



**HAL**  
open science

# Approche basée sur l'ingénierie système pour la conception intégrée des systèmes manufacturiers reconfigurables

Abdelmonaam Abid

## ► To cite this version:

Abdelmonaam Abid. Approche basée sur l'ingénierie système pour la conception intégrée des systèmes manufacturiers reconfigurables. Génie mécanique [physics.class-ph]. Université Paris Saclay (COmUE); École nationale d'ingénieurs de Sfax (Tunisie), 2019. Français. NNT : 2019SACL020 . tel-02157939

**HAL Id: tel-02157939**

**<https://theses.hal.science/tel-02157939>**

Submitted on 17 Jun 2019

**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.

# Approche basée sur l'Ingénierie Système pour la Conception Intégrée des Systèmes Manufacturiers Reconfigurables

Thèse de doctorat de l'Université Paris-Saclay et de l'Université de  
Sfax, préparée à Centrale Supélec

École doctorale n°579 : sciences mécaniques et énergétiques,  
matériaux et géosciences (SMEMAG)  
Spécialité de doctorat : Génie Mécanique

Thèse présentée et soutenue à Saint Ouen, le 04 Avril 2019, par

**M. ABDELMONAAM ABID**

Composition du Jury :

Mme Marija Jankovic Professeure, Université Paris-Saclay	Présidente
M. Mohamed Najib Ichchou Professeur, École Centrale de Lyon	Rapporteur
M. Abdelkhalek El Hami Professeur, L'Institut National des Sciences Appliquées de Rouen	Rapporteur
M. Ali Akrouf Professeur, École Nationale d'Ingénieurs de Tunis	Examineur
M. Alain Rivière Professeur, Institut Supérieur de Mécanique de Paris	Co-directeur de thèse
M. Jamel Louati Professeur, École Nationale d'Ingénieurs de Sfax	Co-directeur de thèse
M. Moncef Hammadi Maître de conférences, Institut Supérieur de Mécanique de Paris	Co-encadrant de thèse
M. Maher Barkallah Professeur, École Nationale d'Ingénieurs de Sfax	Co-encadrant de thèse
M. Jean-Yves Choley Professeur, Institut Supérieur de Mécanique de Paris	Invité
M. Mohamed Haddar Professeur, École Nationale d'Ingénieurs de Sfax	Invité



# Résumé

Aujourd'hui, les industriels cherchent de nouvelles approches qui permettent aux concepteurs d'adapter efficacement les systèmes de fabrication face à un environnement incertain et perturbant. Le concept de la reconfiguration des systèmes de fabrication est proposé afin de trouver des solutions face à l'occurrence d'aléas au sein d'un système manufacturier complexe. Dans la littérature, l'intégration de la reconfiguration dès la phase de conception dans le cadre de l'ingénierie système en suivant une approche basée sur des normes et paradigmes commence à faire appel à plusieurs nouveaux travaux de recherche. Nous proposons une nouvelle approche basée sur l'ingénierie système pour concevoir les systèmes de production manufacturiers pour qu'ils soient reconfigurables du point de vue partie opérative et commande, en assurant la cohérence entre les modèles et en respectant les exigences de l'industrie nouvelle. Cette approche vise à guider le concepteur pour modéliser les systèmes manufacturiers en intégrant le concept de la reconfiguration dans le cadre de l'ingénierie système. Ensuite, les modèles développés des différents points de vue sont transformés suivant des règles prédéfinies vers des modèles d'architectures holoniques qui permettent de combler l'écart entre le processus de modélisation conceptuelle et le processus de simulation. Ces modèles holoniques sont exécutables par la technologie des systèmes multi-agents afin de faciliter leurs implémentations. Après, le concepteur sera capable de vérifier et valider par simulation les critères et les caractéristiques clés de la reconfiguration dans le but d'atteindre les indicateurs demandés. Les résultats obtenus montrent une réactivité efficace aux aléas internes et externes avec la configuration la plus adéquate. Nous avons choisi un système manufacturier reconfigurable qui est le système de conversion d'acier afin d'illustrer l'utilité et la fiabilité de l'approche proposée dans différents scénarios.

# Abstract

Today, manufacturers are seeking new approaches that allow designers to effectively adapt manufacturing systems to an uncertain and disruptive environment. The concept of the reconfiguration of manufacturing systems is proposed in order to find solutions to the occurrence of disturbances within a complex manufacturing system. In the literature, integrating reconfiguration early in the design phase into system engineering by following an approach based on standards and paradigms is beginning to call for several new research studies. We propose a new approach based on system engineering to design manufacturing production systems so that they are reconfigurable from the point of view of operative and control part, ensuring coherence between models and meeting the requirements of the new industry. This approach is intended to guide the designer in modeling the manufacturing systems by integrating the concept of reconfiguration into system engineering. Then, developed models of different viewpoint are transformed according to predefined rules into holonic architecture models that bridge the gap between the conceptual modeling process and the simulation process. These holonic models are executable by the technology of multi-agent systems to facilitate their implementations. Afterwards, the designer will be able to verify and validate by simulation the criteria and key features of the reconfiguration in order to achieve the requested indicators. The obtained results show an effective reactivity to the internal and external

disturbances with the most adequate configuration. We chose a reconfigurable manufacturing system which is the steel converter system to illustrate the utility and reliability of the proposed approach in different scenarios.

## Dédicaces

*Afin d'être reconnaissant envers ceux qui m'ont appuyé et encouragé à effectuer ce travail de recherche, je dédie ce mémoire :*

*À mes chers parents, **Jamel** et **Najet** pour les sacrifices qu'ils ont consentis pour mon instruction et mon bien-être et pour tous les sentiments d'affection et d'amour qu'ils m'ont apporté.*

*À mon très cher frère **Tarek**, qui m'a toujours soutenu et encouragé.*

*À ma chère sœur **Dhouha** et son mari **Hammadi** qui m'ont donné la motivation d'aller de l'avant, et leurs enfants **Adam** et **Khadija** qui ne cessent d'illuminer ma vie par leur innocence et leur amour.*

*À tous mes amis, avec qui j'ai partagé plein d'agréables moments inoubliables.*

*À tous les enseignants auxquels je dois ce que je suis maintenant.*

*Et à tous ceux que ma réussite leur tient à cœur.*

*Abdelmonaam Abid*

# Remerciements

Cette thèse de Doctorat a été réalisée dans le cadre d'une convention de tutelle entre l'École Nationale d'Ingénieurs de Sfax (ENIS) et Centrale-Supélec. Les recherches qui font l'objet de ce mémoire ont été réalisées principalement en France, au sein du laboratoire Quartz, situé à l'institut Supérieur de Mécanique de Paris (SUPMECA), et dans l'équipe IS2M (Ingénierie des Systèmes. Mécatroniques et Multi-physiques). Par ces quelques lignes, je tiens à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin au bon déroulement de cette thèse, en espérant n'avoir oublié personne.

Je tiens à remercier spécialement mon directeur de thèse français **Pr. Alain Rivière** (directeur général de SUPMECA). Je vous remercie d'avoir cru en mes capacités, pour le temps et la patience que vous m'avez accordés tout au long de ces trois années. J'ai beaucoup apprécié travailler à vos côtés tant sur le plan scientifique que sur le plan humain.

Je tiens à remercier mon directeur de thèse Tunisien **Pr. Jamel Louati** d'avoir bien assuré la direction et l'encadrement de mes travaux de thèse. Merci pour votre gentillesse, vos qualités humaines, votre patience et vos conseils.

Je tiens à remercier mon co-encadrant de thèse **Dr. Moncef Hammadi**, à qui j'adresse mes remerciements les plus sincères pour sa disponibilité, ses conseils, son encouragement et ses qualités humaines. Je garde toujours beaucoup de plaisir de discuter avec vous et à bénéficier de vos conseils.

Je tiens à remercier **Dr. Jean-Yves Choley** (directeur de la recherche chez SUPMECA) de m'avoir accueilli dans son équipe de recherche IS2MP (Ingénierie des Systèmes Mécatroniques et Multi-physiques). Je lui témoigne toute ma reconnaissance pour les conseils qu'il m'a prodigués au cours de ces trois années, pour les nombreuses et fructueuses discussions que nous avons eues et pour m'avoir accordé sa confiance pour travailler à ses côtés.

Je remercie chaleureusement mon co-encadrant de thèse **Dr. Maher Barkallah** pour m'avoir soutenu et encouragé durant l'ensemble de mes travaux de recherche. Merci pour votre qualités humaines et votre conseil. Je suis très reconnaissant envers vous.

Je remercie également **Pr. Mohamed Haddar** (directeur du laboratoire de Mécanique, Modélisation et Productique (LA2MP)) ainsi que tous les membres du laboratoire LA2MP. Je lui exprime ma profonde gratitude pour sa haute compétence, il m'a initié à la recherche et m'a appris la rigueur scientifique.

Je remercie **Pr. Mohamed Najib Ichchou** et **Pr. Abdelkhalek El Hami** d'avoir accepté de rapporter cette thèse. Vos remarques pertinentes et vos conseils précieux ont beaucoup approuvé la qualité de ce travail. Soyez assurés, chers professeurs, de mon estime et de ma profonde gratitude.

Mes sincères remerciements et ma gratitude vont aussi à **Pr. Marija Jankovic** et **Pr. Ali**

**Akrouit** pour avoir accepté de juger ce travail et d'en présider le jury de soutenance. Que soyez assuré de mon entière reconnaissance.

Je remercie également **Pr. Jean-Pierre Barbot** de m'avoir accueilli dans le laboratoire Quartz EA 7393. J'adresse également mes remerciements à **Mme. Christel Compagnon** et aux membres de QUARTZ, qui ont contribué chacun à sa façon, et toujours dans la bonne humeur au bon déroulement de cette thèse.

Un grand merci aussi pour : mon cher ami **Pr. Bader Bellahsene**, **Pr. Wissam Malouli**, **Pr. Sana Damak** et **Pr. Manuele Kirsch Pinheiro** de l'Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne, **Dr. Régis Plateaux** et **Dr. Olivia Penas** de SUPMECA pour leur aide et leur soutien.

Comme je tiens à remercier mes amis, parmi lesquels je remercierai plus particulièrement Said, Virginie, Nabil, Fabrice, Yossra, Sami, Mehdi, Nicolas, Mouna, Anis, Bacem, Mahmoud, Imen et Achraf.

