Op1 | Op2 | Op3 | Op4 |
| **Machine** | M1 | M3 | M4 | M1 | M2 |

| **Configuration** | C2 | C1 | C1 | C2 | C1 |
|---|---|---|---|---|---|
| **Outil** | T3 | T2 | T1 | T1 | T1 |

La Figure 4-8 présente trois différentes périodes d'exécution de notre gamme de fabrication. Lors de la première période (T1), toutes les machines sont disponibles, l'opération OP5 est réalisée par la machine M1. La période T2 connait l'indisponibilité de la machine M3. Suite à cette indisponibilité, une nouvelle gamme de fabrication est générée pour la séquence restante en se basant sur les machines disponibles. L'objectif de cette nouvelle solution est d'assurer une perturbation minimale possible par rapport à la meilleure gamme de fabrication donnée initialement. Ici, nous observons la réalisation de l'opération OP2 et l'affectation de l'opération OP1 à la machine M1. Lors de la période T3, la machine M3 devient à nouveau disponible, ce qui provoque la génération d'une nouvelle gamme de fabrication pour la dernière séquence des opérations restantes.

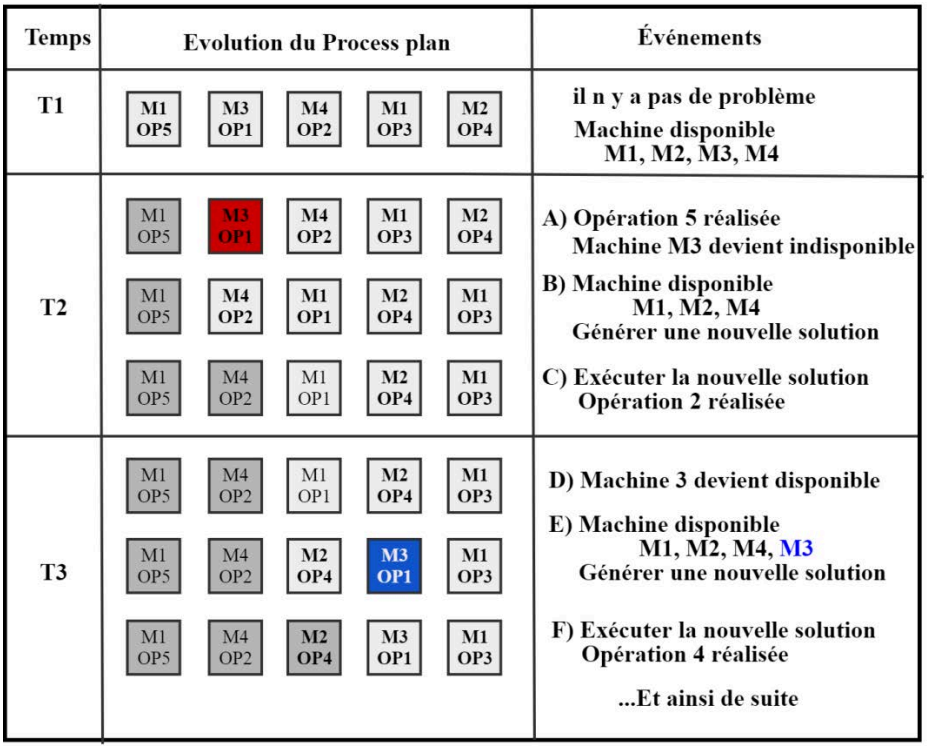



**Figure 4-8 Extension 2 : exécution de la gamme de fabrication de l'exemple illustratif**

### 4.7.3 Formulation mathématique

Pour cette nouvelle extension, le problème d'optimisation multicritère étudié vise à déterminer la meilleure alternative suite à l'indisponibilité (puis à la disponibilité) d'une machine, minimisant le temps total d'achèvement et le niveau de perturbation du processus de fabrication.

### *A. Temps total d'achèvement*

Le temps total d'achèvement est basé sur les expressions du temps total de changements d'outils (équation (4-2)), et le temps total de changements de configurations (équation (4-3)), développées dans la section 4.3. L'expression du temps total de traitement des opérations est adaptée comme décrit par l'équation (4-14), en prenant en compte le temps de préparation des machines :

$$PrT = \sum_{k=1}^{N} \sum_{u=1}^{NF_k} PrTime\left[M_j\left(OP_u^k\right)\right]\left[C_l^j\left(OP_u^k\right)\right] + \mathrm{ST_j} \qquad \textbf{(4-14)}$$

Ainsi, le premier critère relatif à la minimisation du temps total d'achèvement est exprimé par :

$$Min\,\{f_{Time}\} = PrT + TCT + CCT + MCT$$

### *B. Perturbation totale*

Pour cette deuxième extension, la perturbation de la gamme de fabrication généralise celle prise en considération dans la première extension, en considérant que :

- Une machine indisponible peut redevenir disponible à tout moment, et pas forcément après la fin l'achèvement de la gamme de fabrication initiale.
- Si une opération n'est pas bloquée par l'indisponibilité d'une machine, ni par une contrainte de précédence avec une opération bloquée, alors elle peut être accomplie en avance (par anticipation).

De plus, nous considérons un temps de préparation de la machine noté $ST_j$, comptabilisé après chaque changement d'état de la machine (indisponibilité → disponibilité).

Ainsi, la perturbation totale est basée sur trois situations possibles, dont les deux premières sont identiques à celles détaillées dans la première extension (section 4.6.3) :

1. Présence d'une machine de remplacement.
2. Absence de machines de remplacement, où l'opération est suspendue à cause d'une contrainte de précédence avec une autre opération bloquée.
3. Report des opérations bloquées et anticipation des opérations non bloquées, sachant qu'une opération est bloquée à cause de l'indisponibilité de la machine et l'absence d'une machine de remplacement. De plus, elle peut être bloquée à cause d'une contrainte de précédence avec une autre opération bloquée.

Ainsi, la perturbation décrite par l'équation (4-15) dépend du (i) temps de perturbation causé par la machine indisponible $DisT_j$, (ii) le temps nécessaire pour exécuter l'opération bloquée après que la machine

redevienne disponible $TM_j\left(OP_u^k\right)$ et (iii) et le temps requis pour réaliser les opérations anticipées (devancées) $TM_j'\left(OP_u'^{k'}\right)$ :

$$TD_j\left(OP_u^k\right) = TM_j\left(OP_u^k\right) + \text{DisT}_j - \sum_{\substack{u=1 \\ u \neq u'}}^{OPTN} \sigma \times TM_{j'}\left(OP_u'^{k'}\right) \quad \textbf{(4-15)}$$

avec

$$\sigma = \begin{cases} 0, & \text{Si } OP_{u'}^{k'} \text{ est liée par une relation de précédence avec une autre opération bloquée.} \\ 1, & \text{Sinon} \end{cases}$$

et

$$\text{DisT}_j = TT - CT - \text{UT}_j$$

En se basant sur les trois situations ci-dessus, la perturbation totale d'une machine $M_j$ est formulée par l'équation (4-16) :

$$TR_j = \sum_{u=1}^{\text{OPTN}} TD_j(OP_u^k) \quad \textbf{(4-16)}$$

Ainsi, le deuxième critère relatif à la minimisation de la perturbation totale de la gamme de fabrication peut être exprimé par :

$$\text{Min}\left\{f_{Perturbation}\right\} = \sum_{j=0}^{NAm} \frac{TR_j}{NAm} \quad \textbf{(4-17)}$$

Comme pour les deux premières parties de ce chapitre, nous reprenons les mêmes contraintes du modèle mathématique présentées dans la section (3.4.4) du chapitre 3. De plus, nous supposons que si l'indisponibilité d'une machine survient au cours du traitement d'une opération, alors la solution alternative reprend le traitement de cette opération dès le début.

### 4.7.4 **Approche proposée**

Connues dans la littérature, les approches hybrides constituent une classe de techniques d'optimisation permettant d'obtenir des résultats très satisfaisants pour résoudre les problèmes d'optimisation classiques complexes (El-Ghazali Talbi, 2009). Pour résoudre ce nouveau problème d'optimisation, nous avons opté pour une approche hybride : heuristique – métaheuristique. Notre approche est basée sur une heuristique de recherche, couplée à la métaheuristique NSGA-II. L'heuristique permet de s'assurer de la bonne exécution de la gamme de fabrication, en vérifiant l'état de disponibilité des machines et en inspectant les alternatives

possibles. Ces alternatives sont par la suite évaluées par la métaheuristique NSGA-II qui génère une nouvelle gamme de fabrication pour la séquence des opérations restantes de la gamme de fabrication initiale. La Figure 4-9 illustre le diagramme de notre approche hybride.

L'heuristique est lancée dès le début de la réalisation de la gamme de fabrication. Elle vérifie la disponibilité des machines sélectionnées (étape 1). Dès l'avènement d'une indisponibilité d'une machine, l'heuristique évalue l'étendue de la perturbation générée, et surtout son impact sur l'opération en cours de réalisation. À ce stade, l'objectif est d'apprécier la possibilité de continuer la réalisation des opérations sans la génération de nouvelle gamme de fabrication. Cette situation peut se présenter si la machine devenue indisponible ne concerne pas l'opération en cours, ni les prochaines opérations à réaliser. Dans le cas contraire, l'heuristique cherche les alternatives possibles pour éviter le blocage de la fabrication (étape 2), en explorant les possibilités de remplacements de la machine indisponible, ou d'anticipation d'opérations libres (i.e. des opérations non liées par une contrainte de précédence avec l'opération bloquée, et qui sont à réaliser par une machine disponible).

Une fois les alternatives identifiées, l'heuristique fait appel au NSGA-II pour déterminer la meilleure alternative à la gamme de fabrication initiale sur la base de la perturbation et le temps de fabrication générés (étape 3). Dans le cas contraire, c'est-à-dire dans l'absence d'alternatives, l'heuristique attendra l'évolution de la situation (disponibilité d'une nouvelle machine) pour vérifier à nouveau la présence de nouvelles alternatives (en ajoutant une opération fictive d'une seule unité de temps). Cette attente sera incluse dans le temps de perturbation totale.

Notons que le codage et le décodage des solutions manipulées par la métaheuristique NSGA-II suivent les mêmes principes utilisés dans les deux premières parties de ce chapitre et illustrés dans le chapitre 3.

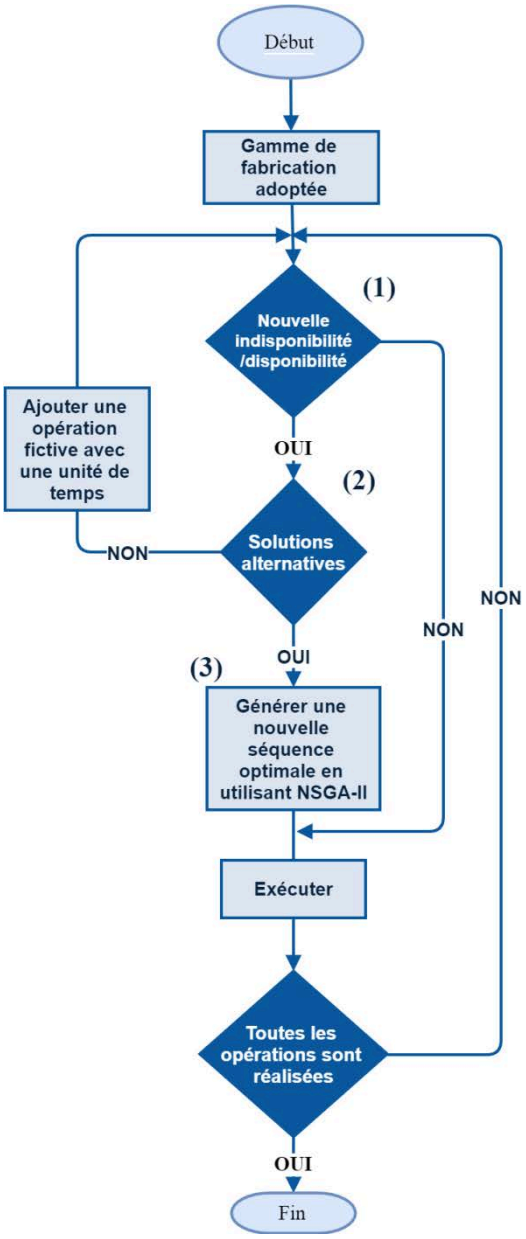



**Figure 4-9 Extension 2 : diagramme de l'approche hybride proposée**

### 4.7.5 Expérience numérique

#### *A. Données du problème*

Les données du problème, relatives au produit, aux machines reconfigurables candidates, aux outils, aux différents temps et coûts unitaires sont identiques à celles utilisées dans la première partie du chapitre. De plus, le Tableau 4-18 détaille la gamme de fabrication retenue pour réaliser les opérations requises par le produit à fabriquer.

**Tableau 4-18 Extension 2 : la gamme de fabrication retenue**

| **Caractéristique** | F2 | F2 | F2 | F1 | F3 | F2 | F3 | F2 | F1 | F1 | F3 | F3 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Opération** | OP1 | OP3 | OP2 | OP1 | OP1 | OP4 | OP3 | OP5 | OP2 | OP3 | OP2 | OP4 |
| **Machine** | M1 | M4 | M7 | M1 | M1 | M10 | M6 | M1 | M1 | M8 | M5 | M1 |
| **Configuration** | C3 | C1 | C2 | C3 | C2 | C1 | C2 | C2 | C1 | C2 | C1 | C2 |
| **Outils** | T1 | T3 | T2 | T1 | T1 | T4 | T3 | T1 | T2 | T4 | T2 | T4 |
| **Temps de traitement** | 332 | 252 | 352 | 502 | 201 | 102 | 302 | 202 | 102 | 202 | 302 | 252 |

Nous illustrons notre approche sur un exemple avec les instants des indisponibilités détaillés dans le Tableau 4-19 (évènement = 0 représente une indisponibilité, évènement = 1 signifie que la machine redevienne disponible).

**Tableau 4-19 Extension 2 : instants de disponibilité/indisponibilité des machines sélectionnées**

| Machine | M7 | M8 | M1 | M8 | M1 | M5 | M6 | M4 | M10 | M5 | M10 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Temps (*t*) | 120 | 200 | 255 | 450 | 800 | 978 | 990 | 1085 | 1120 | 1200 | 1200 |
| Évènement | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 |

### *B. Résultats et discussions*

En se basant sur la gamme de fabrication, les temps requis pour le traitement de chaque opération, ainsi que les instants d'indisponibilité et disponibilité des machines, nous observons les situations suivantes :

- A $t = 0$ : l'heuristique vérifie la disponibilité des machines (étape 1). À ce moment, toutes les machines sont disponibles. La fabrication du produit est entamée avec l'exécution de l'opération F2-OP1 par la machine M1. Le temps de traitement requis est de 330 *u.t*.
- A $t = 120$ : l'heuristique détectera l'indisponibilité de la machine M7, mais sans incidence sur la poursuite de l'exécution de l'opération F2-OP1.
- A $t = 200$ : l'heuristique détectera l'indisponibilité de la machine M8, mais sans incidence sur la poursuite de l'exécution de l'opération F2-OP1.
- A $t = 255$ : l'heuristique détectera l'indisponibilité de la machine M1, ce qui provoque l'arrêt de l'exécution de l'opération F2-OP1.
    - L'heuristique passe dans l'étape 2 à la recherche d'alternative à cette indisponibilité.
    - L'heuristique ne trouve aucune machine de remplacement (M1 est la seule machine capable de réaliser l'opération F2-OP1).
    - L'heuristique ne trouve pas d'opération pouvant être anticipé. En effet les seules opérations possibles sont F1-OP1 et F3-OP1, qui ne sont pas liées par une contrainte de précédence avec F2-OP1, mais elles sont affectées à la machine M1.