# Table des matières

<b>Résumés</b>	<b>ii</b>
<b>Dédicace</b>	<b>iii</b>
<b>Remerciements</b>	<b>v</b>
<b>Publications de l'auteur</b>	<b>xiii</b>
<b>Introduction générale</b>	<b>1</b>
<b>1. Chapitre 1 : Introduction sur les systèmes manufacturiers reconfigurables</b>	<b>6</b>
1.1 Introduction	7
1.2 Produit et Système mécatronique	7
1.3 Introduction sur les systèmes manufacturiers reconfigurables	9
1.3.1 Systèmes manufacturiers (ou de fabrication)	9
1.3.2 Définitions et positionnement des SMRs par rapport aux SMFs et SMDs	12
1.4 Conclusion	16
<b>2. Chapitre 2 : Analyse de l'état de l'art sur la modélisation, l'intégration et la simulation des systèmes manufacturiers reconfigurables</b>	<b>18</b>
2.1 Introduction	19
2.2 Modélisation des systèmes manufacturiers reconfigurables dans le cadre de l'ingénierie système	19
2.2.1 Définition de la modélisation	19
2.2.2 L'ingénierie système	20
2.3 Simulation des systèmes manufacturiers reconfigurables	24
2.3.1 Définition de la simulation	24
2.3.2 Architectures de pilotage d'un Système Manufacturier Reconfigurable (SMR)	24
2.3.3 Système multi-agents intelligent	30
2.3.4 Holon et Agent	30
2.3.5 Problématique	31
2.4 Analyse synthétique sur les approches utilisées pour la conception des systèmes manufacturiers reconfigurables	32
2.4.1 Approches de conception intégrées	34
2.4.2 Synthèse et motivation	41

2.5	Conclusion	42
<b>3.</b>	<b>Chapitre 3 : Proposition d'une approche basée sur l'ingénierie système pour la modélisation et la simulation des systèmes manufacturiers reconfigurables</b>	<b>44</b>
3.1	Introduction	45
3.2	Processus de conception global	45
3.3	Cadre méthodologique proposé pour la conception du SMR	47
3.3.1	Introduction	47
3.3.2	Objectifs et fondements du cadre méthodologique proposé	48
3.3.3	Présentation générale du cadre méthodologique proposé	48
3.4	Conclusion	56
<b>4.</b>	<b>Chapitre 4 : Processus de modélisation des systèmes manufacturiers reconfigurables</b>	<b>58</b>
4.1	Introduction	59
4.2	Problématiques de la modélisation conceptuelle	59
4.2.1	Problématique	59
4.2.2	Objectifs	60
4.3	Préparation pour la modélisation conceptuelle	60
4.4	Processus de définition du système	61
4.4.1	Processus de définition des besoins des parties prenantes	62
4.4.2	Processus d'analyse des exigences	63
4.4.3	Processus de conception de l'architecture	63
4.4.4	Besoin d'un profil pour intégrer la reconfigurabilité	64
4.4.5	Profil de la reconfigurabilité	66
4.5	Élaboration de l'architecture conceptuelle du système manufacturier de pilotage	70
4.6	Conclusion	73
<b>5.</b>	<b>Chapitre 5 : Processus d'intégration et de simulation des systèmes manufacturiers reconfigurables</b>	<b>75</b>
5.1	Introduction	76
5.2	Problématique de la modélisation opérationnelle	77
5.2.1	Problématique	77
5.2.2	Objectif	77
5.3	Architecture opérationnelle du système de pilotage	78
5.4	Principe de la modélisation opérationnelle	79
5.5	Processus d'intégration	79
5.6	Élaboration de l'architecture opérationnelle du système de pilotage	80
5.6.1	Transformation holonique	80
5.7	Simulation orientée agents	87
5.8	Simulations et modèles de simulation	87
5.8.1	Méta-modèle Agent	87
5.9	Principe de la simulation	89
5.9.1	Simulation orientée objet	90
5.9.2	Systèmes multi-agents	90

5.10	Processus de vérification et de validation . . . . .	91
5.10.1	Élaboration de l'architecture exécutable du système de pilotage . . . . .	91
5.11	Conclusion . . . . .	93
<b>6.</b>	<b>Chapitre 6 : Validation de l'approche proposée grâce à un système manufacturier reconfigurable de conversion d'acier</b>	<b>95</b>
6.1	Introduction . . . . .	96
6.2	Modélisation des systèmes de fabrication prenant en compte les principales caractéristiques d'un SMR . . . . .	97
6.3	Intégration avec l'utilisation du paradigme holonique . . . . .	98
6.4	Implémentation de l'architecture holonique dans une plate-forme basée sur les agents . . . . .	99
6.5	Résultats et discussion . . . . .	100
6.6	Conclusion . . . . .	103
	<b>Conclusion générale</b>	<b>107</b>
	<b>Références bibliographiques</b>	<b>110</b>

# Table des figures

1	La structure de la thèse . . . . .	4
1.1	Types de variabilité . . . . .	14
2.1	Typologie des modèles en Ingénierie Système . . . . .	21
2.2	Les diagrammes SysML . . . . .	23
2.3	Holarchie . . . . .	28
2.4	Architecture générale d'un holon . . . . .	29
2.5	Procédure générale d'intégration de la conception procédurale avec la décom- position de la conception du système de fabrication . . . . .	34
2.6	Architecture holonique d'un système hybride . . . . .	35
2.7	Comportement général de l'architecture de contrôle auto-adaptative . . . . .	36
2.8	Cadre global de SysDICE . . . . .	41
3.1	Les trois sous-systèmes représentés par le cadre GRAI . . . . .	46
3.2	Processus de conception d'un système manufacturier . . . . .	46
3.3	Les processus techniques de développement ajustés selon le cycle en V et en considérant la norme ISO 15288 . . . . .	49
3.4	Cadre méthodologique pour la conception d'un système manufacturier recon- figurables . . . . .	50
3.5	Le système de pilotage de l'entreprise et ses 5 niveaux de décision . . . . .	52
3.6	Concevoir un système manufacturier reconfigurable . . . . .	52
3.7	Les 3 grandes étapes du cadre méthodologique de conception proposé . . . . .	55
4.1	Représentation de l'étape de modélisation conceptuelle . . . . .	62
4.2	Les parties prenantes dans la conception du système manufacturier reconfi- gurable . . . . .	66
4.3	Les éléments stéréotypés de la reconfigurabilité . . . . .	66
4.4	Le stéréotype de la reconfigurabilité . . . . .	67
4.5	Les caractéristiques clés de la reconfigurabilité . . . . .	68
4.6	Le diagramme de paquet de la reconfigurabilité . . . . .	68
4.7	La structure générale d'un système manufacturier reconfigurable . . . . .	71
4.8	Cas d'utilisation pour la conception d'un système manufacturier reconfigurable . . . . .	72
5.1	Objectif du chapitre . . . . .	78
5.2	Représentation de l'étape de l'intégration holonique . . . . .	79
5.3	Le concept ADACOR : le modèle de transformation holonique . . . . .	81
5.4	Processus d'intégration holonique . . . . .	84

5.5	Le profile Holonique . . . . .	85
5.6	Le profile Holonique étendu . . . . .	86
5.7	Méta-modèle Agent . . . . .	88
5.8	Représentation du processus de vérification et de validation . . . . .	91
6.1	Configuration du système de fabrication de conversion d'acier . . . . .	96
6.2	Schéma du contexte du système de fabrication de conversion d'acier . . . . .	98
6.3	Bloc de définition interne du CCM . . . . .	99
6.4	Exigences pour la traçabilité des ressources physiques . . . . .	99
6.5	États de comportement du CCM . . . . .	100
6.6	Méta-modèle de la structure holonique : système de fabrication de conversion d'acier . . . . .	103
6.7	La structure multi-agent du modèle exécutable . . . . .	104
6.8	Résultats de la simulation du processus de conversion d'acier . . . . .	105

# Liste des tableaux

1.1	Trois niveaux de représentation, qui doivent être mis en œuvre durant le processus de conception, pour la description d'un produit mécatronique . . . . .	8
1.2	Comparaison entre les SMDs et SMFs . . . . .	13
2.1	Des travaux qui donnent une synthèse conceptuelle . . . . .	33
3.1	Types du système de production choisi . . . . .	51
5.1	Transformation du point de vue structurel en PH, TH et SH . . . . .	82
5.2	Transformation du point de vue structurel en OH . . . . .	82
5.3	Transformation du point de vue comportemental en PH, TH et SH . . . . .	82
5.4	Transformation du point de vue comportemental à OH . . . . .	82
5.5	Transformation du point de vue paramétrique en PH, TH et SH . . . . .	83
5.6	Transformation du point de vue paramétrique en OH . . . . .	83
5.7	Transformation du point de vue des besoins en PH . . . . .	83
5.8	Les critères proposés pour vérifier l'efficacité du cadre proposé . . . . .	93
6.1	Les paramètres de l'agent "ContCastingMachine" (Machine de coulée continue - Continuous Casting Machine (CCM)) . . . . .	101
6.2	Les paramètres de l'agent "Crane" (Crane (Grue)) . . . . .	101
6.3	Les paramètres de l'agent "CraneController" . . . . .	101
6.4	Les paramètres de l'agent "IncomeTranscar" (IncomeTranscar (Convoyeur d'entrée continue)) . . . . .	102
6.5	Ladle . . . . .	102
6.6	Les paramètres de l'agent "OutcomeTranscar" (OutcomeTranscar (Convoyeur de sortie)) . . . . .	102
6.7	Les paramètres de l'agent "Mover" . . . . .	102
6.8	Les paramètres de l'agent "Task" . . . . .	102
6.9	Les paramètres de l'agent "Main" . . . . .	102
6.10	Les résultats de la simulation des cas de test de la re/configuration . . . . .	106

# Publications de l'auteur

## Communications dans des congrès internationaux avec actes et comité de lecture

- **Abdelmonaam Abid**, Maher Barkallah, Moncef Hammadi, Jean-Yves Choley, Jamel Louati, Alain Rivière and Mohamed Haddar, "Conceptual Design of an Intelligent Welding Cell Using SysML and Holonic Paradigm" *In Design and Modeling of Mechanical Systems-II* (pp. 3-10). Springer International Publishing, March 2015.
- **Abdelmonaam Abid**, Moncef Hammadi, Maher Barkallah, Jean-Yves Choley, Jamel Louati, Alain Rivière and Mohamed Haddar, "A SysML based-methodology for modelling disturbances in manufacturing systems using ADACOR holonic control architecture" *In 11th France-Japan & 9th Europe-Asia Congress on Mechatronics (MECATRONICS) /17th International Conference on Research and Education in Mechatronics (REM)*, June 2016.
- **Abdelmonaam Abid**, Moncef Hammadi, Maher Barkallah, Jean-Yves Choley, Jamel Louati, Alain Rivière and Mohamed Haddar, "A holonic-based method for design process of cyber-physical reconfigurable systems" *2016 IEEE International Symposium on Systems Engineering (ISSE)*, November 2016.
- **Abdelmonaam Abid**, Moncef Hammadi, Maher Barkallah, Jean-Yves Choley, Jamel Louati, Alain Rivière and Mohamed Haddar, "Integrated approach for modelling and simulation of cyber-physical systems with application to a production system" *The International Conference on Acoustics and Vibration, ICAV'2016*, March 2016.
- **Abdelmonaam Abid**, Moncef Hammadi, Maher Barkallah, Jean-Yves Choley, Jamel Louati, Alain Rivière and Mohamed Haddar, "A design approach of reconfigurable production system : An example of scalable steel converter process" *The Seventh International Congress Design and Modelling of Mechanical Systems, CMSM'2017*, March 2017.

## Article accepté dans une revue internationale

- **Abdelmonaam Abid**, Moncef Hammadi, Maher Barkallah, Jean-Yves Choley, Jamel Louati, Alain Rivière and Mohamed Haddar, "Generic Framework for Holonic Modelling and Multi-agent based verification of Reconfigurable Manufacturing Systems" *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 19, No. 12, pp. 1-17, 2018.

# Introduction générale

*“La façon la plus sûre de réussir  
est d’essayer une autre fois.”*

---

Thomas Edison

## Contexte

Le paradigme de l'industrie 4.0 est l'un des sujets de fabrication les plus populaires parmi l'industrie et les universités dans le monde et a également été considéré comme la quatrième révolution industrielle avec un impact extrême sur la fabrication à l'avenir [Kagermann et al., 2013]. Dans l'industrie 4.0, l'usine est virtualisée, les systèmes sont interopérables, les décisions sont décentralisées et l'analyse et la prise de décision s'effectuent en temps réels. Le contexte industriel européen en train de s'adapter aux nouvelles exigences et aux nouveaux paradigmes de la technologie qui évolue rapidement. Cette adaptation se consiste aux niveaux de la nouvelle technologie, des cycles de conception rapides, des usines intelligentes, une communication "machine-to-machine", l'Internet des objets et le "Cloud". Concernant l'industrie manufacturière, le concept du SMR est l'un des concepts le plus récent de l'industrie 4.0 [Gruber, 2013]. Ainsi, il constitue la principale direction de développement de la recherche sur l'industrie 4.0 [Qin et al., 2016]. En plus, il tient la promesse d'une flexibilité accrue dans la fabrication, avec une personnalisation de masse, une meilleure qualité et une productivité améliorée. Il permet alors aux entreprises de relever les défis de produire des produits de plus en plus individualisés avec un délai de mise sur le marché court et une qualité supérieure.

Les travaux de cette thèse s'inscrivent dans le cadre d'une démarche scientifique visant la mise en place d'une approche basée sur l'Ingénierie Système (IS) pour la conception des systèmes manufacturiers reconfigurables. La reconfigurabilité d'un système manufacturier est la possibilité de l'ajout, de la suppression ou de la modification des fonctionnalités, de la commande, de la structure des machines ou du processus du système en réponse aux changements de la demande du marché en produits, en volumes ou en technologies [Leitao et Restivo, 2008].

Aujourd'hui, le contexte incertain des marchés actuels et la forte concurrence internationale se traduisent par la nécessité d'avoir des systèmes capables de s'adapter aux changements de production, donnant lieu à des systèmes ayant différents principes et fonctionnalités, et visant à répondre à des exigences en perpétuels changements. En effet, les systèmes manufacturiers sont immergés dans un environnement où les cycles de vie deviennent de plus en plus courts, les demandes très imprévisibles et les produits avec des caractéristiques personnalisables. Cet environnement a amené l'entreprise à toujours viser de hauts niveaux de réactivité et de flexibilité, lui garantissant la meilleure réponse aux besoins de ses clients. Le manque de réactivité et d'adaptation des systèmes de fabrication actuels face à ces contraintes sera notre intérêt pour les adapter aux changements et perturbations et pour y intégrer de la technologie de l'information pour leurs donner plus de flexibilité et afin d'aboutir les performances requises.

Les travaux de thèse exposés dans ce manuscrit se sont appuyés sur le besoin d'une entreprise industrielle de modéliser et simuler les SMRs en intégrant le concept de la reconfigurabilité dans les systèmes manufacturiers dès les premières étapes de conception. Par conséquent, l'ingénieur concepteur va être capable de gérer les configurations des SMRs complexes qui vont s'adapter aux aléas internes ou externes, comme un exemple, lors de l'introduction d'un nouveau produit ou un changement d'urgence.

## Objectifs

L'objectif principal de la thèse est de proposer une démarche de conception intégrée permettant la modélisation et la simulation des **SMRs**. Cette démarche est multi-paradigmes, mettant en synergie divers concepts, outils et formalismes adaptés avec la modélisation et la simulation des **SMRs**, et ceci pour le but d'intégrer le concept de la reconfigurabilité des systèmes manufacturiers dès les phases préliminaires de conception. Alors, notre contribution est articulée sur les points suivants :

- Modéliser un **SMR** en minimisant ses complexités par l'abstraction ;
- Décrire la structure, le comportement et les fonctions d'un **SMR** par des modèles graphiques ;
- Contrôler l'évolution d'un **SMR** par un concept d'organisation holonique ;
- Simuler un **SMR** pour prédire son comportement par les systèmes multi-agents ; et
- Évaluer un **SMR** en fixant des critères de performances pour choisir la configuration la plus appropriée.

Pour relever ces défis, nous suggérons de développer des profils du langage formel SysML qui seront spécialisés pour la conception des systèmes manufacturiers reconfigurables de manière contrôlée. Aussi, nous établirons des règles de transformation pour passer de la modélisation conceptuelle à une modélisation exécutable dans le but de faire une abstraction et une organisation des modèles décomposés, en utilisant le concept holonique. Et finalement, nous présentons les modèles comportementaux qui vont être implémentés dans une plateforme informatique orientée agents pour évaluer les diverses configurations par des indicateurs de performance comme la productivité et la capacité de production.

## Structuration de la thèse

Le manuscrit de la thèse est structuré en six chapitres et une conclusion générale, dont nous donnons une vision synthétique dans la figure 1 :

Le chapitre 1 présente une revue de la littérature définissant le concept de la reconfigurabilité ainsi le contexte général des **SMRs**. Cette revue a pour but d'illustrer les aspects pertinents de la reconfigurabilité en lien avec l'**IS** tout en faisant ressortir les pistes de recherche intéressantes à suivre pour les atteindre.

Dans le chapitre 2 nous allons examiner différentes méthodologies et démarches de modélisation et de simulation des **SMRs**. Nous allons exposer les différents avantages et les inconvénients de plusieurs travaux qui traitent le sujet de la conception des **SMRs**. Ce chapitre permet ainsi de mettre en relief certains aspects importants qui vont être étudiés dans les chapitres 3, 4 et 5 de la thèse dans le cadre de la démarche de conception proposée pour répondre à la problématique en question.

À partir des spécifications des **SMRs** décrites dans le premier chapitre et des constatations déduites du deuxième chapitre, nous proposons dans le chapitre 3 une nouvelle démarche basée sur une approche basée sur l'**IS** pour la conception des **SMRs**. Cette démarche de conception sera détaillée dans le chapitre 4 qui présente le processus de modélisation d'un **SMR** orienté objets et le chapitre 5 qui propose le processus d'intégration orientée Holon

aussi le processus de simulation orientée agents d'un **SMR**.

Dans le dernier chapitre 6, nous définissons un exemple d'un **SMR** dans le but de valider

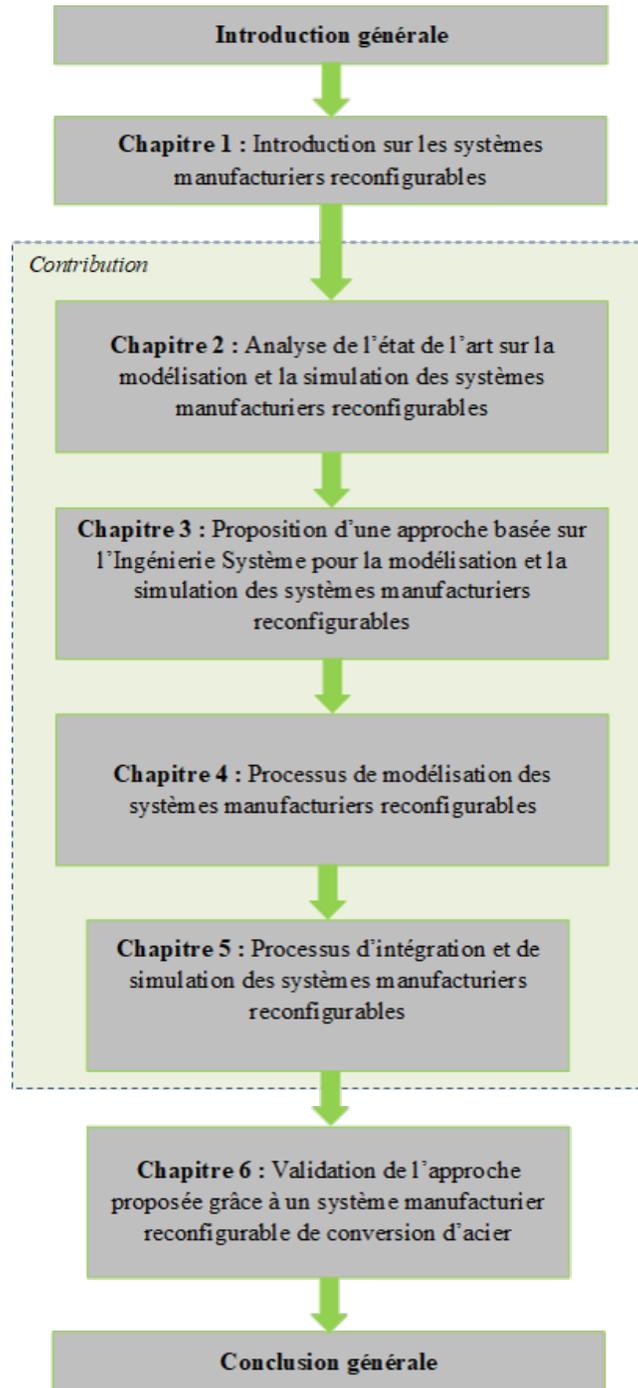


FIGURE 1 – La structure de la thèse

l'approche proposée grâce à un **SMR** de conversion d'acier.

Enfin, nous présentons des conclusions à notre travail et nous précisons les perspectives de recherche qu'offre notre contribution.

# Chapitre 1 : Introduction sur les systèmes manufacturiers reconfigurables

# Chapitre 1

## Introduction sur les systèmes manufacturiers reconfigurables

*"I think it's fairly close. It's accepted as state-of-the-art science, and it's very powerful evidence in that it's science as opposed to personal opinion."*

---

Paul Moskal

## 1.1 Introduction

L'objectif de ce chapitre est d'illustrer d'une manière générale le concept de la reconfigurabilité en faisant ressortir les pistes de recherche intéressantes à suivre pour les atteindre. Plus spécifiquement, nous sommes intéressés aux exigences, contraintes/problèmes et caractéristiques clés de la reconfigurabilité en précisant ces aspects et ces formes par rapport aux systèmes manufacturiers classiques (une seule configuration).

Afin d'aborder la particularité de notre sujet de thèse qui est la reconfigurabilité des systèmes manufacturiers, la revue de la littérature nous permettra :

- de présenter le contexte général des **SMRs** ;
- d'identifier les différentes problématiques rencontrées pour intégrer la reconfigurabilité dans la conception des systèmes manufacturiers ; et
- de citer les avantages grâce à l'intégration de la reconfigurabilité dans le processus de conception des **SMRs**.

Dans la section suivante, nous allons commencer par présenter la démarche de conception mécatronique qui a été beaucoup utilisée pour développer les **SMRs** [Alsafi et Vyatkin, 2010; Bi et al., 2008; Onori et Barata, 2009; Unsal et Khosla, 2000; Xing et al., 2009]. Le processus de conception mécatronique diffère de processus de conception classique (démarche séquentielle) dans la mesure où il traite plusieurs domaines d'ingénierie en même temps (démarche intégrée). Par conséquent, une augmentation de l'intégration entre la conception de la partie commande et de la partie opérative des **SMRs** a le potentiel de raccourcir le processus de conception mécatronique tout en augmentant les performances du système manufacturier conçu [Roos, 2007].