  - L'heuristique ne trouve aucune alternative et se met en attente pendant une unité de temps (en ajoutant une opération fictive), dans l'attente que la machine M1 redevienne disponible.
- A $t$ = 450 : la machine M8 redevient disponible. L'heuristique détectera un changement d'état de la machine M8, et tente de chercher une alternative au blocage actuel de l'exécution de la gamme de fabrication, mais sans succès car la machine M8 ne peut pas remplacer la machine M1 pour réaliser l'opération F2-OP1.
- A $t$ = 800 : la machine M1 redevient disponible. Ce changement d'état est détecté par l'heuristique qui trouve une alternative à cette perturbation. À ce moment, l'heuristique passe à NSGA-II afin de trouver une nouvelle séquence au reste des opérations présentées dans le Tableau 4-18. L'objectif ici est de minimiser le gap entre le nouveau temps d'achèvement affecté par la perturbation et le temps d'achèvement initial de la gamme de fabrication retenue.
- Le NSGA-II alloue à nouveau la machine M1 à l'opération F2-OP1. Notons que cette perturbation a causé un retard de 800 + 255 = 1055 *u.t*. Dans ce cas, la réalisation de cette opération s'achèvera à $t$ = 1055+332 = 1387 *u.t*.
- Entre les instants $t$ = 800 et $t$ = 1387 (pendant la réalisation de l'opération F2-OP1 par la machine M1) : l'heuristique observe dans l'ordre 1) les indisponibilités de M5, M6 et M10 2) les disponibilités de M5, M4 et M10. Ces changements (nouvelles informations) provoquent :
  - L'heuristique trouve plusieurs alternatives pour réaliser la séquence des opérations restantes, exemple
    - Une machine de remplacement capable de réaliser l'opération F2-OP3, ici M5.
    - Anticipation des opérations F2-OP2, F2-OP3, F1-OP1….
  - En considérant ces alternatives, le NSGA-II est appelé pour choisir la meilleure séquence vis-à-vis du temps d'achèvement et de la perturbation totale. La nouvelle séquence est présentée dans le Tableau 4-20

**Tableau 4-20 Extension 2 : nouvelle séquence générée par notre l'approche hybride**

| **Caractéristique** | F2 | F2 | F2 | F1 | F1 | F3 | F2 | F2 | F3 | F1 | F3 | F3 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Opération** | OP1 | OP3 | OP2 | OP1 | OP2 | OP1 | OP4 | OP5 | OP2 | OP3 | OP3 | OP4 |
| **Machine** | M1 | M1 | M5 | M1 | M1 | M1 | M8 | M1 | M5 | M8 | M8 | M8 |
| **Configuration** | C3 | C2 | C1 | C2 | C1 | C1 | C2 | C2 | C1 | C1 | C3 | C2 |
| **Outils** | T1 | T3 | T2 | T1 | T1 | T1 | T4 | T1 | T2 | T4 | T3 | T4 |
| **Temps de traitement** | 312 | 502 | 252 | 502 | 169 | 204 | 202 | 202 | 302 | 202 | 338 | 202 |

La différence entre cette approche et celle présentée dans la deuxième partie (section 5.6) réside dans le fait que la première approche essaie de donner une conception du RMS avec les meilleures alternatives possibles. Le choix de ces alternatives tient compte de l'impact de leurs utilisations sur le processus de fabrication vis-à-vis du temps de perturbation. Néanmoins, elle fournit seulement une gamme de fabrication

riche en alternatives sans indiquer la façon de son utilisation pour perturber le moins possible le processus de fabrication.

Cette nouvelle approche hybride répond à cet handicape en améliorant et en exploitant les alternatives. Elle intervient tout au long de l'exécution de la gamme de fabrication afin de choisir à chaque fois la meilleure alternative en cas de disponibilité/indisponibilité de machine. Ceci est possible en générant une nouvelle séquence des opérations restantes de la gamme de fabrication initiale. Cette nouvelle séquence doit avoir le moins de perturbations, tout minimisant les deux critères.

## 4.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé la problématique de réactivité des systèmes de production face aux indisponibilités des machines reconfigurables. Des indisponibilités qui peuvent être le résultat d'un partage de ressources, des défaillances, des actions de maintenances préventives.

Dans la première partie, en se basant sur la capacité de système et la structure de la gamme de fabrication adoptée, nous avons proposé un indicateur de flexibilité qui permet de mesurer les alternatives possibles pour remédier à l'indisponibilité des machines lors de la conception d'un RMS. La deuxième partie a été dédiée à l'étude de la robustesse des gammes de fabrication pour quantifier l'impact des perturbations générées par les indisponibilités des machines et ainsi évaluer la qualité des éventuelles alternatives. Nous avons terminé par la troisième partie, où une approche hybride (heuristique – métaheuristique) pour la gestion des indisponibilités des machines pendant l'exécution d'une gamme de fabrication a été proposée. L'approche est basée sur les études menées dans les deux premières parties du chapitre et vise à trouver la meilleure alternative pour faire face à l'indisponibilité d'une machine.

Dans le chapitre suivant, nous abordons à la problématique de conception d'atelier, en étudiant la question de positionnement des machines reconfigurables. Il s'agit de répondre à la question relative au lien entre les performances du système reconfigurable et sa structure physique.

# 5 Chapitre 5 : Prise en compte de l'agencement des machines à outils reconfigurable (RMTs) et l'évolution de la famille de produits lors de la conception d'un RMS

Le cinquième chapitre aborde le problème de conception d'un RMS à un niveau plus haut en étudiant les impacts des contraintes d'agencement des RMTs et celles de la famille de produits sur la conception des RMS. En effet, à travers ce dernier chapitre nous présentons deux études relatives aux relations d'un RMS avec son environnement. Le premier problème étudié concerne les positionnements des RMTs lors de la conception d'un RMS. Pour résoudre ce problème, une méthode heuristique monocritère basée sur une recherche exhaustive est proposée pour déterminer le meilleur agencement de l'atelier reconfigurable. Le deuxième problème est consacré à l'étude de l'évolution des contraintes de la production, relatives à la famille de produits et leurs impacts sur la conception du RMS. Un nouvel indicateur de performance est proposé, permettant de sélectionner les meilleures machines à inclure dans le nouveau RMS. Les fonctionnalités des machines sélectionnées sont prises en compte pour garantir la meilleure évolution du RMS permettant de répondre au mieux aux changements des contraintes de la famille de produits pour laquelle il est conçu. Une approche basée sur AMOSA est proposée pour résoudre le problème multicritère étudié. L'applicabilité des deux approches relatives aux deux problèmes étudiés dans ce chapitre est illustrée à travers un panel d'expériences numériques et analyses

## 5.1 Introduction

Après avoir étudié – dans le chapitre 4– la réactivité des systèmes reconfigurables face aux indisponibilités des machines, nous abordons dans ce dernier chapitre un autre aspect lié à la réactivité de ces systèmes, en étudiant la relation qui lie le système conçu avec deux aspects importants : son environnement physique, c'est-à-dire l'atelier reconfigurable physique qui implémente ce RMS et son environnement logique, à savoir la famille de produits dans laquelle ce RMS peut évoluer.

En effet, la première problématique relative à l'agencement des machines est d'une très grande importance pour un système reconfigurable. En effet, la structure physique de l'atelier doit être en mesure de garantir la flexibilité nécessaire pour accompagner les évolutions du RMS d'une manière efficace et rapide. De même, la deuxième problématique relative à l'évolution du produit dans une famille de produits, présente un grand intérêt. La nature d'un RMS repose sur le fait qu'il soit conçu pour assurer la fabrication d'un produit, tout en intégrant les capacités et les fonctionnalités nécessaires qui lui permettent d'évoluer vers la fabrication d'autres produits de la même famille.

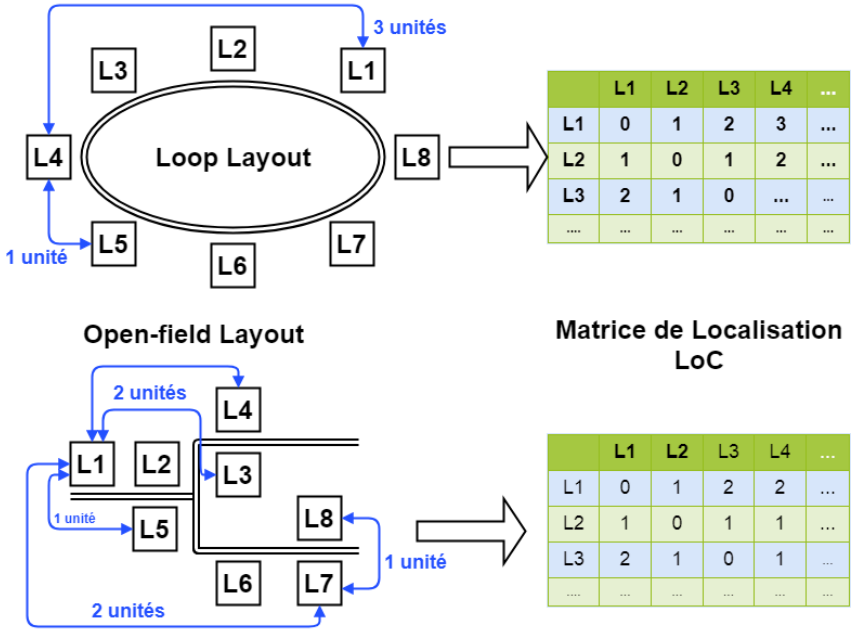
Dans ce contexte, nous présentons dans ce chapitre deux études. La première concerne la problématique de l'agencement d'un atelier reconfigurable pour trouver les meilleurs emplacements des machines sélectionnées dans la gamme de fabrication. Dans la deuxième, nous aborderons l'effort de reconfigurabilité d'un système reconfigurable pour assurer l'évolution des caractéristiques du produit dans une famille de produits spécifique

## 5.2 Agencement d'un atelier reconfigurable

Le problème d'agencement des machines prend une autre dimension lorsqu'il s'agit d'un atelier reconfigurable. En effet, en plus des contraintes de base liées à ce problème d'agencement, il est nécessaire d'intégrer les caractéristiques du RMS, et notamment celles relatives à sa reconfigurabilité. De plus, la prise en considération de toutes ces contraintes et caractéristiques dès la phase de conception de l'atelier permettra de garantir au système reconfigurable conçu une meilleure réactivité et un très bon niveau de performances (capacité de reconfiguration, flexibilité, …).

En se basant sur les nombreuses options d'agencement des machines présentes dans la littérature (*cf.* section 2.8.2 du chapitre 2), nous proposons un modèle générique qui permet de représenter les dispositions des machines sous la forme d'une matrice notée matrice de localisation (*LoC*). Cette matrice permet de représenter une configuration d'agencement possible, en spécifiant les distances entre les machines selon les capacités et contraintes du système (par exemple les contraintes d'encombrement) ainsi que les positions disponibles (Figure 5-1).

Notons que les distances entre les positions (machines) s'appuient sur les capacités de transfert entre les machines. Elles sont fournies par le décideur et considérées comme des données d'entrée pour notre modèle.




| | L1 | L2 | L3 | L4 | ... |
|---|---|---|---|---|---|
| L1 | 0 | 1 | 2 | 3 | ... |
| L2 | 1 | 0 | 1 | 2 | ... |
| L3 | 2 | 1 | 0 | ... | ... |
| .... | ... | ... | ... | ... | ... |

| | L1 | L2 | L3 | L4 | ... |
|---|---|---|---|---|---|
| L1 | 0 | 1 | 2 | 2 | ... |
| L2 | 1 | 0 | 1 | 1 | ... |
| L3 | 2 | 1 | 0 | 1 | ... |
| .... | ... | ... | ... | ... | ... |

**Figure 5-1 Représentation des agencements via des machines**

Dans la Figure 5-1, L1,…, L8 sont les emplacements candidats connus au préalable. Ils sont destinés pour accueillir les machines sélectionnées pour faire partie du système reconfigurable conçu, sachant que le nombre d'emplacements dans la matrice correspond au nombre total des occurrences des machines sélectionnées. Cela signifie que :

- Chaque machine est affectée à un seul emplacement.
- Chaque emplacement ne peut accueillir qu'une seule machine.
- Les emplacements possèdent les mêmes caractéristiques, en ce qui concerne la satisfaction des contraintes d'encombrement de toutes les machines.
- Le système de transfert entre les machines, a les capacités d'assurer les connexions (liaisons) requises par l'agencement des machines mis en place.

Dans ce cadre, notre étude vise à déterminer le meilleur agencement des machines en se basant sur les informations données suivantes :

- Les caractéristiques et besoins du produit à considérer.
- La gamme à adopter pour la fabrication de ce produit.
- Les machines reconfigurables sélectionnées par la gamme et le nombre de leurs occurrences respectives, à inclure dans le nouveau RMS conçu.

- Le nombre d'occurrences dont dispose chaque machine.

Notons qu'une machine peut être utilisée plusieurs fois dans la gamme de fabrication et ce nombre d'utilisation peut excéder le nombre d'occurrences disponibles pour cette machine. Autrement dit, chaque machine peut avoir plusieurs occurrences et figurer plusieurs fois dans la gamme de fabrication.

Le Tableau 5-1 décrit une structure simplifiée de la gamme de fabrication. En effet, dans ce chapitre nous nous intéressons uniquement aux machines et leurs occurrences respectives.

**Tableau 5-1 Gamme de fabrication simplifiée**

| **Opération** | **OP2** | **OP5** | **OP1** | **OP14** | **OP7** | **OP9** |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Machines** | M1 | M2 | M1 | M3 | M1 | M3 |

Nous remarquons de la gamme fabrication détaillée dans le Tableau 5-1 que la machine M1 est utilisée trois fois pour réaliser respectivement les opérations OP2, OP1 et OP7. Si nous supposons que la machine M1 dispose de deux occurrences alors une première question consiste à partager les trois opérations OP2, OP1 et OP7 entre ces deux occurrences. Une deuxième question revient à déterminer le meilleur emplacement de ces deux occurrences dans l'agencement final de l'atelier pour leur permettre de réaliser les trois opérations requises.