## 1.2 Produit et Système mécatronique

Le terme mécatronique a été proposé par un ingénieur japonais de l'entreprise nipponne « Yaskawa Electric Corporation » en 1969 [Comerford, 1994]. En effet, à l'époque, le mot « mécatronique » a été construit par la combinaison de 'méca' de mécanisme (mechanism en anglais) et 'tronique' de l'électronique (electronic) [Kyura et Oho, 1996]. La définition du terme mécatronique a été publiée en novembre 2008 par la norme française *NF E 01-010* comme étant : « une démarche visant l'intégration en synergie de la mécanique, l'électronique, l'automatique et l'informatique dans la conception et la fabrication d'un produit/système en vue d'augmenter et/ou d'optimiser sa fonctionnalité » [Devalan, 2010].

Dans cette démarche de conception, il existe trois niveaux d'intégration mécatronique qui sont classés dans le tableau 1.1. Les niveaux d'intégration fonctionnelle, architecture et physique sont basés sur des modèles cohérents qui peuvent avoir plusieurs formes, textuelles, graphiques, physiques et être décrits à l'aide d'un langage naturel graphique ou informatique. Ces modèles sont exploités dans une phase de simulation pour permettre de valider et optimiser les différentes technologies à mettre en oeuvre. Généralement, un système mécatronique contient quatre grandes fonctions : mesurer, penser, agir, et communiquer. Concernant l'évaluation des systèmes mécatroniques, à partir d'une solution principale générée par des modèles de conception et qui sera spécifiée, l'Ingénieur Système (IngS) effectue une évaluation en faisant une correspondance avec les objectifs donnés.

Aujourd'hui, les applications potentielles des systèmes mécatroniques concernent quasiment tous les secteurs industriels, ce qui explique non seulement l'importance de cette démarche de conception pour aboutir à des résultats efficaces, mais aussi parce qu'elle-même a été considérée comme domaine de recherche permettant de développer des méthodes de conception innovantes de tels systèmes hautement intégrés. L'un des défis de la conception mécatronique est une approche de conception intégrée réussie, où un langage commun pour modéliser les différentes disciplines est demandé [Holt, 2004].

Tableau 1.1 – Trois niveaux de représentation, qui doivent être mis en œuvre durant le processus de conception, pour la description d'un produit/système mécatronique [Devalan, 2010]

Niveau	Type de description
<b>Niveau fonctionnel</b>	Description des fonctions générales du produit/système mécatronique et des fonctions associées aux différents modes de fonctionnement. C'est à ce niveau que doit être réalisée l'analyse fonctionnelle.
<b>Niveau architecture</b> (aussi appelé niveau logique ou niveau multi-domaine)	Description macroscopique du produit/système mécatronique en décrivant les relations entre les différentes fonctions, les liens structurels, le comportement de ses constituants interconnectés par des flux de puissance et d'information, et des lois de commande. Utilisation de modèles de simulation permettant une analyse multi-domaine du système. C'est à ce niveau qu'une architecture cible doit être établie.
<b>Niveau physique</b> (aussi appelé niveau géométrique ou topologique)	Description fine des différents constituants d'un produit/système mécatronique et de leur intégration (interconnexion, assemblage, câblage...) nécessaire à sa réalisation (géométrie 2D ou 3D) avec optimisation volumique, simulation multi-physique et vérification des contraintes du montage et de la fabrication. C'est à ce niveau que doivent être établies les données nécessaires à la fabrication, au montage, aux tests du produit/système.

Alors, un produit/système mécatronique est un ensemble complexe et structuré de composants mécaniques, électroniques, automatiques et informatiques en interaction permanente et assurant une fonction d'usage [AFIS, 2012; Haskins et al., 2006; Shishko et Aster, 1995]. Nos travaux de recherche s'intéressent au système de production manufacturier mécatronique. Dans la suite, nous allons identifier les SMRs qui sont considérés dans tout le manuscrit comme des systèmes de production manufacturiers mécatroniques. Par conséquent, nous allons les appeler des SMRs afin de faciliter au lecteur l'apprentissage de ces systèmes complexes.

## 1.3 Introduction sur les systèmes manufacturiers reconfigurables

L'évolution de l'environnement manufacturier (ou de fabrication)<sup>1</sup> est caractérisée par une concurrence agressive à l'échelle mondiale. Parmi les besoins qui exigent de nouveaux outils et approches de fabrication, nous citons :

- Le besoin d'intégrer et/ou changer rapidement de nouvelles technologies et de nouvelles fonctions dans les systèmes<sup>2</sup> manufacturiers existants ou en phase de conception ;
- Le besoin de répondre et d'adapter rapidement la capacité des systèmes manufacturiers aux demandes du marché ; et
- Le besoin de réagir aux perturbations apparues dans l'environnement des systèmes manufacturiers.

Les **SMRs** se posent ainsi comme un outil intéressant fournissant des clés et des moyens pour satisfaire les besoins de la production manufacturière.

Dès l'année 1999, le concept des **SMRs** a été proposé sous les efforts conjoints du professeur « Koren » et de nombreux autres chercheurs bien connus [Koren et al., 1999]. Ils ont déclaré que le **SMR** bénéficiait des avantages du faible coût et d'un rendement élevé. Ils ont également souligné qu'un **SMR** doit être conçu au départ pour être reconfigurable ; autrement, le processus de reconfiguration sera long et coûteux. Ce concept est défini comme étant le changement rapide dans la structure de l'usine en utilisant des changements dans le matériel et/ou le logiciel pour ajuster la capacité de production et la fonctionnalité rapidement [ElMaraghy, 2005]. En effet, un **SMR** devrait illustrer les caractéristiques suivantes : modularité, intégrabilité, personnalisation, convertibilité, évolutivité et diagnosticabilité [Bray et al., 2008; Koren et al., 1999; Koren et Shpitalni, 2010]. En d'autres termes, un **SMR** est censé répondre aux objectifs suivants :

- Réduction maximale du temps nécessaire pour lancer la production d'un nouveau produit dans le système de fabrication [Gola et Konczal, 2013] ;
- Minimisation des coûts associés à la conception du système de fabrication adaptée à la production d'un nouveau produit [Gola et Konczal, 2013] ; et
- Élimination des coûts associés à des niveaux excessifs de flexibilité du système de fabrication [Gola et Konczal, 2013].

### 1.3.1 Systèmes manufacturiers (ou de fabrication)

#### Définitions du système manufacturier :

La fabrication peut être modélisée comme une transformation d'état de matériaux initiaux (matières premières, pièces ou ensemble de pièces), énergie et information à des produits à

---

1. Manufacturier : relatif à la manufacture ou atelier de fabrication industrielle.

2. Un système : est un assemblage de sous-systèmes, de composants matériels et logiciels et de personnes conçues pour exécuter un ensemble de tâches afin de satisfaire à des exigences et à des contraintes fonctionnelles spécifiées.

valeur ajoutée, déchets, déchets et informations utiles pour les sous-systèmes environnants (ordonnancement et contrôle, production planification, entretien, etc.) [Chryssolouris, 2013].

Dans l'industrie actuelle, la même fonction de fabrication est le noyau des entreprises industrielles où les ressources matérielles et humaines sont coordonnées de sorte que les marchandises peuvent être conçues, fabriquées et distribuées. Le système de fabrication est généralement défini comme l'organisation des ressources dédiées à cette fonction. Un système de fabrication est défini comme un ensemble d'équipements (machines de production, outils, technologies de manipulation de matériaux, mais aussi automatisation et contrôle) et de ressources humaines effectuant un ensemble d'opérations de fabrication (traitement, assemblage, manutention et stockage, inspection et contrôle) avec des produits qui les traversent. La fabrication peut être considérée comme un système dans lequel la conception du produit est la phase initiale, et la livraison des produits finis sur le marché est la phase finale. Étant donné que le domaine de la fabrication intègre de nombreuses fonctions en ingénierie et en gestion, il est utile de le diviser de manière à faciliter l'identification des problèmes et à permettre une approche scientifique des problèmes rencontrés. La fabrication peut être subdivisée alors en trois zones [Montoya-Torres, 2007] :

- Processus de fabrication : qui modifient la forme et/ou les propriétés physiques d'un matériau donné ;
- Équipement de fabrication : utilisé pour fabriquer des processus de fabrication (machines de production et outils) ; et
- Les systèmes de fabrication (manufacturiers) : qui sont les combinaisons d'équipements de fabrication et d'êtres humains liés par un flux commun de matériaux et d'informations.

Aussi, nous sommes intéressés par la définition de [Chryssolouris, 2013] du système manufacturier (ou de fabrication) qui le considère comme l'agencement et le fonctionnement des machines, outils, matériaux, personnes et informations pour produire un produit physique, informatif ou de service à valeur ajoutée dont le succès et le coût sont caractérisés par des paramètres mesurables .

Notre définition d'un système manufacturier est la suivante : « c'est une collection d'équipements intégrés et de ressources humaines (requis à temps plein ou périodiquement), dont la fonction est de réaliser une ou plusieurs opérations de traitement et/ou d'assemblage sur une matière première, une partie ou un ensemble de pièces de départ en respectant la demande du marché » [Abid et al., 2018]. Parmi les exemples de systèmes manufacturiers, nous trouvons :

- Cellules à une station.
- Grappes de machines.
- Lignes de montage manuelles.
- Lignes de transfert automatisées.
- Systèmes d'assemblage automatisés.
- Cellules de machines.
- Systèmes de fabrication dédiés.
- Systèmes de fabrication flexibles.
- Systèmes de fabrication reconfigurables.

Nous considérons tous les systèmes qui ont une seule configuration et sans avoir une réactivité interne et externe comme des systèmes manufacturiers classiques. Alors que les

systèmes de fabrication (manufacturiers) qui ont plus qu'une seule configuration et ont une réactivité interne et externe, sont appelés systèmes manufacturiers reconfigurables (SMRs). Alors, nous allons faire par la suite une étude et une comparaison entre ces deux catégories de systèmes manufacturiers afin de montrer, en général, l'importance des SMRs dans l'évolution de l'industrie.

Les composants d'un système manufacturier sont :

- **Machines de production** : aujourd'hui tous les systèmes de fabrication sont modernes, la plupart du travail de traitement ou d'assemblage est accompli alors par des machines ou à l'aide d'outils. Les machines de production sont classifiées en trois catégories :
  - *Les machines actionnées manuellement* sont contrôlées ou supervisées par un opérateur humain.
  - *Les machines semi-automatisées* exécutent une partie du cycle de travail contrôlée par un programme, et un travailleur intervient pendant le reste du cycle.
  - *Les machines entièrement automatisées* fonctionnent pendant de longues périodes sans aucune intervention humaine.
- **Système de manutention** : dans la plupart des systèmes de fabrication qui traitent ou assemblent des pièces et des produits, les fonctions matérielles suivantes doivent être fournies :
  - *Chargement* des unités de travail à chaque station.
  - *Positionnement* des unités de travail à chaque station.
  - *Déchargement* des unités de travail à chaque station.
  - *Transport* d'unités de travail entre des stations dans des systèmes multipostes : Deux catégories générales de transport de travail dans les systèmes de fabrication à plusieurs stations :
    - Routage fixe :
      - Les unités de travail passent toujours par la même séquence de postes de travail.
      - La plupart des lignes de production illustrent cette catégorie.
    - Routage variable :
      - Les unités de travail sont déplacées à travers une variété de séquences de stations différentes.
      - La plupart des ateliers illustrent cette catégorie.
  - Stockage temporaire des unités de travail.
- **Système informatique** pour coordonner et/ou contrôler les composants : fonctions typiques de l'ordinateur dans le système de fabrication :
  - Communiquer les instructions aux travailleurs (recevoir les instructions de traitement ou d'assemblage pour l'unité de travail spécifique).
  - Télécharger des programmes pièce sur des machines commandées par ordinateur.
  - Système de manutention de contrôle.
  - Production de calendrier.
  - Diagnostic de panne en cas de dysfonctionnement et maintenance préventive.
  - Surveillance de sécurité (protéger à la fois le travailleur humain et l'équipement).
  - Contrôle qualité (détecter et rejeter les unités de travail défectueuses produites par le système).

— Gestion des opérations (gérer les opérations globales).

- **Opérateurs** pour exploiter et gérer le système.

Enfin, parmi les facteurs qui définissent et distinguent les systèmes de fabrication, on cite :

- Types d'opérations effectuées.
- Nombre de postes de travail.
- Disposition du système.
- Niveau d'automatisation.
- Partie ou variété de produits.

## 1.3.2 Définitions et positionnement des SMRs par rapport aux SMFs et SMDs

### 1.3.2.1 Système Manufacturier Dédié (SMD)

L'invention des **Système Manufacturier Dédié (SMD)** aussi appelées **Ligne Transfert Dédiée (Dedicated Line) (LTD)**, a facilité le paradigme de production de masse. Chaque ligne est conçue pour produire une seule pièce à un taux de production élevé en utilisant tous les outils simultanément. Les **LTD** sont économiquement fiables si elles sont utilisées le plus longtemps possible à capacité maximale. Du moment où les volumes de production sont élevés, les coûts par unité produite sont relativement minimisés [Koren, 2006]. Toutefois, dans un contexte caractérisé par une compétitivité globale et une saturation mondiale, les **SMD** ne sont pas pleinement exploités, ce qui engendre des pertes [Koren, 2006]. Une étude dans le secteur automobile, a montré que le taux d'occupation des **LTD** est proche de 53% [Tolio et al., 1998].

### 1.3.2.2 Système Manufacturier Flexible (SMF)

L'ère des années 80 témoigne d'une évolution du besoin des consommateurs. On passe d'un besoin de production de masse à un besoin de personnalisation de masse. La nécessité d'avoir des systèmes de production réactifs et flexibles est alors apparue. Le concept de systèmes de production flexibles a été introduit en réponse au besoin de personnalisation de masse et pour fournir une grande réactivité dans les changements de produits [ElMaraghy, 2005]. Dans la période 1980 - 1990 les objectifs stratégiques des entreprises étaient : productivité, qualité et flexibilité. Les **Système Manufacturier Flexible (Flexible Manufacturing System (FMS)) (SMF)**s se basent sur des machines à commandes numériques ainsi que d'autres machines robotisées qui permettent de produire, en moyenne série, une variété de produits avec le même système [Stecke, 1983]. Il y a un glissement de la ligne de production vers les îlots flexibles de production. L'acquisition de ces machines présente un coût important. À cause des investissements initiaux élevés, il a fallu presque 20 ans pour que ces systèmes pénètrent l'industrie automobile qui représentait en 2010 le plus gros marché des **SMFs** [Koren, 2010].

Dans le milieu des années 1990 la compétitivité mondiale a prouvé que le **SMF** ne représentait qu'une solution économique partielle face à un marché compétitif [Koren et Shpitalni, 2010]. Quand la demande fluctue, l'objectif stratégique d'une entreprise est de répondre à cette fluctuation via l'adaptation de son outil de production. Cela peut être accompli par

l'extensibilité de la structure physique du système. Mais les modifications physiques dans la structure des SMFs ne garantissent pas une fiabilité économique [Koren et Shpitalni, 2010]. La structure en série d'un SMF facilitait les modifications dans les produits fabriqués, mais conduisait à un ralentissement du taux de production et n'assurait pas la flexibilité dans le volume pour faire face à des changements imprévus dans la demande. Pour rester compétitives, les entreprises manufacturières ont dû s'adapter et utiliser des outils qui non seulement permettaient de fabriquer des produits avec une grande productivité, mais également de réagir, d'une manière efficace et économique, aux évolutions du marché et des besoins de leurs clients [Koren, 2006]. Les systèmes de production reconfigurables furent alors proposés comme une solution offrant cette capacité.

Tableau 1.2 – Comparaison entre les SMDs et SMFs [Koren et al., 1999]

	SMD	SMF
<b>Limites</b>	Non flexible (produit unique)	Cher (mise au point de la machine)
	Non évolutif (capacité fixe)	Faible débit (machines mono-outil)
<b>Avantages</b>	Débit élevé	Flexible
	Fonctionnement multi-outil	Évolutif

Le SMR est destiné à combiner le débit élevé du SMD avec la flexibilité du SMF et de réagir rapidement et efficacement [Koren et al., 1999] (Tableau 1.2). Le principal inconvénient du SMR est les investissements élevés et la haute exigence technologique nécessaire pour le mettre en œuvre. Cependant, le SMR reste toujours le principal intérêt des scientifiques et des entreprises grâce aux avantages de ces caractéristiques clés que nous détaillerons dans ce qui suit.

### 1.3.2.3 Système Manufacturier Reconfigurable (SMR)

**Définition des SMRs** Selon l'Association Française de Normalisation (AFNOR) [Normalisation, 1991], la reconfiguration est définie comme étant un processus de réorganisation physique ou logique des postes de travail en terme d'implantation ou d'allocation à des produits et/ou des activités. Ce processus de réorganisation implique les deux niveaux d'un système : le procédé et la commande. Pour le procédé, il se traduit par la modification des modes d'exploitation de certaines ressources du système afin de l'adapter aux nouvelles conditions de fonctionnement et poursuivre, ainsi, sa mission voire ses objectifs de production. En ce qui concerne la commande, la reconfiguration permet de modifier certains paramètres du programme en cours. La reconfiguration est vue ici comme une technologie d'ingénierie qui traite la problématique de réaction des systèmes face à des modifications internes aux niveaux des ressources et face à des nouvelles conditions de fonctionnement résultant de l'évolution rapide du marché.

En 1999, le concept de SMR inventé par l'université de Michigan est vu comme l'une des réponses clés pour que l'industrie manufacturière puisse continuer à exister en Occident dans les années à venir [Koren et al., 1999]. Dans ce chapitre, nous allons présenter le SMR en se

basant essentiellement sur les recherches de [Koren et al. \[1999\]](#) et [Koren \[2005\]](#)).

[Wiendahl et Scholtissek \[1994\]](#) et [Wiendahl et Heger \[2004\]](#) ont identifié la reconfigurabilité comme l'un des cinq types de variabilité d'un système de fabrication (figure 1.1). Ils ont défini la reconfigurabilité comme la capacité pratique du système à commuter de façon réactive et avec un minimum d'effort et de retard sur un nombre donné de pièces ou de sous-ensembles par l'ajout ou le retrait d'éléments fonctionnels uniques. Le **SMR** est défini alors comme un système de fabrication qui évolue dans le temps dans sa configuration afin de fournir la fonctionnalité et la capacité nécessaires, lorsque cela est nécessaire [[Youssef et ElMaraghy, 2007](#)].

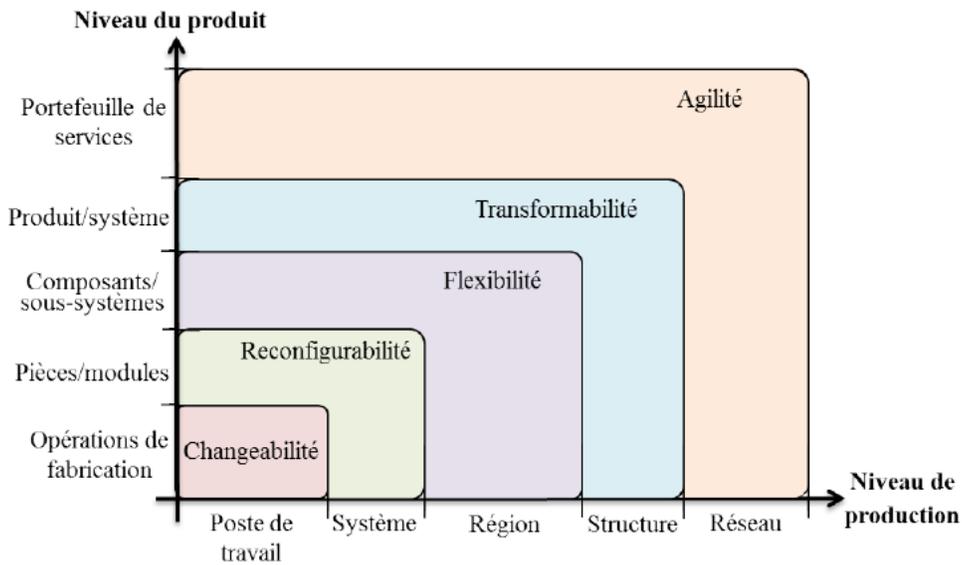


FIGURE 1.1 – Types de variabilité [[Wiendahl et Heger, 2004](#); [Wiendahl et Scholtissek, 1994](#)]

Le **SMR** est conçu dès le départ avec la possibilité de modifier sa structure dans le but d'ajuster rapidement sa capacité et ainsi de s'adapter à des fluctuations de volume et d'ajuster rapidement sa capacité afin de s'adapter à de nouveaux produits [[ElMaraghy, 2005](#); [Koren et al., 1999](#)]. Un **SMR** est installé initialement avec la capacité et les fonctionnalités juste nécessaires et peut, si besoin est, ajuster dans le futur sa structure pour s'adapter aux évolutions des exigences du marché [[Koren et al., 1999](#)]. Ceci permet de minimiser le besoin en investissement initial. A la différence d'un **SMF**, le centre d'intérêt de flexibilité d'un **SMR** est limité et porte sur une famille de produits. La reconfigurabilité concerne aussi bien la structure physique du système de production que sa structure logique.

**Les caractéristiques clés d'un SMR** Pour être reconfigurable, un système de fabrication doit posséder certaines caractéristiques clés qui doivent être intégrées pendant la phase de modélisation du système pour garantir un degré élevé de reconfigurabilité [[Koren et al., 1999](#)]. Les six caractéristiques clés sont :

- **La personnalisation** (*flexibilité limitée à une famille de produits*) : c'est l'aptitude à adapter une flexibilité personnalisée (juste nécessaire au bon moment) du système et des machines pour répondre à de nouvelles spécifications d'une famille de produits.

Lors de la conception des **SMRs**, cette caractéristique est prise en compte dans le fait qu'un **SMR** est conçu autour d'un ensemble de pièces initialement données.