Les notations utilisées tout au long de ce chapitre sont détaillées comme suit :

| | |
|---|---|
| *NL* | Nombre total des emplacements candidats dans l'atelier |
| $\boldsymbol{L_1, \dots, L_{NL}}$ | Emplacements disponibles |
| *NM* | Nombre de machines sélectionnées |
| *NSMo* | Nombre total des occurrences de toutes les machines |
| $\boldsymbol{NO[M_j]}$ | Nombre d'occurrences de la machine *j* |
| $\boldsymbol{PM_p[M_j]}$ | Matrice des machines sélectionnées pour le produit *p* |
| $\boldsymbol{M_{jo}}$ | Occurrence *o* de la machine *j* |
| $\boldsymbol{MinAD[M_{j1o1}][M_{j2o2}]}$ | Distance minimale acceptée entre l'occurrence *o1* de la machine *j1* et l'occurrence *o2* de la machine *j2* (si $j1 = j2$ alors $o1 \neq o2$) |
| $\boldsymbol{MaxAD[M_{j1o1}][M_{j2o2}]}$ | Distance maximale acceptée entre l'occurrence *o1* de la machine *j1* et l'occurrence *o2* de la machine *j2* (si $j1 = j2$ alors $o1 \neq o2$) |
| $\boldsymbol{P[M_{jo}]}$ | Position de l'occurrence *o* de la machine *j* |

Le problème étudié consiste à déterminer le meilleur agencement des machines reconfigurables sélectionnées par la gamme de fabrication d'un produit donné. Sachant que chaque type de machine peut avoir plusieurs occurrences (apparitions, duplications). Il s'agit donc d'affecter chaque occurrence de chaque

type de machine à un emplacement précis de l'atelier à concevoir. Notons qu'un agencement initial est généré suivant l'ordre d'apparition des machines dans la gamme de fabrication adoptée. Par exemple, si une machine $M_j$ est utilisée directement après une machine $M_j'$, alors la disposition choisie doit offrir la possibilité d'une connexion entre les deux machines. Ainsi, en se basant sur cet agencement initial ainsi que les contraintes imposées par la gamme de fabrication, nous définissons les distances maximales et minimales possibles entre les différentes machines et occurrences des machines. *Toutes ces informations vont permettre de définir l'importance d'une machine dans une gamme de fabrication*.

*Ainsi, notre problématique vise à déterminer le meilleur agencement des machines reconfigurables, en minimisant les pénalités relatives à la non-satisfaction des contraintes d'association machines – emplacements dans le système.*

### 5.2.1 Formulation mathématique

#### *A. Importance d'une machine dans la gamme de fabrication*

Une machine peut figurer plusieurs fois dans une gamme de fabrication afin de réaliser plusieurs opérations parmi les opérations nécessaires à la fabrication du produit. Cela dépend essentiellement de la capacité des machines à réaliser plusieurs opérations, mais aussi des critères de génération de la gamme de fabrication (flexibilité, robustesse, …).

Par conséquence, le nombre d'apparitions des différentes machines définit la dépendance de la gamme de fabrication par rapport à chaque machine. Il s'agit du degré d'importance de chaque machine (noté $MI(M_j)$) et chaque occurrence de la machine (noté $MOI(M_{jo})$), basé sur :

- Le nombre d'utilisations de la machine (respectivement occurrence de la machine) dans la gamme de fabrication.
- Le nombre d'interactions de la machine avec les autres machines de la gamme de fabrication.

Nous calculons dans un premier temps le degré d'importance des occurrences de chaque machine en utilisant l'équation (5-1) :

$$MOI(M_{jo}) = CP(M_{jo}) \times \sum_{k=1}^{NSM_o} \frac{MR[M_{jo}][M_{j'k}] + MR[M_{j'k}][M_{jo}]}{NO_p(M_j)} \qquad \textbf{(5-1)}$$

avec :

- $CP(M_{jo})$ : le nombre d'apparitions *o* de la machine *Mj* dans la gamme de fabrication adoptée.
- $MR[M_{jo}][M_{jk}]$ : la relation entre toutes les occurrences des machines utilisées dans la gamme de fabrication donnée par :

$$MR[M_{jo}][M_{j'k}] = \begin{cases} 1 & \text{Si l'occurrence } o \text{ de la machine j est suivie de l'occurrence } k \text{ de la machine j'} \\ 0 & \text{Sinon} \end{cases}$$

Nous calculons maintenant le degré d'importance de chaque machine, qui consiste à l'addition des degrés d'importance des occurrences (équation (5-2)) :

$$MI(M_j) = \sum_{k=1}^{NO[M_j]} MOI(M_{jk}) \quad \textbf{(5-2)}$$

Ce degré d'importance de chaque machine aide à déterminer la pénalité générée dans le cas où les besoins de la machine relatifs au positionnement ne sont pas satisfaits.

### *B. Les matrices de distances MinAD et MaxAD*

Les calculs des distances minimales et maximales entre les machines sélectionnées sont basés sur la gamme de fabrication et l'agencement initial généré.

La première étape consiste à identifier les occurrences retenues dans l'agencement initial et à calculer la distance à droite ($D^R$) et à gauche ($D^L$) entre ces occurrences. Les équations (5-3) et (5-4) donnent les expressions de la distance droite $D_{PI}^{R_k}$ et gauche $D_{PI}^{L_k}$ entre l'occurrence d'une machine *Mj* à la position PI et la position d'une occurrence k (de la même machine ou bien d'une autre machine)

$$D_{PI}^{R_k} = \begin{cases} |k - PI| & Si\ k \leq PI \\ [OPTN - k] + PI & Si\ k > PI \end{cases} \quad \textbf{(5-3)}$$

$$D_{PI}^{L_k} = \begin{cases} |k - PI| & Si\ k \geq PI \\ [OPTN - PI] + k & Si\ k < PI \end{cases} \quad \textbf{(5-4)}$$

avec :

- PI : l'indice de l'occurrence retenue par l'agencement initial dans la gamme de fabrication.
- $k \in 1..OPTN$

Pour calculer les distances MinAD et MaxAD entre deux machines données, nous considérons toutes leurs occurrences respectives comme suit :

$$MinAD[M_{jo}][M_{jo}'] = Min(D_{PI_{M_{jo}}}^{R_M_{jo}'}, D_{PI_{M_{jo}}}^{L_M_{jo}'}) \quad \textbf{(5-5)}$$

$$MaxAD[M_{jo}][M_{j'o}] = Max\left(D_{PI_{M_{jo}}}^{R_M_{j'o}}, D_{PI_{M_{jo}}}^{L_M_{j'o}}\right) \quad \textbf{(5-6)}$$

### *C. Pénalité pour non-satisfaction des contraintes d'agencement*

La notion de pénalité permet de mesurer le niveau de satisfaction des contraintes de la gamme de fabrication par l'agencement des machines reconfigurables mis en place. En effet, il s'agit de mesurer à quel point les emplacements choisis pour les occurrences des différentes machines respectent les distances maximales et minimales, tout en prenant en compte l'importance de l'occurrence des machines en question.

Par conséquent, notre problème consiste à minimiser la pénalité générée suite à non-satisfaction des contraintes exprimée par l'équation (5-7) comme suit :

$$Min\{Penalité\} = \sum_{j=1}^{NSMo} \sum_{k=1}^{NSMo} X_{jk} \times MOI(M_j) \quad \textbf{(5-7)}$$

avec :

- $X_{jk} = \begin{cases} 1, \text{ Si } MinAD[M_{jo}][M_{j'k}] \leq LoC[P(M_{jo})][P(M_{j'k})] \leq MaxAD[M_{jo}][M_{j'k}] \\ 0, \text{ Sinon} \end{cases}$

## 5.2.2 **Approche proposée**

Pour résoudre le problème d'agencement des machines dans un atelier reconfigurable, nous proposons une approche basée sur une heuristique de recherche exhaustive.

1. La première étape consiste à générer l'agencement initial basé sur la séquence d'utilisation des machines dans la gamme de fabrication. La Figure 5-2 illustre les différentes phases de la première étape.

   Dans le bloc (1), la condition vise à éviter si possible de mettre deux occurrences de la même machine dans deux emplacements adjacents. L'objectif est d'éviter une concentration des occurrences de la même machine dans une partie de l'agencement résultant.
2. Le bloc (2) procède à l'affectation des occurrences restantes dans les emplacements disponibles (en mettant l'indice de la machine dans le tableau *LA*[ ]).
3. Dans le bloc (3) l'objectif de s'assurer que toutes les occurrences de l'ensemble des machines reconfigurables sont placées dans le tableau *LA*[ ], c'est-à-dire que toutes les occurrences sont affectées à un emplacement de l'atelier. Dans le cas où le nombre d'utilisations d'une machine dans la gamme de fabrication est supérieur au nombre de ces occurrences, alors les opérations qui ne sont pas encore affectées, seront attribuées aux occurrences les plus proches, en se basant sur les matrices de distances *MinAD* et *MaxAD*.

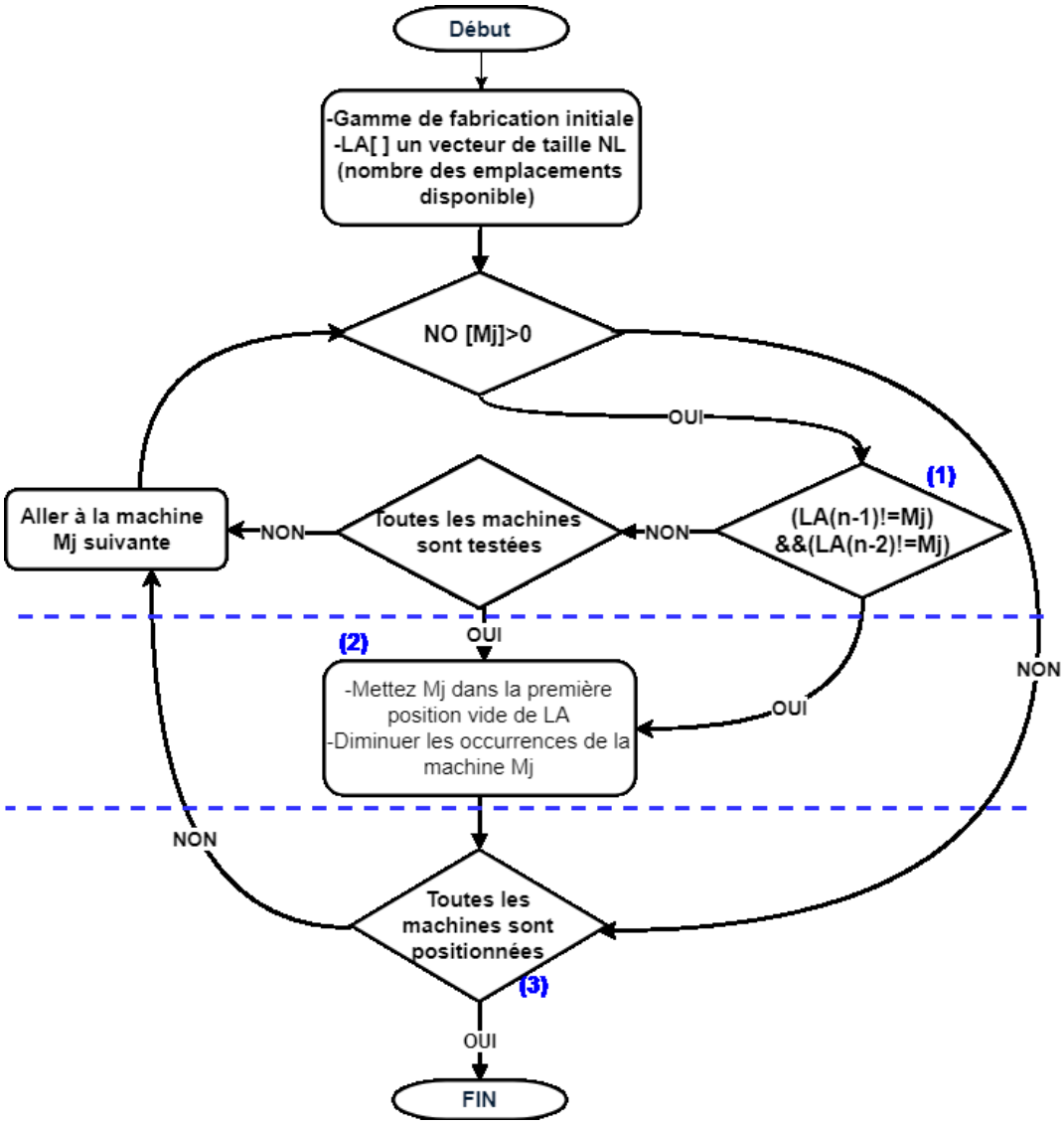



**Figure 5-2 Approche proposée : agencement initial**

Une fois l'agencement initial de l'atelier est généré par la première étape, l'heuristique de recherche exhaustive illustrée dans la Figure 5-3 déterminera le meilleur agencement qui répond au mieux aux contraintes de la gamme de fabrication. Elle peut être décrite comme suit :

- Données de départ : la gamme de fabrication et le nombre d'occurrences de chaque machine reconfigurable disponible.
- Bloc A : Génération de l'agencement initial (en suivant l'étape 1 de l'approche proposée, comme décrit ci-dessus) et création de la matrice de localisation *LA*[ ].

- Bloc B : Génération des matrices de distances *MinAD* et *MaxAD* et de l'importance des machines.
- Bloc C : Lancement de l'exploration et évaluation des solutions (agencements) candidats, à travers une recherche exhaustive qui permet de générer toutes les combinaisons d'agencement possibles.
- Pour terminer, l'heuristique permet de trouver parmi l'ensemble des solutions explorées, celle qui est la plus intéressante.

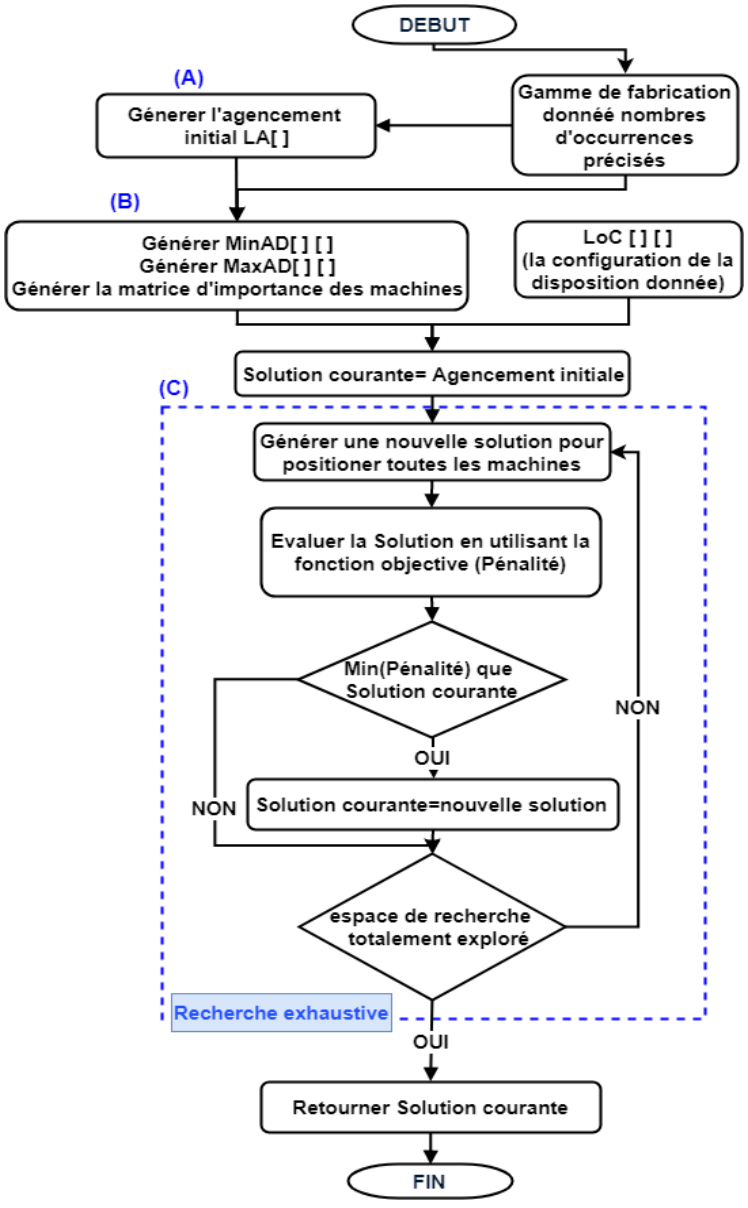



**Figure 5-3 Approche proposée : Heuristique d'agencement**

### 5.2.3 Expérience numérique

#### *A. Données du problème*

Pour montrer l'applicabilité de l'approche proposée, nous présentons un exemple d'un problème d'agencement de machines reconfigurables destinées à fabriquer un produit nécessitant 12 opérations différentes. Le Tableau 5-2 et le Tableau 5-3 détaillent respectivement la gamme de fabrication adoptée et le nombre d'occurrences disponibles pour chacune des machines reconfigurables sélectionnées.

**Tableau 5-2 La gamme de fabrication adoptée**

| **Opérations** | **OP3** | **OP5** | **OP4** | **OP1** | **OP8** | **OP2** | **OP10** | **OP7** | **OP11** | **OP6** | **OP2** | **OP9** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Machines** | M1 | M2 | M1 | M1 | M3 | M5 | M1 | M1 | M2 | M6 | M1 | M4 |

**Tableau 5-3 Nombre d'occurrences des machines sélectionnées**

| **Machine** | **M1** | **M2** | **M3** | **M4** | **M5** | **M6** |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Occurrences** | 3 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 |

Le Tableau 5-4 détaille une configuration (générée aléatoirement) d'un atelier destiné à accueillir les différentes occurrences des machines reconfigurables sélectionnées. Rappelons que le nombre d'emplacements candidats disponibles dans l'atelier est supérieur ou égal au nombre total des occurrences des machines sélectionnées dans la gamme de fabrication. Dans ce cas d'étude, l'atelier dispose de 9 emplacements candidats pour accueillir au maximum les 9 occurrences des 6 machines sélectionnées.

**Tableau 5-4 Matrice de localisation**

| | **L1** | **L2** | **L3** | **L4** | **L5** | **L6** | **L7** | **L8** | **L9** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **L1** | 0 | 3 | 4 | 5 | 7 | 6 | 8 | 1 | 1 |
| **L2** | 3 | 0 | 2 | 4 | 5 | 6 | 8 | 3 | 3 |
| **L3** | 4 | 2 | 0 | 6 | 7 | 5 | 8 | 1 | 2 |
| **L4** | 5 | 4 | 6 | 0 | 2 | 7 | 4 | 3 | 2 |
| **L5** | 7 | 5 | 7 | 2 | 0 | 8 | 4 | 2 | 1 |
| **L6** | 8 | 6 | 5 | 7 | 8 | 0 | 6 | 3 | 1 |
| **L7** | 6 | 8 | 8 | 4 | 4 | 6 | 0 | 5 | 7 |
| **L8** | 1 | 3 | 1 | 3 | 2 | 3 | 5 | 0 | 5 |
| **L9** | 1 | 3 | 2 | 2 | 1 | 1 | 7 | 5 | 0 |

Le Tableau 5-5 détaille l'agencement initial *LA [ ]* (généré à partir du Tableau 5-2 et du Tableau 5-3) et l'indice d'importance de chaque occurrence de machine.

**Tableau 5-5 Agencement initial**

| Emplacement candidat | L1 | L2 | L3 | L4 | L5 | L6 | L7 | L8 | L9 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Occurrence machine | M1_1 | M2_1 | M3_1 | M5_1 | M1_2 | M2_2 | M6_1 | M1_3 | M4_1 |
| Indice d'importance | 5 | 1 | 2 | 2 | 2.66 | 1 | 2 | 0.66 | 1 |

Les matrices de distances *MinAD* (Tableau 5-6) et *MaxAD* ( Tableau 5-7) sont générées par l'heuristique à partir de la gamme de fabrication du Tableau 5-2.

**Tableau 5-6 Matrice MinAD**

| | M1_1 | M1_2 | M1_3 | M2_1 | M2_2 | M3_1 | M4_1 | M5_1 | M6_1 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **M1_1** | 0 | 3 | 2 | 1 | 4 | 1 | 1 | 2 | 3 |
| **M1_2** | 3 | 0 | 3 | 5 | 1 | 2 | 4 | 1 | 2 |
| **M1_3** | 2 | 3 | 0 | 3 | 2 | 6 | 1 | 5 | 1 |
| **M2_1** | 1 | 5 | 3 | 0 | 5 | 3 | 2 | 4 | 4 |
| **M2_2** | 4 | 1 | 2 | 5 | 0 | 4 | 3 | 3 | 1 |
| **M3** | 1 | 2 | 6 | 3 | 4 | 0 | 5 | 1 | 5 |
| **M4** | 1 | 4 | 1 | 2 | 3 | 5 | 0 | 6 | 2 |
| **M5** | 2 | 1 | 5 | 4 | 3 | 1 | 6 | 0 | 4 |
| **M6** | 3 | 2 | 1 | 4 | 1 | 5 | 2 | 4 | 0 |

**Tableau 5-7 Matrice MaxAD**

| | M1_1 | M1_2 | M1_3 | M2_1 | M2_2 | M3_1 | M4_1 | M5_1 | M6_1 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **M1_1** | 0 | 9 | 10 | 11 | 8 | 11 | 11 | 10 | 9 |
| **M1_2** | 9 | 0 | 9 | 7 | 11 | 10 | 8 | 11 | 10 |
| **M1_3** | 10 | 9 | 0 | 9 | 10 | 6 | 11 | 7 | 11 |
| **M2_1** | 11 | 7 | 9 | 0 | 7 | 9 | 10 | 8 | 8 |
| **M2_2** | 8 | 11 | 10 | 7 | 0 | 8 | 9 | 9 | 11 |
| **M3** | 11 | 10 | 6 | 9 | 8 | 0 | 7 | 11 | 7 |
| **M4** | 11 | 8 | 11 | 10 | 9 | 7 | 0 | 6 | 10 |
| **M5** | 10 | 11 | 7 | 8 | 9 | 11 | 6 | 0 | 8 |
| **M6** | 9 | 10 | 11 | 8 | 11 | 7 | 10 | 8 | 0 |

### *B. Résultats et discussion*

En se basant sur les matrices des distances et des localisations, l'heuristique explore l'espace des solutions pour déterminer le meilleur agencement possible. Le Tableau 5-8 présente le résultat obtenu par notre heuristique et détaille les trois meilleurs agencements trouvés ainsi que leurs pénalités respectives. Il est important de rappeler que les emplacements sont positionnés selon la matrice des locations.

**Tableau 5-8 Résultat de l'agencement**

| Agencement | L1 | L2 | L3 | L4 | L5 | L6 | L7 | L8 | L9 | Pénalité |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | M5_1 | M1_1 | M3_1 | M6_1 | M2_2 | M4_1 | M2_1 | M1_3 | M1_2 | 11 |
| 2 | M4_1 | M2_2 | M6_1 | M1_1 | M3_1 | M1_2 | M2_1 | M1_3 | M5_1 | 11.66 |
| 3 | M3_1 | M1_2 | M5_1 | M4_1 | M6_1 | M2_1 | M2_2 | M1_3 | M1_1 | 12.34 |

Ces trois agencements sont considérés comme les meilleures solutions puisqu'ils génèrent des pénalités inférieures à celles générées par le reste des solutions. Nous remarquons que l'heuristique a d'abord satisfait les exigences de la machine la plus importante pour la gamme de fabrication puis a tenté de minimiser la pénalité engendrée par le placement des occurrences des machines les moins importantes.

En effet, la machine la plus importante dans ce scénario est M1, qui est la machine la plus utilisée dans le la gamme de fabrication. En revanche, même si elle possède trois occurrences, ce nombre d'occurrences n'est pas suffisant pour satisfaire les besoins de la gamme (car M1 est affectée à 6 opérations). L'importance de cette machine est donc plus grande que le reste des machines, avec *MI (M1)* = 8.32.

Le reste des machines ont le même indice d'importance (égal à 2), sauf pour M4 avec *MI* = 1, en raison de son interaction limitée avec les autres machines (M4 est la dernière machine à opérer sur le produit). Ici, nous remarquons que la gamme de fabrication ne dépend pas beaucoup de la machine M2, même si cette dernière possède plus d'occurrences que le reste des machines. Enfin, nous remarquons aussi qu'un petit changement dans l'agencement des machines peut augmenter la pénalité, ce qui indique que le positionnement des machines dans l'atelier peut affecter considérablement les performances du système de production tout entier.

## 5.3 Effort d'évolution d'un RMS dans une famille de produits

Un RMS est conçu pour fabriquer un produit précis, en intégrant une aptitude d'évolution vers d'autres produits de la même famille. Cette aptitude s'appuie essentiellement sur les capacités de reconfiguration offertes par les machines reconfigurables. En complément de la première partie, nous visions dans cette seconde partie le développement d'une approche d'aide à la décision permettant d'assurer la meilleure transition entre les gammes de fabrication de plusieurs produits de la même famille, tout en conservant les performances de chaque gamme.

Nous considérons un RMS composé de plusieurs machines reconfigurables, ayant la capacité de fabriquer plusieurs produits de la même famille. Chaque machine reconfigurable dispose d'une ou plusieurs occurrences à intégrer dans l'atelier selon les besoins et exigences de la gamme de fabrication de chaque produit. Notons que les gammes de fabrication sont connues et suivent la structure simplifiée détaillée à travers le Tableau 5-1.

Les notations utilisées pour cette deuxième partie sont résumées comme suit :

| | |
|---|---|
| *NP* | Nombre de produits dans la famille de produits |
| *NPM* | Nombre de machines candidates utilisées pour générer les gammes de fabrication initiales pour chaque produit de la famille de produits |
| *NMf* | Nombre de machines sélectionnées distinctes pour la famille de produits |
| $M_1, \dots, M_{NMf}$ | Machines disponibles |
| $NSM_p$ | Nombre de machines sélectionnées pour le produit *p* |
| $NO_p[M_j]$ | Nombre d'occurrences de la machine *j* sélectionnées le produit *p* |
| *TFOP* | Nombre de toutes les opérations de la famille de produits |
| $OPTN_p$ | Nombre total d'opérations pour le produit *p* |
| $OP_1^p, \dots, OP_{OPTNp}^p$ | Opérations du produit *p* |
| $C_l^j(u)$ | La configuration *l* de la machine *j* réalisant l'opération *u* |
| $M_j(OP_u^p)$ | L'opération u du produit p est réalisée sur la machine j |
| $PrTime_j[M_j][OP_u^p]$ | Temps de traitement de l'opération *u* du produit *p* sur la machine $M_j$ |
| $PM_p[M_j]$ | Matrice des machines sélectionnées pour le produit *p* |
| $MTOP[OP_u^p]$ | Matrice des outils requis pour l'opération u du produit *p* |
| $PRM[OP_u^p]\,[OP_{u'}^p]$ | Matrice de précédence des opérations de produit *p* |

Dans le but d'augmenter la réactivité du système face à l'évolution des caractéristiques du produit à fabriquer, il est nécessaire de concevoir un RMS offrant des capacités permettant d'accroître le nombre d'alternatives dans les gammes de fabrication générées. *Ainsi, pour répondre au mieux aux changements et évolutions des produits, nous proposons une approche visant à faciliter le partage des ressources (les machines reconfigurables) existantes lors de l'intégration d'un nouveau produit. Il s'agit de favoriser l'utilisation des machines reconfigurables dans les gammes de fabrication des différents produits d'une même famille.* Cependant, il est nécessaire de noter que le partage de ressources est anticipé dès la première phase de conception du RMS, c'est-à-dire lors de la sélection des machines pour fabriquer le produit initial (premier produit). Ce partage doit prendre en considération plusieurs notions :

- La notion d'inclusion des fonctionnalités entre les machines. Elle consiste à choisir des machines avec des fonctionnalités plus riches par rapport aux besoins du produit initial, offrant ainsi les fonctionnalités nécessaires pour fabriquer le produit initial, mais aussi d'autres fonctionnalités supplémentaires pouvant faciliter l'évolution (la transition) vers d'autres produits.
- La notion de préservation des capacités du système en matière de : (i) l'équilibre des charges et de (ii) la présence des machines alternatives. Il s'agit de prendre en considération les risques encourus

avec la notion d'inclusion des fonctionnalités supplémentaires. Ces risques sont relatifs au déséquilibre des charges entre les machines sélectionnées et la réduction des nombres d'alternatives de remplacements des machines.

Prenons l'exemple suivant : nous avons deux machines M1 et M2 sélectionnées dans la gamme de fabrication du produit initial. De plus, nous possédons une autre machine M3 qui offre un panel de fonctionnalités incluant celles offertes par M1 et M2.

Ainsi, en suivant la notion d'inclusion des fonctionnalités, la machine M3 sera intégrée dans le RMS au lieu des machines M1 et M2. Cette intégration peut engendrer :

- La concentration des opérations : toutes les opérations à réaliser par M1 et M2 seront réalisées par la machine M3.
- La réduction du nombre d'alternatives : toutes les machines pouvant être remplacées par M1 ou M2 (suite à une indisponibilité par exemple) seront remplacées par M3.

- La notion de diversité des machines. Elle consiste à sélectionner des machines avec des capacités partiellement similaires dans le but de réduire les exclusivités dans les relations opérations – machines. Cela permettra de diminuer le risque de déséquilibre des charges et le risque d'absence de machines de remplacements.

La Figure 5-4 décrit le concept d'inclusion sur un ensemble de trois machines. Nous remarquons que les fonctionnalités de la machine M2 sont incluses dans celles de la machine M1. Cela signifie que les opérations à réaliser par la machine M2 peuvent être effectuées par la machine M1. Par conséquent, la question qui se pose consiste à évaluer la pertinence du remplacement de M2 par M1 dans toutes les gammes de fabrication concernées. Il s'agit de trouver le compromis entre, d'un côté le besoin de minimiser l'effort d'évolution entre les produits et de l'autre côté, les risques encourus liés à l'équilibre des charges et la présence des machines alternatives.