- **La convertibilité** (*conception pour des modifications de fonctionnalité*) : c'est l'aptitude à transformer la fonctionnalité du système, des machines et de la commande existant afin de s'adapter aux nouveaux besoins de production. La standardisation des composants est un moyen pour réaliser la convertibilité. Dans le domaine de la standardisation, la difficulté consiste à créer des modules qui couvrent le maximum de fonctions nécessaires tout en conservant des prix de revient compétitifs à des niveaux de qualité satisfaisantes pour les utilisateurs.
- **La modularité** (*les composants sont modulaires*) : elle consiste à la conception de tous les composants du système, logiciel et matériel, de façon qu'ils soient modulaires, il existe différents niveaux de modularité : système, machine et composant. Le type de module de base définit la granularité du système. Un module d'usinage est l'ensemble d'axes, de broches et généralement d'actionneurs solution (pour la partie déplacement outil) de la fonction représentée par un module fonctionnel.
- **L'extensibilité ou l'évolutivité** (*conception pour des changements de capacité*) : c'est l'aptitude à ajuster la capacité de production du système en le reconfigurant au coût minimal, en un minimum de temps et dans une large gamme de capacités à des incréments donnés. Les **Machine Outil Reconfigurable (Reconfigurable Machine Tool (RMT)) (MOR)** doivent être extensibles au niveau modulaire. En effet, leurs modules constitutifs peuvent être ajoutés ou enlevés selon le besoin.
- **L'intégrabilité** (*interfaces simple pour une intégration rapide*) : c'est l'aptitude à intégrer rapidement et de façon précise les modules constitutifs du système par un ensemble d'interfaces mécaniques, informationnels et de commandes qui permettent l'intégration et la communication. La réalisation de la modularité des **SMRs** nécessite la standardisation des interfaces de connexion des modules : les interfaces au niveau système déterminent les connexions logistiques entre les systèmes de fabrication, les interfaces au niveau des modules d'usinage assurent les connexions entre ceux-ci et enfin, les interfaces au niveau des blocs de construction déterminent les connexions de ces derniers à l'intérieur des modules d'usinage.
- **La diagnosticabilité** (*conception pour des diagnostics faciles*) : c'est l'aptitude à lire automatiquement l'état courant du système et de la commande afin de détecter et de diagnostiquer les sources de défaillances et de les corriger rapidement. Cette caractéristique concerne en particulier la partie commande des **SMRs**.

Les relations entre les caractéristiques de reconfigurabilité et les conditions nécessaires pour atteindre la reconfigurabilité ont été décrites en quatre propositions [Koren, 2006] :

- Un système qui incorpore les caractéristiques de personnalisation et d'extensibilité est considéré comme un **SMR**.
- Un système qui possède les caractéristiques de personnalisation et de convertibilité est considéré comme un **SMR**.
- Un système de fabrication qui possède les caractéristiques de modularité et d'intégrabilité est susceptible d'être un **SMR**. En effet, la modularité peut faciliter la modification des capacités ou fonctionnalités du système, mais elle ne fournit pas une garantie de ces modifications.
- Les caractéristiques de modularité, intégrabilité et diagnosticabilité participent à la

réduction du temps de reconfiguration et de montée en cadence.

De cette analyse, nous pouvons observer que toutes les caractéristiques n'ont pas le même degré d'impact sur la reconfigurabilité du système. Les caractéristiques de personnalisation, extensibilité et convertibilité peuvent être considérées comme des caractéristiques critiques et nécessaires pour la reconfigurabilité [Koren et Shpitalni, 2010]. Les caractéristiques de modularité, intégrabilité et de diagnosticabilité sont des facilitateurs pour la reconfigurabilité et permettent de supporter les autres caractéristiques qui sont nécessaires.

## 1.4 Conclusion

Afin de rester compétitifs, les entreprises ont utilisé le nouveau concept : les **SMRs**. Ce concept offre une réactivité rapide face aux changements dans les systèmes de fabrication et une puissance capacité de suivre les changements du marché.

Nous avons illustré d'une manière générale le concept de la reconfigurabilité en faisant ressortir les pistes de recherche intéressantes à suivre pour les atteindre. En plus, nous avons présenté les **SMRs** et leurs composants. Notre motivation par rapport à cet état de l'art consiste à intégrer les caractéristiques clés de la reconfigurabilité au niveau de la modélisation des systèmes manufacturiers reconfigurables grâce aux avantages suivants :

- Réduction maximale du temps nécessaire pour lancer la production d'un nouveau produit dans le système manufacturier,
- Minimisation des coûts associés à la conception du système de fabrication adaptée à la production d'un nouveau produit,
- Élimination des coûts associés à des niveaux excessifs de flexibilité du système de fabrication [Gola et Konczal, 2013].

Dans le chapitre suivant, nous allons élaborer une analyse synthétique sur les approches utilisées pour la conception (modélisation, intégration et simulation) des **SMRs**.

# Chapitre 2 : Analyse de l'état de l'art sur la modélisation, l'intégration et la simulation des systèmes manufacturiers reconfigurables

## **Chapitre 2**

# **Analyse de l'état de l'art sur la modélisation, l'intégration et la simulation des systèmes manufacturiers reconfigurables**

*“Regardez bien la nature et vous  
comprendrez tout.”*

---

Albert Einstein

## 2.1 Introduction

Pour concevoir un **SMR** capable de faire face aux aléas internes et externes en s'adaptant aux nouvelles technologies, et tout en garantissant une continuité de performance, il est nécessaire de comprendre dans quelles mesures le concept de la reconfigurabilité peut être pris en compte dans la démarche de conception des systèmes manufacturiers. Dans cet objectif, nous sommes intéressés aux travaux existant dans la littérature et sur le cas d'un industriel souhaitant intégrer la reconfigurabilité dès la phase de conception.

Dans ce chapitre, nous analysons les différentes approches utilisées pour faire la modélisation et la simulation des **SMRs**. Ainsi, nous allons présenter les travaux effectués dans le domaine abordés par notre problématique. L'objectif est de comprendre les différentes approches et démarches existantes ainsi les caractéristiques dont il faut tenir en compte dans la conception des **SMRs**.

## 2.2 Modélisation des systèmes manufacturiers reconfigurables dans le cadre de l'ingénierie système

### 2.2.1 Définition de la modélisation

Dans un premier lieu, nous devrions savoir que la complexité des systèmes est une notion qui qualifie des systèmes présentant des difficultés d'analyse aux niveaux de leurs comportements, leur taille et la diversité des natures des phénomènes mis en jeu. Dans un deuxième lieu, nous devrions savoir comment appréhender, représenter, définir et maîtriser les systèmes complexes.

La modélisation recouvre toute représentation d'un système réel, physique ou mentale exprimée sous forme verbale, graphique ou mathématique, sachant que chaque modèle est exprimé dans un langage plus ou moins formalisé. Alors, c'est le niveau de formalisation qui détermine le positionnement du modèle entre champs théorique et champs empirique. En particulier, on distingue comme niveau de formalisation :

- **Les langages littéraires** : formés de symboles littéraires assemblés en une structure de concaténation ;
- **Les langages iconiques** : formés de symboles graphiques assemblés selon des règles diverses d'agencement ; et
- **Les langages logico-mathématiques** : formés de symboles abstraits obéissant à diverses structures, citons la théorie des ensembles, les structures algébriques, les structures d'ordre, et la théorie des catégories [Toën, 2005].

Par conséquent, le choix de niveau de formalisation d'un modèle est relié à la résolution d'un compromis entre interprétation et validité, généralité et pertinence du modèle, et temps de calcul et précision informatique. À savoir aussi, qu'il existe 3 fonctions d'un modèle :

- **Une fonction cognitive** : le modèle sert à représenter les connaissances que l'on a du système (modèle cognitif) ;
- **Une fonction prévisionnelle** : le modèle sert à prévoir l'évolution des variables et du comportement du système (modèle de simulation) ; et

- **Une fonction normative, ou décisionnelle** : le système sert à prendre des décisions d'action sur le système compte tenu des objectifs à atteindre (modèle de décision), ou encore, il représente les relations souhaitables entre variables du système. Cette fonction est nécessaire dans une démarche de conception et d'optimisation (modèles cognitifs).

On distingue aussi comme type de modélisation :

- **La modélisation informatique** : en informatique, un modèle a pour objectif de structurer les informations et activités d'une organisation : données, traitements, et flux d'informations entre entités. Il permet de modéliser la conception ou le fonctionnement d'un ensemble de programmes informatiques ;
- **La modélisation numérique** : consiste à construire un ensemble de fonctions mathématiques décrivant le phénomène. En modifiant les variables de départ, on peut ainsi prédire les modifications du système physique ; et
- **La modélisation analogique** : consiste à construire un système physique qui reproduit plus ou moins un phénomène que l'on souhaite étudier. L'observation du comportement du modèle permet de tirer des enseignements sur le phénomène d'intérêt.

Alors, la modélisation est généralement une opération complexe principalement sur le plan technique. Les systèmes de fabrication complexes sont difficiles à modéliser et sont généralement composés de plusieurs sous-systèmes et de composants de différentes technologies. Pour bien gérer la complexité de modélisation de ces systèmes de fabrication, une nouvelle discipline connue sous le nom « Ingénierie Système ».

## 2.2.2 L'ingénierie système

L'IS peut se définir comme : un processus coopératif et interdisciplinaire de résolution de problème, s'appuyant sur les connaissances, méthodes et techniques issues de la science et de l'expérience, mis en œuvre pour définir, faire évoluer et vérifier la définition d'un système apportant une solution à un besoin opérationnel identifié conformément à des critères d'efficacité mesurables, qui satisfasse aux attentes et contraintes de l'ensemble de ses parties prenantes et soit acceptable pour l'environnement, en cherchant à équilibrer et optimiser sous tous les aspects l'économie globale de la solution sur l'ensemble du cycle de vie du système [AFIS, 2012].

C'est le processus intellectuel qui permet :

- De décrire le problème (définir la finalité, mission, objectifs, les services, besoins, environnement, . . .) de manière :
  - Aussi complète que possible sur le tout le cycle de vie.
  - Partageable (parties prenantes, partenaires, concepteurs, fournisseurs de technologie. . .)
- D'élaborer une architecture système optimale qui répond au problème posé.

Tout cela de façon contrôlée, c-à-d qui assure la qualité de l'échange entre les acteurs, l'adéquation de la solution aux besoins grâce à des processus de vérification et de validation, tout au long du processus de conception.

### 2.2.2.1 L'Ingénierie système dirigée par les modèles : MBSE

La transformation d'un besoin émergent en la définition d'un système lui apportant une solution met en œuvre de multiples activités intellectuelles faisant passer progressivement de concepts abstraits à la définition rigoureuse de produits. Il est nécessaire de s'appuyer sur des représentations tant du problème que de ses solutions possibles à différents niveaux d'abstraction pour appréhender, conceptualiser, concevoir, estimer, simuler, prouver formellement, valider, justifier des choix, communiquer. C'est le rôle de la modélisation avec ces différents types de modèles (figure 2.1).

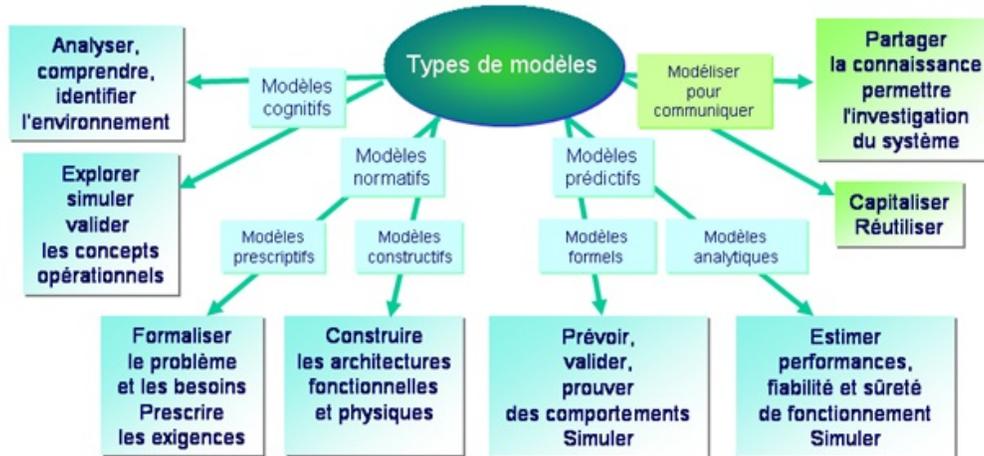


FIGURE 2.1 – Typologie des modèles en Ingénierie système [AFIS, 2012]

Alors que les processus de fabrication sont supposés être des processus stochastiques, nous devrions définir une méthode appropriée lors du développement de modèles afin de définir comment les actions correctives doivent être prises pour ramener le processus aux paramètres opérationnels prévus. À savoir, **Model-Based Systems Engineering (MBSE)** [Estefan et al., 2007] est apparu comme une méthodologie prometteuse pour l'évaluation de la performance de conception systématique et la validation de système complexe. En outre, **MBSE** est l'application formalisée de la modélisation pour soutenir les exigences du système, la conception, l'analyse, la vérification et les activités de validation. L'**MBSE** entraîne les avantages suivants :

- L'amélioration de la communication entre les parties prenantes de la conception.
- Amélioration de l'obtention des connaissances et la réutilisation de l'information par la capture des informations de façon plus standardisée.
- Augmentation de la capacité à gérer la complexité du système à travers différents points de vue du modèle du système.
- Amélioration de la qualité de conception du système en donnant un modèle exact et cohérent du système.

En tant que facilitateur clé pour le processus **MBSE**, le **Systems Modeling Language - Langage de modélisation des systèmes (SysML)** fournit non seulement des moyens pour la représentation et l'analyse de systèmes d'ingénierie complexes, mais prend également en charge la spécification, l'analyse, la conception, la vérification et la validation de systèmes qui com-

prennent du matériel, des logiciels, des données, des données personnelles, des procédures et des installations. En outre, SysML prend en charge l'échange de modèles et de données via l'échange de méta-données Extensible Markup Language (XML) [Bray et al., 2008] [McGinnis et Ustun, 2009].

### 2.2.2.1.1 Les langages de l'ingénierie des modèles

**Le langage SysML** De nombreuses normes traitant de l'IS pour décrire les processus et les activités à initier pour aider à l'ingénierie de systèmes complexes, en particulier la norme *Systems engineering - System life cycle processes (ISO 15 288)* [ISO/IEC-15288, 2005]. C'est une norme qui établit un cadre commun de descriptions de processus pour décrire le cycle de vie des systèmes. En particulier, SysML prend en charge la norme ISO 15 288.

Le site officiel de **Object Management Group (OMG)** décrit SysML comme suit [OMG] : le langage de modélisation de systèmes **OMG (OMG SysML TM)** [OMG, 2012] est un langage de modélisation graphique général pour spécifier, analyser, concevoir et vérifier des systèmes pouvant inclure du matériel, des logiciels, des informations, des données personnelles, des procédures et des installations. En outre, SysML fournit des représentations graphiques avec une base sémantique pour la modélisation des exigences du système, le comportement, la structure et l'intégration avec un large éventail d'analyses d'ingénierie. Mhenni et al. [2014], ont proposé une méthodologie basée sur SysML. Cette méthodologie comporte deux phases : une analyse en boîte noire avec un point de vue externe qui fournit des exigences d'ensemble complètes et cohérentes, de plus une analyse en boîte blanche qui conduit de plus en plus à l'architecture interne et au comportement du système. De plus, Abid et al. [2015] ont proposé une approche pour concevoir une cellule de soudage basée sur SysML afin de représenter formellement les exigences et la structure de la cellule de soudage, y compris la reconfiguration de la production.

L'un des défis de la conception mécatronique est une méthode de modélisation intégrée réussie, où un langage commun pour modéliser les différentes disciplines est nécessaire. Cependant, diverses méthodes de modélisation indépendantes du domaine ont été utilisées, par exemple, *le Bond Graph, les réseaux de Pétri, et la machine à états finis*. Une représentation formelle de l'information commune combinant ces méthodes est toujours manquante. Par conséquent, cette représentation commune est souvent spécifiée de manière documentaire et rarement associée aux informations des modèles réels.

Le défi du langage commun a fait l'objet de plusieurs travaux de recherche depuis des décennies. Nous trouvons dans les derniers travaux de recherche une focalisation sur la modélisation basée sur **Unified Modeling Language - Langage de Modélisation Unifié (UML)** pour la conception mécatronique, telle que la version mécatronique UML [Schäfer et Wehrheim, 2010], qui permet un développement piloté par le modèle tout en supportant la vérification et la génération de code. Par la suite, SysML est venu après UML pour résoudre les limites pour les applications d'IS. Dans ce qui suit, nous mettons en évidence les travaux liés à SysML et son exécution.

Généralement, en tant que facilitateur pour l'ingénierie des systèmes basée sur des modèles, un modèle SysML peut être utilisé pour effectuer des études de simulation en combinant des constructions de modélisation SysML avec d'autres environnements d'exécution.

Les modèles SysML sont conçus pour être échangés à l'aide de la norme XML Metadata Interchange (XMI) pour l'échange et le partage d'informations entre les applications et outils logiciels d'ingénierie système. L'utilisation du format XML permet à SysML d'être interchangeable entre différents outils logiciels. Il peut améliorer l'interopérabilité entre différents outils pour l'analyse des exigences, structurelles, comportementales et de contraintes. Initialement, le modèle d'exigences SysML capture les exigences fonctionnelles, de conception et de processus et les relations entre elles. Une exigence spécifie une condition qui doit être satisfaite, une fonction qu'un système doit exécuter ou un niveau de performance qu'un système doit atteindre. Les exigences proviennent de nombreuses sources, telles que les clients, les concepteurs, les ingénieurs de processus ou les organisations. Afin de capturer les éléments clés de la reconfiguration de la production, le modèle structurel SysML est utilisé en se concentrant sur la planification générique des variétés (GVP) [Jiao et al., 2007] et le mappage des caractéristiques de conception et de fabrication. Le modèle comportemental SysML permet d'obtenir une spécification complète. Chaque diagramme paramétrique représente un aspect particulier du système (par exemple, le temps de cycle, les coûts de conception et de fabrication, l'utilisation des ressources). Des diagrammes paramétriques multiples peuvent ensuite être créés pour prendre en charge l'analyse de compromis en combinant avec d'autres environnements d'exécution.

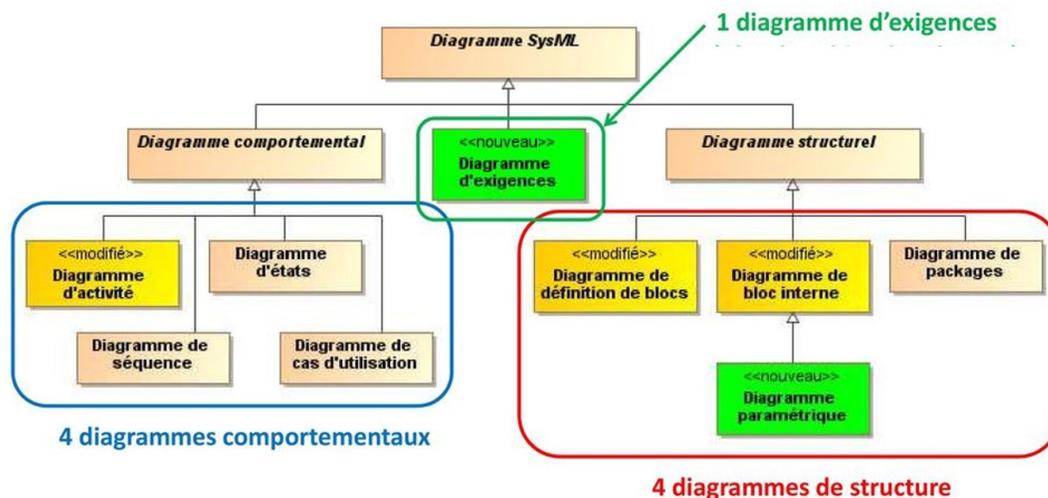


FIGURE 2.2 – Les diagrammes SysML

SysML est un langage, c'est-à-dire un ensemble de signifiés (les éléments du modèle) et de signifiants (la façon dont ils sont représentés). Ce langage est essentiellement graphique : les signifiants sont des boîtes reliées par des lignes, ces dernières étant orientées ou non selon les cas. Il définit les diagrammes suivants (figure 2.2) :

- Diagrammes de structure :
  - Le « **Block Definition Diagram - Diagramme de définition de blocs (BDD)** », remplace le « diagramme de classes » dans UML2.
  - Le « **Internal Block Diagram - Diagramme de bloc interne (IBD)** », remplace le « diagramme de structure composite » dans UML2.

- Le « [Parametric Diagram - Diagramme Pramétrique \(ParD\)](#) », c'est une extension du SysML pour analyser les paramètres critiques du système.
- Le « [Package Diagram - Diagramme de packages \(PqD\)](#) » reste inchangé.
- Diagrammes de comportements :
  - Le « [Activity Diagram - Diagramme d'activité \(ActD\)](#) » a été légèrement modifiée dans SysML.
  - Le « [Sequence Diagram - Diagramme de séquence \(SD\)](#) » reste inchangé.
  - Le « [State Machine Diagram - Diagramme d'états \(StmD\)](#) » reste inchangé.
  - Le « [Use Case Diagram - Diagramme de cas d'utilisation \(UCD\)](#) » reste inchangé.
- Les « [Requirement Diagram - Diagramme d'exigences \(ReqD\)](#) » est une extension du SysML.

Après l'analyse de la modélisation, nous allons présenter une analyse de la simulation des SMRs dans la section suivante.

## 2.3 Simulation des systèmes manufacturiers reconfigurables

### 2.3.1 Définition de la simulation

La simulation informatique ou numérique désigne l'exécution d'un programme informatique sur un ordinateur ou réseau en vue de simuler un phénomène physique réel et complexe. Elle permet de limiter le risque et d'éviter le coût d'une série d'épreuves réelles (ex : essais de véhicules). Elle peut offrir un aperçu sur le développement d'un système trop complexe pour simuler avec de simples formules mathématiques. La simulation numérique est utilisée pour :

- Prévoir l'état final d'un système connaissant son état initial (problème direct);
- Déterminer les paramètres d'un système connaissant un ou plusieurs couples (état initial - état final) (problème inverse); et
- Préparer des opérateurs à des conditions plus ou moins rares dans leur interaction avec un système complexe (simulation d'entraînement).