Ainsi, le problème étudié dans cette deuxième partie peut être exprimé sous la forme d'un problème multicritère visant à : (1) minimiser l'effort d'évolution du système lors de la transition d'un produit vers un produit autre de la même famille, (2) maximiser l'utilisation moyenne des machines afin de réduire au mieux le déséquilibre des charges et (3) maximiser la présence des machines de remplacement dans les gammes de fabrication de la famille de produits.

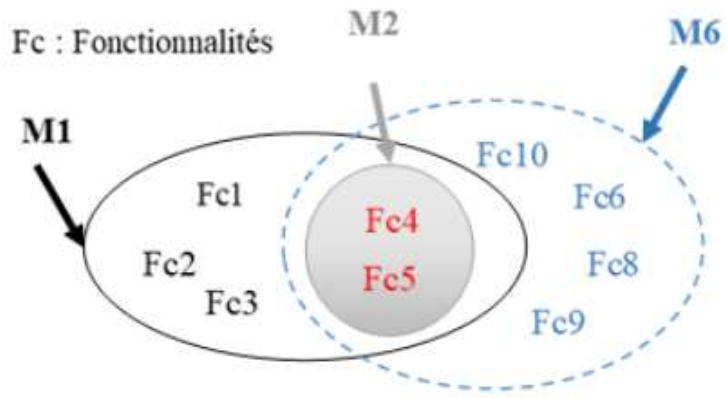



**Figure 5-4 Concept d'inclusion des fonctionnalités des machines**

### 5.3.1 Formulation mathématique

#### *A. Utilisation moyenne des machines par produit*

En prenant en compte les contraintes de fabrication au niveau d'une famille de produits, il est très probable d'avoir des situations de déséquilibre de charge sur les différentes machines sélectionnées. Ce genre de situation est dû à la différence des capacités des machines à accomplir plusieurs opérations parmi l'ensemble des opérations requises par la gamme de fabrication. Cette situation est provoquée aussi par le nombre des opérations communes entre l'ensemble des produits de la même famille. Dans ce contexte, il est nécessaire d'équilibrer au mieux l'utilisation des machines pour les différents produits.

L'équation (5-8) exprime la fréquence d'utilisation de la machine *Mj* par un produit *p* de la famille de produits :

$$MUF_p(\mathrm{M_j}) = \left(\frac{\mathrm{NO_p(M_j)}}{OPTN_p}\right) \times \sum_{u=0}^{OPTN_p} \left(\alpha_j\left(OP_u^p\right) \times M_j\left(OP_u^p\right)\right) \qquad \textbf{(5-8)}$$

avec :

$$M_j\left(OP_u^p\right) = \begin{cases} 1, & \text{Si la machine } Mj \text{ peut accomplir l'opération } u \text{ du produit } p \\ 0, & Sinon \end{cases}$$

$$\alpha_j\left(OP_u^p\right) = \begin{cases} 1, & \text{Si la machine } Mj \text{ est désignée pour accomplir l'opération } u \text{ du produit } p \\ 0, & Sinon \end{cases}$$

Ainsi, notre premier critère consiste à maximiser l'équilibre entre les utilisations moyennes des machines par une famille de produits. Elle est exprimée par l'équation (5-9) comme suit :

$$Max\{\ AMUP\ \} = \left(\frac{1}{NP \times NMf}\right) \sum_{j=1}^{NMf} \sum_{p=0}^{NP} MUF_p(\mathrm{M_j}) \qquad \textbf{(5-9)}$$

### *B. Machines alternatives*

Comme nous avons pu constater dans le troisième chapitre ainsi que tout au long du manuscrit, chaque opération de chaque produit peut être réalisée par une ou plusieurs machines. Ainsi, pour garantir la présence de machines de remplacement pour les différents produits d'une même famille, et en se basant sur la gamme de fabrication donnée initialement pour chaque produit ; nous pouvons calculer le nombre des machines de remplacement pour toute la famille de produits en utilisant l'équation (5-10).

$$Max\ \{MRP\} = \frac{1}{NP} \sum_{p=0}^{NP} \left( \frac{1}{OPTN_p \times NSM_p} \sum_{u=0}^{OPTN_p} \sum_{j=0}^{NSM_p} \left( M_j\left(OP_u^p\right) \times NO_p(M_j) \right) \right) \qquad \textbf{(5-10)}$$

L'équation (5-10) exprime notre deuxième critère qui consiste à maximiser le nombre des machines alternatives capables de remplacer les autres machines sélectionnées dans la gamme de fabrication de chaque produit.

### *C. Effort d'évolution*

À travers ce troisième critère, il est question de minimiser l'effort consenti par le système suite à l'évolution des contraintes de la fabrication engendrée par le changement de produit. En effet, un changement de produit peut entrainer la sélection de nouvelles machines et la suppression d'autres machines existantes. Nous avons donc défini l'effort d'évolution d'un RMS en se basant sur deux notions : la similitude et la différence des machines sélectionnées pour fabriquer les différents produits.

- Similitudes des machines

La similitude entre deux machines est le nombre et le type de changements de configuration entre ces deux machines. Elle peut être définie comme suit :

> Tout d'abord, nous définissons la matrice de similarité des machines (notée *MSim*) en se basant sur le fait que les machines reconfigurables sont composées de modules de bases (des modules fixes non modifiables) et des modules auxiliaires qui forment les différentes configurations possibles de chaque machine. Ainsi, deux machines peuvent disposer de modules de bases similaires, mais pas nécessairement les mêmes configurations.

La similitude entre deux machines $M_j$ et $M_k$ est exprimé par l'équation (5-11) comme suit :

$$SimM[M_j][M_k] = \beta(\mathrm{j,k}) - \frac{\beta(\mathrm{j,k}) \times \left|Nconf_j - Nconf_k\right|}{Nconf_j + Nconf_k} \qquad \textbf{(5-11)}$$

avec :

$$\beta(j,k) = \begin{cases} 1, & \text{Si les machines } j \text{ et } k \text{ ont les mêmes modules de bases} \\ 0, & Sinon \end{cases}$$

$k, j \in 1..NPM$

$Nconf_j$ : Nombre de configurations de la machine j

La similarité moyenne entre les machines sélectionnées pour réaliser un produit donné de la famille de produits est donnée par l'équation (5-12) :

$$PSimM_p = \frac{1}{NSM_p} \sum_{j=1}^{NSM_p-1} \sum_{k=j+1}^{NSM_p} SimM[M_j][M_k] \quad \textbf{(5-12)}$$

- Différence de type des machines sélectionnées

Le deuxième aspect considéré dans l'évaluation de l'effort d'évolution concerne la différence entre les types de machines sélectionnées pour chaque produit. Pour cela, il est nécessaire de déterminer les types de machines utilisés pour chaque produit (*SMT*), le nombre de machines supprimées (*RM*), et le nombre de celles qui sont ajoutées (*AM*), en passant d'un produit à un autre.

En se basant sur la matrice des associations produits – machines, les expressions de *SMT*, *RM* et *AM* sont données par les équations (5-13), (5-14) et (5-15) comme suit :

$$SMT = \sum_{j=0}^{NM} Max(PM_p[M_j], PM_{p'}[M_j]) \quad \textbf{(5-13)}$$

$$RM = \sum_{j=0}^{NM} Max(PM_p[M_j] - PM_{p'}[M_j], 0) \quad \textbf{(5-14)}$$

$$AM = \sum_{j=0}^{NM} |Min(PM_p[M_j] - PM_{p'}[M_j], 0)| \quad \textbf{(5-15)}$$

avec :

$$PM_p(M_j) = \begin{cases} 1, & \text{Si le produit } p \text{ est réalisé par la machine } j \\ 0, & \text{Sinon} \end{cases}$$

En utilisant les équations (5-13), (5-14) et (5-15), la différence de type des machines sélectionnées (*SMDif*) en passant d'un produit à l'autre est exprimée par l'équation (5-16) :

$$SMDif_p = \frac{AM + RM}{SMT} \quad \textbf{(5-16)}$$

De plus, en utilisant les équations (5-12) et (5-16), nous pouvons formuler notre troisième critère par l'équation (5-17).

$$Min\{\ LEE\ \} = \frac{1}{NP}\sum_{p=1}^{NP}\left(\frac{SMDif_p}{PSimM_p}\right) \quad \textbf{(5-17)}$$

### 5.3.2 Approche proposée

Comme pour le chapitre 3, nous avons opté pour une adaptation de la métaheuristique AMOSA pour résoudre notre problème multicritère. Comme mentionné auparavant (voir les chapitres 3 et 4), le codage des solutions manipulées par la métaheuristique AMOSA représente une étape très cruciale qui affecte le processus de recherche des meilleures solutions. Dans notre cas, nous avons choisi une représentation des solutions en nombres entiers. Chaque nombre représente une des machines utilisées dans les gammes de fabrication de la famille de produits.

Le Tableau 5-9 présente un exemple d'une gamme de fabrication simplifiée (ne mentionnant que les relations opérations – machines). Cette gamme de fabrication sera codée sous la forme d'un vecteur composé de 5 nombres entiers : 1, 2, 4, 10 représentant respectivement M1, M2, M4 et M10

Notons que, même si une machine figure plusieurs fois dans la gamme, la solution codée ne contiendra pas toutes les occurrences de cette machine. Par exemple, dans la gamme du Tableau 5-9 la machine M1 est utilisée deux fois, mais ne sera présente qu'une seule fois dans la solution codée.

**Tableau 5-9 Gamme de fabrication pour le produit *P1***

| Opération | OP2 | OP5 | OP1 | OP14 | OP7 | OP9 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Machines désignées | M2 | M10 | M1 | M10 | M1 | M4 |

Une fois implémentée, AMOSA cherche les meilleures solutions en se basant sur une méthode de perturbations pour générer de nouvelles solutions. Dans notre cas, la méthode de perturbation est basée sur la matrice d'inclusion de taille $NPM \times NPM$ (Tableau 5-10). Cette matrice détaille les relations d'inclusion entre les fonctionnalités des différentes machines.

En se basant sur le concept d'inclusion des performances, l'objectif consiste à déterminer si une machine $M_i$ sélectionnée dans la gamme de fabrication peut être remplacée par une autre machine $M_j$, telles que toutes les fonctionnalités $M_i$ sont incluses dans l'ensemble des fonctionnalités de $M_j$.

Le Tableau 5-10 présente une matrice d'inclusion entre un ensemble de 10 machines reconfigurables. À titre d'exemple, les fonctionnalités de la machine M1 ne sont incluses dans aucune des 9 autres machines

(ligne 1). Cependant, les fonctionnalités offertes par la machine M5 sont incluses dans celles offertes par la machine M7 (ligne 5).

**Tableau 5-10 Matrice d'inclusion des machines**

| | M1 | M2 | M3 | M4 | M5 | M6 | M7 | M8 | M9 | M10 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| M1 | 1 | | | | | | | | | |
| M2 | 1 | 1 | 1 | | 1 | 1 | 1 | | | |
| M3 | | | 1 | | | 1 | 1 | | 1 | |
| M4 | 1 | | | 1 | 1 | | 1 | 1 | 1 | |
| M5 | | | | | 1 | | 1 | | | |
| M6 | | | | | | 1 | | | | |
| M7 | | | | | | | 1 | | | |
| M8 | 1 | | | | 1 | | 1 | 1 | 1 | |
| M9 | | | | | | | 1 | | 1 | |
| M10 | | | | | 1 | 1 | 1 | | 1 | 1 |

### 5.3.3 Expérience numérique

Cette section présente une expérience numérique permettant d'illustrer l'approche proposée pour la prise en compte de l'évolution des produits lors de sélection des machines reconfigurables.

#### *A. Données du problème*

Nous considérons une famille de trois produits *P1, P2* et *P3*, avec respectivement 6, 8 et 7 opérations. Le nombre total des opérations différentes requises pour l'ensemble des produits est *TFOP* = 14. Le Tableau 5-9, le Tableau 5-11 et le Tableau 5 12 détaillent respectivement les gammes de fabrication des produits *P1*, *P2* et *P3*.

**Tableau 5-11 Gamme de fabrication pour le produit *P2***

| Opération | OP1 | OP7 | OP6 | OP10 | OP2 | OP13 | OP11 | OP8 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Machine | M1 | M2 | M8 | M4 | M2 | M10 | M3 | M4 |

**Tableau 5-12 Gamme de fabrication pour le produit *P3***

| Opération | OP3 | OP5 | OP2 | OP12 | OP6 | OP4 | OP7 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Machine | M9 | M6 | M1 | M9 | M1 | M8 | M2 |

La solution codée, qui constitue la solution initiale pour AMOSA, est construite en se basant sur le Tableau 5-9, le Tableau 5-11 et le Tableau 5 12. Elle comporte l'ensemble des machines sélectionnées dans les gammes des différents produits (Tableau 5-13). Les valeurs de nos trois critères pour cette solution sont représentées dans le Tableau 5-14 .

**Tableau 5-13 Solution d'entrée**

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| PP (P1) | M1 | M2 | M4 | M10 | - | - |
| PP (P2) | M1 | M2 | M3 | M4 | M8 | M10 |
| PP (P3) | M1 | M2 | M6 | M8 | M9 | - |

**Tableau 5-14 Valeurs des trois critères pour la solution d'entrée**

| AMUP | MRP | LEE |
|---|---|---|
| 0.275 | 1.605 | 12.381 |

Le Tableau 5-15 fournit le nombre des occurrences de chaque machine dans la fabrication des trois produits.

Le Tableau 5-16 détaille le nombre de configurations disponibles $NC_j$ pour chaque machine.

**Tableau 5-15 Occurrences des machines par produit**

| Machine $j$ | M1 | M2 | M3 | M4 | M5 | M6 | M7 | M8 | M9 | M10 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $NO_{P1}[M_j]$ | 2 | 2 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| $NO_{P2}[M_j]$ | 2 | 1 | 3 | 3 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 3 |
| $NO_{P3}[M_j]$ | 4 | 3 | 0 | 0 | 0 | 3 | 0 | 2 | 2 | 0 |

**Tableau 5-16 Nombre de configurations par machine**

| Machine $j$ | M1 | M2 | M3 | M4 | M5 | M6 | M7 | M8 | M9 | M10 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $NC_j$ | 3 | 2 | 3 | 1 | 5 | 3 | 6 | 2 | 3 | 2 |

Le Tableau 5-17 détaille la matrice de similarité (*MSim)* entre toutes les machines candidates utilisées pour générer les gammes de fabrication initiales.

**Tableau 5-17 Matrice de similarités MSim**

| | M1 | M2 | M3 | M4 | M5 | M6 | M7 | M8 | M9 | M10 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| M1 | 1 | 0.8 | 0 | 0.5 | 0.75 | 0 | 0.67 | 0.8 | 0 | 0 |
| M2 | 0.8 | 1 | 0.8 | 0 | 0.57 | 0.8 | 0.5 | 0 | 0 | 0 |
| M3 | 0 | 0.8 | 1 | 0.5 | 0 | 1 | 0.67 | 0 | 1 | 0 |
| M4 | 0.5 | 0 | 0.5 | 1 | 0.33 | 0 | 0.28 | 0.66 | 0.5 | 0 |
| M5 | 0.75 | 0.57 | 0 | 0.33 | 1 | 0 | 0.9 | 0.57 | 0 | 0.57 |
| M6 | 0 | 0.8 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0.8 |
| M7 | 0.67 | 0.5 | 0.67 | 0.28 | 0.9 | 0 | 1 | 0.5 | 0.66 | 0.5 |
| M8 | 0.8 | 0 | 0 | 0.66 | 0.57 | 0 | 0.5 | 1 | 0.8 | 0 |
| M9 | 0 | 0 | 1 | 0.5 | 0 | 0 | 0.66 | 0.8 | 1 | 0.8 |
| M10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.57 | 0.8 | 0.5 | 0 | 0.8 | 1 |

Le Tableau 5-18 détaille les relations entre les différentes opérations et les machines candidates utilisées pour la génération des gammes de fabrications initiales. À travers ce tableau, AMOSA détermine les machines de remplacements potentielles.

**Tableau 5-18 Relations machine-opération**

| | M1 | M2 | M3 | M4 | M5 | M6 | M7 | M8 | M9 | M10 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| OP1 | 1 | 1 | 1 | | 1 | 1 | 1 | | 1 | |
| OP 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | |
| OP 3 | | | | | | 1 | 1 | | 1 | |
| OP 4 | 1 | | | | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | |
| OP 5 | 1 | | | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| OP 6 | 1 | 1 | 1 | | 1 | 1 | 1 | | 1 | |
| OP 7 | 1 | 1 | 1 | | 1 | 1 | 1 | | 1 | |
| OP 8 | 1 | | | 1 | 1 | | 1 | 1 | 1 | |
| OP 9 | 1 | | | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| OP10 | 1 | | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | |
| OP11 | | | 1 | | 1 | 1 | 1 | | 1 | 1 |
| OP12 | 1 | 1 | 1 | | 1 | 1 | 1 | | 1 | |
| OP13 | | | 1 | | 1 | 1 | 1 | | 1 | 1 |
| OP14 | 1 | | | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |

### *B. Résultats et discussions*

Les résultats obtenus avec AMOSA se présentent sous forme d'un ensemble des solutions non dominées (Front de Pareto). Dans ce cas, le choix est laissé au décideur pour sélectionner la meilleure solution selon ses préférences. Pour mieux expliquer notre approche, nous détaillons une solution trouvée par AMOSA présentée dans le Tableau 5-19. Les valeurs de nos trois critères pour cette solution sont présentées dans le Tableau 5-20 ;

**Tableau 5-19 Solution proposée par AMOSA**

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| PP (P1) | M1 | M6 | M1 | M10 | - | - |
| PP (P2) | M1 | M6 | M6 | M1 | M8 | M10 |
| PP (P3) | M1 | M6 | M6 | M8 | M9 | - |

**Tableau 5-20 Valeurs des critères pour la solution AMOSA**

| AMUP | MRP | LEE |
|---|---|---|
| 0.371 | 1.409 | 8.875 |

Plusieurs observations peuvent être faites sur la solution décrite par le Tableau 5-19 :

1. Trois machines ont été remplacées par deux autres machines incluant leurs fonctionnalités respectives. En effet M2 et M3 ont été remplacées par M6 tandis que M4 a été remplacée par M1.
2. La notion d'inclusion a été réalisée, mais sans le recours à des machines supplémentaires (non sélectionnées dans les gammes de fabrication initiales). En effet même si M2, M3 et M4 sont remplacées par M6 et M1, nous remarquons que ces deux machines remplaçantes figurent initialement dans les gammes de fabrication (Tableau 5-9, Tableau 5-11 et Tableau 5-12). En revanche, des machines ayant des fonctionnalités plus riches ne sont pas introduites dans les versions finales des gammes de fabrication. Par exemple M7 n'est pas choisie, bien que ses fonctionnalités incluent celles de M2, M3 et M4.
3. Les machines M8 et M10 ne sont pas supprimées, même si leurs fonctionnalités sont offertes respectivement par M1 et M6, elles sont sélectionnées dans les gammes de fabrications finales. En effet, le remplacement de M8 et M10 par M1 et M6 peut générer une concentration des opérations réalisées par ces deux machines. De telle situation diminuera le nombre des alternatives suite aux indisponibilités de M1 ou M6 ce qui affectera certainement les performances globales du système.

Pour terminer, la comparaison entre les valeurs des trois critères de la solution initiale (Tableau 5-13) et la solution retenue (Tableau 5-19) montre que l'effort d'évolution (LEE) a été considérablement réduit tout en garantissant une bonne performance du système relative à l'augmentation de l'utilisation moyenne des machines sélectionnées pour la famille de produits (AMUP) mais une légère dégradation du critère relatif au machines alternatives (MRP).

## 5.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié les relations qui lient un système reconfigurable à son environnement à la fois physique avec l'étude de l'agencement d'un RMS, et logique, à travers l'étude de l'évolution d'un RMS par rapport aux contraintes de la famille de produits pour laquelle il est conçu.

Dans la première partie, nous avons mis l'accent sur le manque de travaux de recherche traitant la problématique d'agencement des RMS. Dans ce cadre, nous avons proposé une heuristique permettant de déterminer les meilleures affectations des machines aux différentes dispositions d'un atelier.

Dans la deuxième partie, nous nous sommes intéressés aux contraintes résultantes de l'évolution d'un RMS pour fabriquer un nouveau produit. Cette étude est basée sur le principe qu'un RMS est conçu pour fabriquer

un type de produit, mais doit englober les fonctionnalités qui lui permettent d'évoluer pour fabriquer d'autres produits de la même famille. Nous avons proposé une adaptation de la métaheuristique AMOSA pour résoudre un problème multicritère, visant à maximiser l'équilibre des charges entre les machines, à maximiser la présence des machines alternatives et à minimiser l'effort d'évolution.

Les travaux présentés dans ce chapitre sont en cours d'extension. Nous visons par la suite l'intégration des deux problématiques, en étudiant l'impact de l'évolution des produits sur la composition et l'agencement du système.

# Conclusion générale

Nous avons étudié dans le cadre de cette thèse la *problématique de conception des systèmes manufacturiers reconfigurables* (Reconfigurable Manufacturing System – RMS). Attesté par plusieurs industriels, une des caractéristiques clés de la réalisation de l'usine de futur est le développement des systèmes manufacturiers changeables et reconfigurables. Le RMS est défini sur les bases des hauts niveaux de réactivité et d'efficacité, et répond parfaitement aux nouvelles exigences de l'industrie du futur. L'objectif consiste à concevoir des systèmes réactifs en se basant sur leur caractéristique clé, à savoir la *reconfigurabilité*. De plus, vu sa capacité à réagir rapidement aux changements avec le minimum de coût par rapport aux autres systèmes manufacturiers, le RMS est classifié comme étant un paradigme manufacturier changeable qui est plus adapté pour faire face aux exigences de l'environnement manufacturier actuel. Ceci est possible grâce à la conception des RMSs qui intègre dès le départ l'évolutivité, la reconfigurabilité ainsi que les changements aux niveaux des fonctionnalités et/ou de ses capacités

Motivés par ces aspects, nous avons proposé dans le cadre de cette thèse d'intégrer et de quantifier les caractéristiques clés de la reconfigurabilité afin d'identifier les outils et les méthodologies nécessaires pour une meilleure conception (assurant la réactivité) des RMSs. Pour s'y faire, nous nous sommes basés sur *la génération des gammes de fabrication au niveau macro* qui réfère à la sélection de la meilleure séquence des différentes étapes du processus, des configurations et de la sélection des machines. Dans ce contexte nous avons abordé trois problématiques liées à savoir :

1. La prise en compte explicite de la modularité des machines à outils reconfigurables (RMTs) lors de la phase de conception d'un RMS. L'objectif est de générer et sélectionner les meilleures gammes de fabrication nécessaires lors de cette phase de conception. Un modèle mathématique multicritère a été proposé afin de maximiser la modularité du système (en proposant un nouvel indicateur de modularité), de minimiser le temps d'achèvement de la dernière opération sur la dernière machine de la gamme de fabrication (appelé Completion Time en anglais) et de minimiser le coût totale du système incluant les coûts de changement des configurations des machines, les coûts d'utilisation des modules pour ces configurations et les coûts d'exploitation des machines. De plus, nous avons adapté une technique de codage en nombres réels permettant d'éviter les solutions non réalisables lors de l'utilisation de la métaheuristique AMOSA pour résoudre notre problème d'optimisation. La méthode TOPSIS a été utilisée par la suite pour choisir la meilleure solution (gamme de fabrication) selon les préférences du décideur. Un exemple numérique a été donné afin d'illustrer l'applicabilité de notre approche de résolution
2. La prise en compte explicite des contraintes d'indisponibilité des machines à outils reconfigurables (RMTs) et leurs interactions lors de la conception d'un RMS. Dans un premier temps, nous avons

proposé trois nouveaux indicateurs de performance respectivement (i) l'indicateur de flexibilité, (ii) l'indicateur de robustesse et (iii) une amélioration de l'indicateur de robustesse afin de choisir les meilleures gammes de fabrication. Chaque indicateur, en plus du critère relatif au temps total d'achèvement, a été associé à un problème d'optimisation multicritère. Nous avons développé trois modèles mathématiques guidés par l'un des indicateurs proposés. Dans un deuxième temps, et pour résoudre les deux premiers problèmes d'optimisation multicritère, des adaptations de la métaheuristique NSGA-II ont été proposées et la méthode TOPSIS a été utilisée par la suite pour sélectionner la meilleure gamme de fabrication. Pour terminer, une méthode hybride combinant NSGA-II et une heuristique spécifique a été développée pour traiter le troisième problème multicritère. Des exemples numériques illustratifs ont été présentés pour démontrer l'applicabilité des trois approches de résolution

3. La prise en compte explicite des positionnements des machines à outils reconfigurables (RMTs) dans un atelier et leurs impacts sur la conception d'un RMS. Pour résoudre ce problème, nous avons proposé dans un premier temps, une méthode heuristique monocritère basée sur une recherche exhaustive. L'heuristique utilise les gammes de fabrication générées par les méthodes que nous avons proposées dans les chapitres 3 et 4. Dans un deuxième temps, nous avons développé un nouvel indicateur de performance qui permet de quantifier l'effort d'évolution du RMS pour répondre au mieux aux variations des contraintes de la production, relatives à la famille de produit. L'applicabilité des deux approches a été vérifiée à travers un panel d'expériences numériques et analyses.

À travers ces travaux de recherche ainsi que l'analyse de l'état de l'art, nous constatons que les RMSs fournissent un ensemble de concepts et de méthodes plus adaptés pour faire face aux exigences en permanente évolution de l'environnement manufacturier actuel. Néanmoins, sur le plan pratique, stratégique, tactique et opérationnel, les réalisations des RMSs sont en cours de développement et de perfectionnement et un certain nombre de problèmes liés à leurs conceptions et à leurs pilotages ne sont toujours pas abordés de manières intégrées. De ce fait, nous proposons les directions de recherche ci-dessous que nous jugeons nécessaires à traiter dans le futur :

1. Les problèmes d'indisponibilités des machines dans un RMS sont rarement abordés au niveau opérationnel. De plus, les pannes des machines sont un problème fréquent dans les ateliers de production. Dans ce contexte, nous avons l'intention d'étendre nos travaux afin d'intégrer ce problème en proposant la gestion des stratégies de maintenance et leurs impacts sur la disponibilité du RMS.

2. Afin de refléter les conditions plus réalistes du monde industriel, nous visons le développement de nouvelles approches dans le cas multi-unitaire (produire plusieurs unités de produit ou plusieurs produits simultanément) lors de la conception et la génération des gammes de fabrication d'un RMS. En outre, l'intégration de la stratégie de planification et d'ordonnancement pour un tel problème est l'une des directions de recherche les plus importantes. Cette dernière répond au contexte économique actuel caractérisé par des demandes variables en volumes et en types de produits, exigeant des dates de livraison courtes voir très courtes. Par conséquent, les processus de fabrication doivent être davantage multi-unitaires, adaptables et flexibles pour répondre aux fluctuations des demandes.
3. Une autre direction de recherche possible concerne l'utilisation des indicateurs de performance proposés, entre autres l'indicateur d'évolution d'effort de reconfigurabilité, pour *la conception d'un agencement reconfigurable d'un RMS constitué de plusieurs RMTs.* De plus, nous visons le développement de nouvelles approches, avec la prise en compte de la meilleure transition et la meilleure reconfigurabilité entre les produits de la famille de produits, basées sur des modèles stochastiques.
4. Pour terminer, d'autres études peuvent être menées afin d'évaluer le comportement dynamique du système et combler le manque d'intégration du problème d'agencement des machines et des installations dans un environnement reconfigurable. En effet, nous proposons d'aborder les objectifs suivants à savoir : (i) l'adaptation et/ou la proposition de solutions au problème si elles existent (ii) le développement de modèles hybrides d'optimisation basés sur la simulation dans un schéma de conception efficace.

Les précédentes directions de recherche ne sont qu'une infime partie des directions possibles. En effet, les problématiques rencontrées dans les études des systèmes de production manufacturiers peuvent être étendues aux systèmes de production changeables et reconfigurables vu les besoins et attentes de l'industrie du futur.

Abdi, M. R., & Labib, A. W. (2004). Grouping and selecting products: the design key of reconfigurable manufacturing systems (RMSs). International journal of production research, 42(3), 521-546

Abdi, M. R., Labib, A. W. (2003). A design strategy for reconfigurable manufacturing systems (RMSs) using analytical hierarchical process (AHP): a case study. International Journal of Production Research, 41(10),pp 2273-2299.

Abele, Eberhard; Wörn, Arno; Fleischer, Jürgen; Wieser, Jan; Martin, Patrick and Klöpper, Robert. 2007. Mechanical module interfaces for reconfigurable machine tools, Prod. Eng. Res. Devel. 1:421–428

Abou-El-Hossein, K. A., Theron, N. J., & Ghobashy, S. (2015). Design of Machine Tool Based on Reconfigurability Principles. Applied Mechanics & Materials.

AlGeddawy, T. N., & ElMaraghy, H. A. (2009). Changeability effect on manufacturing systems design. In Changeable and reconfigurable manufacturing systems (pp. 267-283). Springer London.

AlGeddawy, Tarek. "Co-evolution in Manufacturing Systems Inspired by Biological Analogy." PhD thesis, University of Windsor (Canada), 2011

Altuntas, S., & Selim, H. (2012). Facility layout using weighted association rule-based data mining algorithms: Evaluation with simulation. Expert Systems with Applications, 39(1), 3-13

ANDERBERG, Staffan. Methods for improving performance of process planning for CNC machining-An approach based on surveys and analytical models. Phd Dessertation Chalmers University of Technology, 2012

Andersen, A. L., Brunoe, T. D., Nielsen, K. (2015). Reconfigurable Manufacturing on Multiple Levels: Literature Review and Research Directions. In Advances in Production Management Systems: Innovative Production Management Towards Sustainable Growth (pp. 266-273). Springer International Publishing

Andersen, A. L., Brunoe, T. D., Nielsen, K., & Rösiö, C. (2017). Towards a generic design method for reconfigurable manufacturing systems: Analysis and synthesis of current design methods and evaluation of supportive tools. Journal of Manufacturing Systems, 42, 179-195.

Andersen, A. L., Nielsen, K., & Brunoe, T. D. (2016). Prerequisites and Barriers for the Development of Reconfigurable Manufacturing Systems for High Speed Ramp-up. Procedia CIRP, 51, 7-12.

Anderson M (1997) Agile product development for mass customization: just-in-time, build-to-order, and agile manufacturing. Management Consultant Lafayette

Andrisano AO, Leali F, Pellicciari M, Pini F, Vergnano A (2012) Hybrid Reconfigurable System design and optimization through virtual prototyping and digital manufacturing tools. Int J Interact Des Manuf 6(1):17–27

Andersen Ann-Louise (2017) « Development of changeable and reconfigurable manufacturing systems supporting context-specific design of changeability » PhD thesis, Aalborg University, Denmark 2017

Azab A. and ElMaraghy H. (2007) Mathematical modeling for reconfigurable process planning. CIRP Annals-Manufacturing Technology 56(1):467–472

Azab A., Perusi G., ElMaraghy H.A. and ,Urbanic J. (2007) Semi-generative macroprocess planning for reconfigurable manufacturing. In: Digital Enterprise Technology, Springer, pp 251–258

Babu, A. S. (2013). Reconfigurations of manufacturing systems—an empirical study on concepts, research, and applications. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 66(1-4), 107-124.

Baldwin, Carliss Y., and Kim B. Clark. "Modularity in the design of complex engineering systems." In Complex engineered systems, pp. 175-205. Springer, Berlin, Heidelberg, 2006.

Bandyopadhyay, S., Saha, S., Maulik, U., & Deb, K. (2008). A simulated annealing-based multiobjective optimization algorithm: AMOSA. IEEE transactions on evolutionary computation, 12(3), 269-283.

Barata, José, Mauro Onori, Regina Frei, and Paulo Leitão. "Evolvable production systems in a RMS context: enabling concepts and technologies." In 2nd International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production (CARV'07). 2007.

Battaïa, O., Dolgui, A., & Guschinsky, N. (2016a). Decision support for design of reconfigurable rotary machining systems for family part production. International Journal of Production Research, 1-18.

Battaïa, O., Dolgui, A., & Guschinsky, N. (2016b). Integrated process planning and system configuration for mixed-model machining on rotary transfer machine. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 1-16.

Beach, R., Muhlemann, A. P., Price, D. H. R., Paterson, A., & Sharp, J. A. (2000). A review of manufacturing flexibility. European Journal of Operational Research, 122(1), 41-57.

Benjaafar, S., Heragu, S. S., & Irani, S. A. (2002). Next generation factory layouts: research challenges and recent progress. *Interfaces*, *32*(6), 58-76.

Bensmaine A., Dahane M. and Benyoucef L. (2012) Process plan generation in reconfigurable manufacturing systems using amosa and topsis. IFAC Proceedings Volumes (IFAC-Papers Online) 14:560–565

Bensmaine A., Dahane M., and Benyoucef L. (2013). A non-dominated sorting genetic algorithm based approach for optimal machines selection in reconfigurable manufacturing environment. *Computers and Industrial Engineering*, 66(3), 519-524.

Bi, Z. M., & Zhang, W. J. (2001). Modularity technology in manufacturing: taxonomy and issues. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 18(5), 381-390.

Bi, Z. M., Lang, S. Y., Shen, W., Wang, L. (2008). Reconfigurable manufacturing systems: the state of the art. *International Journal of Production Research*, 46(4), pp 967-992

Bollinger J, Benson DK, Cloud N (1998) Visionary manufacturing challenges for 2020. National Research Council. Visionary manufacturing challenges for 2020. Committee on visionary manufacturing challenges, board on manufacturing and engineering design, commission on engineering and technical systems. National Research Council Report. National Academy Press, Washington, DC

Buzacott, J.A. and Mandelbaum, M., 1985. Flexibility and productivity in manufacturing systems. In Proceedings of the annual IIE Conference (pp. 404-413)]

Caggiano, Alessandra. "Digital factory concept implementation for flexible and reconfigurable manufacturing systems modelling and analysis." PhD dissertation, Università degli Studi di Napoli Federico II, Italy, 2010

Carin Rösiö Kristina Säfsten , (2013),"Reconfigurable production system design – theoretical and practical challenges", Journal of Manufacturing Technology Management, Vol. 24 Iss 7 pp. 998 – 1018

Chan, F. T. S., Swarnkar, R., Tiwari, M. K. (2005). Fuzzy goal-programming model with an artificial immune system (AIS) approach for a machine tool selection and operation allocation problem in a flexible manufacturing system. International Journal of Production Research, 43(19),pp 4147-4163.

Chaube, A., Benyoucef, L., Tiwari, M. K. (2012). An adapted NSGA-2 algorithm based dynamic process plan generation for a reconfigurable manufacturing system. Journal of Intelligent Manufacturing, 23(4),pp 1141-1155.

Chen, L., Xi, F. J., & Macwan, A. (2005). Optimal module selection for preliminary design of reconfigurable machine tools. Journal of manufacturing science and engineering, 127(1), 104-115.

Dahane M. and Benyoucef L. (2016). An adapted NSGA-II algorithm for a reconfigurable manufacturing system (RMS) design under machines reliability constraints. Chapter 5, pp: 109-130, In. Metaheuristics for production systems, Talbi, Yalaoui and Amodeo (Eds.), ISBN: 978-3-319-23349-9.

Deb K., Pratap A., Agarwal S. and Meyarivan T. A. M. T. (2002). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 6(2), 182-197.

Deif, A. M., ElMaraghy, W. H. (2006). A systematic design approach for reconfigurable manufacturing systems. In Advances in Design (pp. 219-228). Springer London.

Delorme, X., Malyutin, S., & Dolgui, A. (2016). A multi-objective approach for design of reconfigurable transfer lines. IFAC-PapersOnLine, 49(12), 509-514.

Devise, O., & Pierreval, H. (2000). Indicators for measuring performances of morphology and material handling systems in flexible manufacturing systems. International Journal of Prod Economics, 64(1), 209-218.

Dias-Ferreira, João. "Bio-Inspired Self-Organising Architecture for Cyber-Physical Manufacturing Systems." PhD dissertation, Kungliga Tekniska högskolan, Royal Institute of Technology, Sweden 2016

Dou, J., Li, J., & Su, C. (2016). Bi-objective optimization of integrating configuration generation and scheduling for reconfigurable flow lines using NSGA-II. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 1-18.

Drira, A., Pierreval, H., & Hajri-Gabouj, S. (2007). Facility layout problems: A survey. Annual Reviews in Control, 31(2), 255-267

Dupont-Gatelmand C. A survey of flexible manufacturing systems. Journal of Manufacturing Systems 1981;1(1):1–16

El-Baz, M. A. (2004). A genetic algorithm for facility layout problems of different manufacturing environments. Computers & Industrial Engineering, 47(2), 233-246

ElMaraghy H (2007). Reconfigurable process plans for responsive manufacturing systems. In Digital enterprise technology (pp. 35-44). Springer US.

ElMaraghy H (2009a) Changing and Evolving Products and Systems – Models and Enablers. In: Changeable and Reconfigurable Manufacturing Systems. ElMaraghy H, (Ed.), Springer-Verlag, London, pp. 25-45

Elmaraghy H (2009b)., Changeable and reconfigurable manufacturing systems. Canada: University of Windsor.

ElMaraghy H, Wiendahl H-P (2009) in ElMaraghy H, (Ed.) Changeability – An Introduction, in Changeable and Reconfigurable Manufacturing Systems, Springer-Verlag, London3–24

ElMaraghy H. (2005). Flexible and reconfigurable manufacturing systems paradigms. International Journal of Flexible Manufacturing Systems 17, 261–271

Esmaeilian, B., Behdad, S., & Wang, B. (2016). The evolution and future of manufacturing: A review. Journal of Manufacturing Systems, 39, 79-100.

Farahani, R. Z., SteadieSeifi, M., & Asgari, N. (2010). Multiple criteria facility location problems: A survey. Applied Mathematical Modelling, 34(7), 1689-1709

Farid, A.M. (2008). Facilitating ease of system reconfiguration through measures of manufacturing modularity. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 222(10), 1275-1288.

Farid, A.M., (2016). An Engineering Systems Introduction to Axiomatic Design. In: A.M. Farid and N.P. Suh, eds. Axiomatic Design in Large Systems: Springer, 3-47

Fredriksson, P. (2006). Mechanisms and rationales for the coordination of a modular assembly system: The case of Volvo Cars. International Journal of Operations & Production Management, 26(4), 350-370.

Gadalla, M., & Xue, D. (2016). Recent advances in research on reconfigurable machine tools: a literature review. International Journal of Production Research, 1-15.

Galan, R., Racero, J., Eguia, I., & Garcia, J. M. (2007). A systematic approach for product families formation in Reconfigurable Manufacturing Systems. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 23(5), 489-502.

Gershenson, J. K., & Prasad, G. J. (1997). Modularity in product design for manufacturability. International Journal of Agile Manufacturing, 1(1), 99-110.

Goyal, K. K., & Jain, P. K. (2016). Design of reconfigurable flow lines using MOPSO and maximum deviation theory. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 84(5-8), 1587-1600.

Goyal, K. K., Jain, P. K., Jain, M. (2013). A novel methodology to measure the responsiveness of RMTs in reconfigurable manufacturing system. Journal of Manufacturing Systems, 32(4),pp 724-730.

Guan, X., Dai, X., Qiu, B., & Li, J. (2012). A revised electromagnetism-like mechanism for layout design of reconfigurable manufacturing system. Computers & Industrial Engineering, 63(1), 98-108.

Gupta, A., Jain, P.K., Kumar, D. (2015) 'Configuration selection of reconfigurable manufacturing system based on performance', International Journal of Industrial and Systems Engineering, Vol. 20, No. 2, pp.209–230

Gurumurthy, J. P. (1998). Life-cycle modularity in product design.

Gyulai, D., & Monostori, L. (2017). Capacity management of modular assembly systems. Journal of Manufacturing Systems, 43, 88-99.

Hasan, F., Jain, P. K., Kumar, D. (2013). Machine Reconfigurability Models Using Multi-Attribute Utility Theory and Power Function Approximation. Procedia Engineering, 64,pp 1354-1363.

Hasan, F., Jain, P. K., Kumar, D. (2014). Performance issues in reconfigurable manufacturing system. DAAAM International Scientific Book, paper, 24, 295-310.

Hassan, M. M. D. (1994). Machine layout problem in modern manufacturing facilities. Int J Prod Res, 32(11), 2559-2584.

HEES, Andreas, BAYERL, Christina, VAN VUUREN, Brian, *et al.* A production planning method to optimally exploit the potential of reconfigurable manufacturing systems. Procedia CIRP, 2017, vol. 62, p. 181-186.

Heisel, U., & Meitzner, M. (2006). Progress in reconfigurable manufacturing systems. In Reconfigurable Manufacturing Systems and Transformable Factories (pp. 47-62). Springer Berlin Heidelberg.

Heragu, S. S. (1998). Facilities design and planning-from A to Z. In Annual International Industrial Engineering Conference (p. 134). Institute of Industrial Engineers, American Institute of Industrial Engineers.

Heragu, S. S., Meng, G. J. J. A., Zijm, W. H. M., & Van Ommeren, J. C. W. (2001). Design and analysis of reconfigurable layout systems.

Hsieh, S., & Hung, C. R. (2004). Feasibility study of modular plant for 300 mm-IC fabrications. Journal of Intelligent Manufacturing, 15(2), 233-244.

Hu S. Jack (2013) , Evolving Paradigms of Manufacturing: From Mass Production to Mass Customization and Personalization, Procedia CIRP, Volume 7, , Pages 3-8, ISSN 2212-8271,

Hu, S. Jack. (2013)"Evolving paradigms of manufacturing: from mass production to mass customization and personalization." Procedia CIRP 7: 3-8

Hu, S. Jack., Ko J, Weyand L, ElMaraghy HA, Kien TK, Koren Y, Bley H, Chryssolouris G, Nasr N, Shpitalni M (2011) Assembly system design and operations for product variety. CIRP Ann Manuf Tech 60(2):715–733

Huang, Chun-Che, and Andrew Kusiak. (1998) "Modularity in design of products and systems." IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans 28, no. 1: 66-77

Hwang, C. L., Lai, Y. J., & Liu, T. Y. (1993). A new approach for multiple objective decision making. Computers & operations research, 20(8), 889-899.

IMTI (2000): Integrated Manufacturing Technology Roadmapping Project. An Overview of the IMTR Roadmaps. 24 July 2000, Oak Ridge

James-Moore, S. M., & Gibbons, A. (1997). Is Lean Manufacture Universally Relevant? An Investigative Methodology.International Journal of Operations & Production Management, 17(9), 899 911

José António, Barata de Oliveira "Coalition based approach for shop floor agility–a multiagent approach." PhD dissertation, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Portugal (2003).]

Katz, R., & Moon, Y. M. (2000). Virtual arch type reconfigurable machine tool design: Principles and methodology. Ann Arbor, 1001, 48109.

Kochhar, J., & Heragu, S. S. (1999). Facility layout design in a changing environment. International Journal of Production Research, 37(11), 2429-2446.

Koren Y., Heisel U., Jovane F., Moriwaki T., Pritschow G., Ulsoy G. and Van Brussel H. (1999). Reconfigurable manufacturing systems. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 48(2), 527-540.

Koren, Y. (2006). General RMS characteristics. Comparison with dedicated and flexible systems. In Reconfigurable manufacturing systems and transformable factories (pp. 27-45). Springer Berlin Heidelberg.

Koren, Y. (2010). The global manufacturing revolution: product-process-business integration and reconfigurable systems (Vol. 80). John Wiley and Sons

Koren, Y., Shpitalni, M. (2010). Design of reconfigurable manufacturing systems. Journal of Manufacturing Systems, 29(4), pp130-141.

Koren, Y., Ulsoy, A. G. (2002). Vision, principles and impact of reconfigurable manufacturing systems. Powertrain International, 5(3), pp14-21.

Koren, Yoram, Wencai Wang, and Xi Gu. "Value creation through design for scalability of reconfigurable manufacturing systems." International Journal of Production Research 55, no. 5 (2017): 1227-1242.

Koren, Yoram, Xi Gu, and Weihong Guo. "Reconfigurable manufacturing systems: Principles, design, and future trends." Frontiers of Mechanical Engineering (2017).

Koren, Y., and S. Kota.(1999). Reconfigurable Machine Tool. Google Patents

Kumar, L., & Jain, P. K. (2008). Part-machine group formation with operation sequence, time, and production volume. Int J Simul Model, 7(4), 198-209.

Kusiak, (1990) Intelligent Manufacturing Systems, Prentice-Hall Inc.,New Jersey,

Labib A and Yuniarto M. (2009) Maintenance strategies for changeable manufacturing. In: Changeable and Reconfigurable Manufacturing Systems, ElMaraghy H.A. (Ed.) Springer, pp 337–351

Lacksonen, T. A., & Hung, C. Y. (1997). Project scheduling algorithms for re-layout projects. IIE transactions, 30(1), 91-99.Labib A and Yuniarto M. (2009) Maintenance strategies for changeable manufacturing. In: Changeable and Reconfigurable Manufacturing Systems, ElMaraghy H.A. (Ed.) Springer, pp 337–351

Lameche, Khaled, Najib M. Najid, Pierre Castagna, and Khalid Kouiss. (2017) "Modularity in the design of reconfigurable manufacturing systems." IFAC-PapersOnLine 50, no. 1: 3511-3516.

Landers, Robert G., B-K. Min, and Yoram Koren. (2001) "Reconfigurable machine tools." CIRP Annals-Manufacturing Technology 50, no. 1: 269-274.

Lee, G. H. (1997). Reconfigurability consideration design of components and manufacturing systems. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 13(5),p 376-386

Leitao, P. (2004). An agile and adaptive holonic architecture for manufacturing control. PhD thesis, Universidade do Porto

Leitão, Paulo. (2009) "Agent-based distributed manufacturing control: A state-of-the-art survey." Engineering Applications of Artificial Intelligence 22, no. 7: 979-991

Liles, Donald H., and Brian L. Huff. (1990) "A computer based production scheduling architecture suitable for driving a reconfigurable manufacturing system." Computers & Industrial Engineering 19, no. 1-4: 1-5

Lokesh Kumar, & Jain, P. K. (2010). Dynamic cellular manufacturing systems design—a comprehensive model & HHGA. Advances in production engineering & management journal, 5(3), 151-162.

Lozano, S., G. Villa, and I. Eguía. 2017. "Data Envelopment Analysis with Multiple Modes of Functioning. Application to Reconfigurable Manufacturing Systems." International Journal of Production Research 1–18.10.1080/00207543.2017.1391418

Maniraj, M., V. Pakkirisamy, and R. Jeyapaul. (2015). "An Ant Colony Optimization–Based Approach For A Single-Product Flow-Line Reconfigurable Manufacturing Systems." Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture.

Mascarenhas, Mr Briance. "Planning for flexibility." Long Range Planning 14, no. 5 (1981): 78-82.

Mehrabi, M. G., Ulsoy, A. G., & Koren, Y. (2000a). Reconfigurable manufacturing systems and their enabling technologies. International Journal of Manufacturing Technology and Management, 1(1), 114-131

Mehrabi, M. G., Ulsoy, A. G., & Koren, Y. (2000b). Reconfigurable manufacturing systems: key to future manufacturing. Journal of intelligent manufacturing, 11(4), 403-419.

Mehrabi, M. G., Ulsoy, A. G., Koren, Y., & Heytler, P. (2002). Trends and perspectives in flexible and reconfigurable manufacturing systems. Journal of Intelligent manufacturing, 13(2), 135-146.

Mesa, J., Maury, H., Arrieta, R., Bula, A., & Riba, C. (2015). Characterization of modular architecture principles towards reconfiguration: a first approach in its selection process. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 80(1-4), 221-232.

Michalos G, Makris S, Papakostas N, Chryssolouris G (2011) A Framework For Enabling Flexibility Quantification In Modern Manufacturing System Design Approaches. 44th CIRP International Conference on Manufacturing Systems, Madison, USA

Mittal, K.K., Jain, P. K. (2014). An Overview of Performance Measures in Reconfigurable Manufacturing System. Procedia Engineering, 69,pp 1125-1129.

Moghaddam, Shokraneh K., Mahmoud Houshmand, and Omid Fatahi Valilai. "Configuration design in scalable reconfigurable manufacturing systems (RMS); a case of single-product flow line (SPFL)." International Journal of Production Research (2017): 1-23

Mohapatra, P., Benyoucef, L., Tiwari, M. K. (2013). Realising process planning and scheduling integration through adaptive setup planning. International Journal of Production Research, 51(8),pp 2301-2323.

Moon, Y. M., & Kota, S. (2002). Design of reconfigurable machine tools. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 124(2), 480-483.

Mourtzis D, Doukas M (2014) The evolution of manufacturing systems: From craftsmanship to the era of customisation. In Modrak V, Semanco P, (eds) Design and management of lean production systems. IGI Global, ISBN13: 9781466650398

Mourtzis, Dimitris. (2016) "Challenges and future perspectives for the life cycle of manufacturing networks in the mass customisation era." Logistics Research 9, no. 1: 2

Murata, S., Kurokawa, H., Yoshida, E., Tomita, K., & Kokaji, S. (1998, May). A 3-D self-reconfigurable structure. In Robotics and Automation, 1998. Proceedings. 1998 IEEE International Conference on (Vol. 1, pp. 432-439). IEEE.

Musharavati, F., Hamouda, A. S. M. (2012). Enhanced simulated-annealing-based algorithms and their applications to process planning in reconfigurable manufacturing systems. Advances in Engineering Software, 45(1),pp 80-90.

Nallakumarasamy G., Srinivasan P. S. S., Raja K. V. and Malayalamurthi R. (2011). Optimization of operation sequencing in CAPP using superhybrid genetic algorithms-simulated annealing technique. ISRN Mechanical Engineering, 2011.

Nambiar, A. "Modern manufacturing paradigms–a comparison." In Proceedings of the international multiconference of engineers and computer scientists, vol. 3, p. 1. 2010

Navaei, J., & ElMaraghy, H. (2016). Grouping and sequencing product variants based on setup similarity. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 1-13.

Neves, Pedro. (2016) "Reconfiguration Methodology to improve the agility and sustainability of Plug and Produce Systems." PhD thesis, KTH Royal Institute of Technology,.

Niroomand, I., Kuzgunkaya, O., Bulgak, A. A. (2014). The effect of system configuration and ramp-up time on manufacturing system acquisition under uncertain demand. Computers and Industrial Engineering, 73, 61-74.

Ohno, T. (1988). Toyota Production System: beyond large-scale production. Cambridge, Mass: Productivity Press

Padayachee, J., Bright, G., & Masekamela, I. (2009). Modular reconfigurable machine tools: Design, control and evaluation. South African Journal of Industrial Engineering, 20(2), 127-143.

Pahl G, Beiiz W (1988) Engineering design. The Design Council, London

Pattanaik, L. N., Jain, P. K., & Mehta, N. K. (2007). Cell formation in the presence of reconfigurable machines. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 34(3-4), 335-345.

Pérez, R., Valverde, A., Ahuett, H., Molina, A., & Riba, C. (2004, September). A modularity framework for concurrent design of reconfigurable machine tools. In International Conference on Cooperative Design, Visualization and Engineering (pp. 87-95). Springer Berlin Heidelberg.

Pham, D. T., Eldukhri, E. E., Peat, B., Setchi, R., Soroka, A., Packianather, M. S., ... & Dimov, S. (2004, June). Innovative Production Machines and Systems (I* PROMS): A network of excellence funded by the EU sixth framework programme. In Industrial Informatics, 2004. INDIN'04. 2004 2nd IEEE International Conference on (pp. 540-544). IEEE.

Piore, M. J., & Sabel, C. F. (1984). The Second Industrial Divide: possibilities for prosperity. New York: Basic Books

Popovic, Djordje. (2018) "Off-site manufacturing systems development in timber house building: Towards mass customization-oriented manufacturing." PhD dissetation., Jönköping University, School of Engineering,

Puik, E., Telgen, D., van Moergestel, L., & Ceglarek, D. (2016). Assessment of reconfiguration schemes for Reconfigurable Manufacturing Systems based on resources and lead time. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing.

Ramasesh, R. V., & Jayakumar, M. D. (1991). Measurement of manufacturing flexibility: a value based approach. Journal of operations management, 10(4), 446-468.

REN, Lei, ZHANG, Lin, TAO, Fei, *et al.* (2015) Cloud manufacturing: from concept to practice. Enterprise Information Systems, 2015, vol. 9, no 2, p. 186-209

Renzi, Cristina, F. Leali, M. Cavazzuti, and A. O. Andrisano. (2014) "A review on artificial intelligence applications to the optimal design of dedicated and reconfigurable manufacturing systems." The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 72, no. 1-4: 403-418

Ribeiro, Liliana, Rui Miguel, Madalena Pereira, Isabel Trindade, and José Lucas. (2014) "Mass customization: modularity in development of fashion products." Journal of Management Cases: 41

Rösiö, C. (2012). Supporting the design of reconfigurable production systems (Doctoral dissertation, Mälardalen University).

Rösiö, C., & Säfsten, K. (2013). Reconfigurable production system design–theoretical and practical challenges. Journal of Manufacturing Technology Management, 24(7), 998-1018.

Rosselli, F. (2003). FuTMaN: The Future of Manufacturing in Europe 2015-2020. The challenge for sustainability. Final Report for the European Commission. Directorate-General Joint Research Center.

S. M. Davis (1987). Future Perfect. Addison-Wesley, Reading, MA,

Setchi, Rossitza M., and Nikolaos Lagos. (2004 ) "Reconfigurability and reconfigurable manufacturing systems: state-of-the-art review." In Industrial Informatics, 2004. INDIN'04. 2004 2nd IEEE International Conference on, pp. 529-535. IEEE,

Shabaka A. I. and ElMaraghy H. A., (2007) "Generation of machine configurations based on product features," International Journal of Computer Integrated Manufacturing, vol. 20, pp. 355-369,

Shaik, A. M., Rao, V. K., & Rao, C. S. (2015). Development of modular manufacturing systems—a review. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 76(5-8), 789-802.

Sharma, P., & Singhal, S. (2016). Design and evaluation of layout alternatives to enhance the performance of industry. OPSEARCH, 53(4), 741-760

Singh, S. P., & Sharma, R. R. (2006). A review of different approaches to the facility layout problems. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 30(5-6), 425-433

Talbi E. G. (2009). Metaheuristics: from design to implementation. John Wiley & Sons (Vol. 74).

Tracht, K., & Hogreve, S. (2012). Decision Making During Design and Reconfiguration of Modular Assembly Lines. Enabling Manufacturing Competitiveness and Economic Sustainability, 105-110.

Trentesaux, D., (2009). Distributed control of production systems. Eng. Appl. Artif. Intell. 22 (7), 971–978 2009

Tseng, H. E., Chang, T. S., & Yang, Y. C. (2004). A connector-based approach to the modular formulation problem for a mechanical product. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 24(3-4), 161-171.

Tsukune, Hideo, M. Tsukamoto, Toshio Matsushita, Fumiaki Tomita, K. Okada, Tsukasa Ogasawara, Kunikatsu Takase, and T. Yuba. (1993) "Modular manufacturing." Journal of Intelligent Manufacturing 4, no. 2: 163-181

Tu, Q., Vonderembse, M. A., Ragu-Nathan, T. S., & Ragu-Nathan, B. (2004). Measuring modularity-based manufacturing practices and their impact on mass customization capability: a customer-driven perspective. Decision Sciences, 35(2), 147-168.

Ueda, K., (2007). Emergent Synthesis Approaches To Biological Manufacturing Systems. In: P. F. Cunha and P. G. Maropoulos, ed. Digital Enterprise Technology. Springer US, 25-34

Ulrich K, Tung K (1991) Fundamentals of product modularity. Proceedings of the 1991 ASME Design Technical Conferences Conference on Design Manufacture/Integration, Miami, Florida

Van Looveren, A., Ludo Gelders, and L. Van Wassenhove.( 1986) "A review of FMS planning models." in Modelling and design of flexible manufacturing systems,(EDs) A. Kusiak, Manufacturing research and technology 3, Elsevier science publisher B.V amesterdame: 1986. pp. 3-33

Wang, G. X., Huang, S. H., Shang, X. W., Yan, Y., & Du, J. J. (2016). Formation of part family for reconfigurable manufacturing systems considering bypassing moves and idle machines. Journal of Manufacturing Systems, 41, 120-129.

Wang, W., Koren, Y. (2012). Scalability planning for reconfigurable manufacturing systems. Journal of manufacturing systems, 31(2),pp 83-91.

Wascher, G., & Merker, J. (1997). A comparative evaluation of heuristics forthe adjacency problem in facility layout planning. Int J Prod Res, 35(2), 447-466

Wiendahl, H.P., ElMaraghy, H.A., Nyhuis, P., Zäh, M.F., Wiendahl, H.H., Duffie, N. and Brieke, M., (2007). Changeable manufacturing-classification, design and operation. CIRP annals, 56(2), pp.783-809

Wiendahl, Hans-Peter, and C. L. Heger. (2004) "Justifying changeability. A methodical approach to achieving cost effectiveness." Journal for Manufacturing Science and Production 6, no. 1-2: 33-40

Womack, J. P., Jones, D. T., & Roos, D. (1990). The Machine That Changed the World. New York: Harper Perennial

XIA, Qing, ETIENNE, Alain, DANTAN, Jean-yves, *et al. (*2018) Reconfigurable machining process planning for part variety in new manufacturing paradigms: Definitions, models and framework. Computers & Industrial Engineering, , vol. 115, p. 206-219

Xiaobo, Z., Jiancai, W., & Zhenbi, L. (2000). A stochastic model of a reconfigurable manufacturing system Part 1: A framework. International Journal of Production Research, 38(10), 2273-2285

Yang, T., Peters, B. A., & Tu, M. (2005). Layout design for flexible manufacturing systems considering single-loop directional flow patterns. European Journal of Operational Research, 164(2), 440-455

Yigit, A. S., Ulsoy, A. G., & Allahverdi, A. (2002). Optimizing modular product design for reconfigurable manufacturing. Journal of Intelligent Manufacturing, 13(4), 309-316.

Yin, Yong, Kathryn E. Stecke, and Dongni Li. (2017) "The evolution of production systems from Industry 2.0 through Industry 4.0." International Journal of Production Research: 1-14

ZHANG, Lin, LUO, Yongliang, TAO, Fei, *et al. (*2014) Cloud manufacturing: a new manufacturing paradigm. Enterprise Information Systems, , vol. 8, no 2, p. 167-187

Zhou, Jing Tao, Hai Cheng Yang, Ming Wei Wang, Shi Kai Jing, and Rong Mo. (2011) "GetCM: a vision of cloud manufacturing." In Advanced Materials Research, vol. 213, pp. 388-392. Trans Tech Publications,