### 2.3.2 Architectures de pilotage d'un SMR

Les SMRs actuels sont soumis à de nouvelles contraintes (cycle de vie plus court, personnalisation de masse, gamme de produits plus diversifiée...). Le manque de réactivité et d'adaptation des architectures hiérarchiques face à ces contraintes ravive l'intérêt des chercheurs et des industriels pour les architectures hétérarchiques [Trentesaux et al., 2000]. Celles-ci sont mieux adaptées aux changements et perturbations, mais fournissent généralement des performances moins bonnes que les architectures hiérarchiques [Leitão, 2009]. Le problème majeur des architectures hétérarchiques est celui de la myopie [Pach et al., 2011]. Cette dernière est due à l'incapacité des entités constituantes d'un système à acquérir et à traiter l'information en provenance de l'environnement (éléments extérieurs au système ou autres entités) et à anticiper le futur. Cette myopie résulte d'un antagonisme entre performance individuelle (atteinte d'objectifs propres) et performance globale du système (atteinte d'objectifs globaux) [Zambrano et al., 2011]. De nombreuses approches et architectures de

la littérature [Leitão et Restivo, 2006; Van Brussel et al., 1998] contribuent au contrôle de la myopie.

Dans le cadre de l'évaluation des SMRs, plusieurs approches, on été proposées qui sont issues soit des inspirations des systèmes vivants, soit élaborées en se basant sur des technologies. Nous distinguons les approches bioniques, par phéromones comme étant des approches à inspiration naturelles et les systèmes holonique, à base d'agents ou hétérarchiques.

### 2.3.2.1 Approche bioniques

Les **Systèmes de Production Bioniques (SPB)**s ont été proposés pour la première fois par Okino [Okino, 1993]. Cette approche exploite les propriétés des systèmes naturels, c'est-à-dire qu'elle transpose les caractéristiques biologiques (auto-organisation, évolution, apprentissage, ou adaptation) pour concevoir un système de production. Cette imitation concerne aussi le pilotage de ces systèmes. En effet, les entités qui composent un système de production bionique sont autonomes et auto-organisées, par analogie avec les cellules qui composent un système vivant. Généralement, c'est une architecture de pilotage totalement décentralisée qui est adoptée pour ce genre de systèmes de production.

### 2.3.2.2 Les approches par Phéromones

Les algorithmes à base de colonies de fourmis ont été introduits par Dorigo et al. [1991]. Cette approche s'inspire du comportement de fourmis cherchant à se nourrir. Chaque fois qu'une fourmi se déplace, elle sécrète une substance (Phéromone) sur son chemin. Les autres fourmis suivront les chemins établis par leurs prédécesseurs. L'analogie entre l'approche par Phéromones et le fonctionnement des systèmes de production est la suivante :

- La création et diffusion des informations correspond à des Agent Ressource et Agent Ordre de fabrication.
- Concernant les Phéromone Informations, feedback, évaporation, ça correspond à des Objets communicants.

### 2.3.2.3 Approche de pilotage à base d'agents

Plusieurs travaux ont montré l'intérêt de l'approche à base d'agents pour modéliser un système de pilotage réactif. En effet, cette approche permet de réaliser un pilotage réparti et reconfigurable. Ces deux propriétés permettent de prendre en compte l'hétérogénéité des équipements (unités de production), leurs évolutions et également de mieux intégrer les décisions des opérateurs humains aux décisions des agents. La modélisation multi-agents appréhende en outre le système opérant non plus par une approche globale descendante, mais par assemblage de comportements locaux de sous-systèmes de pilotage. Dans ce sens, une population d'agents réactifs et cognitifs modélisent des comportements locaux des entités composant un système de production. Ces entités s'organisent grâce à l'interaction des comportements des agents afin de procurer un comportement global cohérent par rapport aux objectifs fixés. Les caractéristiques des agents englobent l'auto-organisation, la tolérance aux pannes, un comportement émergent (globalisation de la performance par combinaison des performances locales), autonomie, coopération, réactivité, adaptation et décentralisation.

#### 2.3.2.4 Architecture de pilotage hétérarchisée

Saad et al. [1997] traitent le problème de l'ordonnancement hétérarchique des SMFs en utilisant une approche fondée sur le concept du Contract Net [Parunak, 1987]. Les auteurs proposent une approche de modélisation basée sur des entités distribuées et localement autonomes. Le modèle proposé (appelé Production Réserve) intègre des mécanismes de négociations entre les différentes entités. La comparaison des résultats obtenus avec ceux donnés en appliquant les règles d'ordonnancement classiques (FIFO, EDD, SPT19, ...) montre l'intérêt d'une approche de pilotage hétérarchique. Par rapport à la problématique de l'amélioration continue des performances, cette approche contribue à la résolution des problèmes liés à l'explosion combinatoire (ordonnancement décentralisé) et à la complexité des SPBS (entités autonomes). Néanmoins, les hypothèses adoptées sont réductrices : pas de temps de transfert, temps opératoire identique pour la totalité des machines, la négociation entre les entités peut être pénalisante en temps surtout dans le cas de systèmes de grande taille et enfin les perturbations ne sont pas traitées.

#### 2.3.2.5 L'approche Holonique

L'application du paradigme holonique est relativement nouvelle pour le pilotage des systèmes de production. Cette approche associe les meilleures propriétés des systèmes de pilotage hiérarchiques et hétérarchiques (voir par exemple Product-Resource-Order-Staff-Architecture (PROSA) [Valckenaers et al., 1998], MetaMorph [Maturana et al., 1999] ou [Simão et al., 2006]). Cette association offre une garantie des performances (grâce aux mécanismes de coordination dans les systèmes de pilotage hiérarchiques) et une grande robustesse contre les perturbations (grâce à une structure de pilotage hétérarchique) [Bongaerts et al., 2000]. Morel et al. [2003] ont montré que cette approche constitue un moyen adéquat pour faire le lien entre la productique (entreprise intégrée) et l'automatique. En outre, l'approche holonique permet la représentation et l'intégration de l'opérateur humain dans le système de pilotage. Marik et al. [2003] dressent les similarités et les différences entre les systèmes multi-agents et les systèmes holoniques.

**Définition** Le concept holonique a été proposé par le philosophe Arthur Koestler afin d'expliquer l'évolution des systèmes biologiques et sociaux [Koestler, 1967]. Le mot « Holon » a été présenté par Koestler, comme la combinaison du mot grec « Holos » signifiant « entier » avec le suffixe « -on », comme un proton ou un neutron qui suggère une particule ou une partie individuelle. Plus spécifiquement, les holons présentent un double comportement qu'il a appelé l'effet Janus [R. et D., 1998]. D'une part, chaque holon a une qualité autonome. Son développement et sa fonctionnalité sont suffisants pour exister seuls. D'autre part, chaque holon a aussi une qualité coopérative qui lui permet de dépendre d'un cadre social de holons. De cette manière, ils interagissent ensemble pour atteindre les objectifs globaux du collectif [Koestler, 1967].

À partir de ces idées, le concept de fabrication holonique a été introduit par Suda au début des années 1990 [Suda, 1989] pour répondre aux nouveaux défis de la fabrication au 21ème siècle. Ce concept a été adopté au monde de la fabrication sur une gamme variée de problèmes théoriques et d'applications industrielles. Suda [1989] a donc proposé un bloc de construc-

tion ou un modèle « holon » pour la conception et l'exploitation d'éléments comprenant des procédés de fabrication similaires dans leur concept à celui défini au [Bussmann, 1998] qui est décrit dans la figure 2.4. Un holon est nécessairement composé d'une partie matérielle physique et d'une partie logicielle décisionnelle connectées par une interface intra-holon. De plus, chaque holon possède à la fois une interface humaine et une interface inter-holon pour la communication visant à atteindre les objectifs globaux [Bussmann, 1998]. La partie matérielle physique d'un holon est traditionnellement considérée comme les ressources de fabrication que l'on peut trouver dans une usine comme machines à fraiser ou à estamper [Garcia-Herreros E. et S., 1994]. Leur contrôle peut être une combinaison de contrôleurs logiques programmables (Programmable Logic Controller (PLC)), de réseaux locaux (Local Area Network (LAN)) et de Personal Computer (PC) [Garcia-Herreros E. et S., 1994].

Le Système Manufacturier Holonique (SMH) est alors un ensemble de blocs de construction (holon) autonome et coopératif pour transformer, transporter, stocker et/ou contrôler l'information et les objets physiques. Un holon consiste en une partie de traitement de l'information et souvent une partie physique [Garcia-Herreros E. et S., 1994].

En plus des propriétés d'autonomie et de coopération qui représentent les attributs fondamentaux d'un holon, certains auteurs [Bussmann et McFarlane, 1999; Mathews, 1995; McFarlane et Bussmann, 2003] ajoutent la récursivité, l'auto-organisation et la reconfigurabilité à la liste des propriétés des holons de fabrication.

- **Autonomie** : La capacité d'une entité à créer et contrôler l'exécution de ses propres plans et/ou stratégies [Garcia-Herreros E. et S., 1994]
- **Coopération** : Processus par lequel un ensemble d'entités développe des plans mutuellement acceptables et exécute ces plans [Garcia-Herreros E. et S., 1994].
- **Récursivité** : Une similitude dans le modèle d'architecture informationnelle et de communication entre holons [Mathews, 1995]
- **Auto-organisation** : La capacité des unités de fabrication à se regrouper et à se fixer afin d'atteindre un objectif de production [Garcia-Herreros E. et S., 1994].
- **Reconfigurabilité** : La capacité d'une fonction d'une unité de fabrication à être simplement modifiée de manière opportune et économique [Garcia-Herreros E. et S., 1994].

Il convient de noter que les trois dernières propriétés contribuent directement aux définitions de robustesse, flexibilité et adaptabilité.

- **Robustesse** : La capacité d'un système à ne pas avoir à répondre ou à changer de comportement parce qu'il est suffisamment bien conçu pour que ces perturbations n'affectent pas la sortie [Garcia-Herreros E. et S., 1994].
- **Flexibilité** : La facilité avec laquelle une conception de système peut être modifiée pour répondre à des exigences de produit similaires [Cutkosky et al., 1984; Garcia-Herreros E. et S., 1994] et étendue avec de nouveaux éléments pour augmenter le niveau de fonctionnalité existant [Cutkosky et al., 1984].
- **Adaptabilité** : La capacité d'un système en fonctionnement à changer de comportement pour maintenir la sortie souhaitée en présence de perturbations externes et/ou internes [Garcia-Herreros E. et S., 1994].

La robustesse, la flexibilité et l'adaptabilité sont des éléments nécessaires des systèmes réactifs et agiles.

- **Agilité** : La rapidité avec laquelle un système s'adapte aux modifications de l'enve-

loppe de production et/ou du produit dans le sens de la flexibilité de fonctionnement [Garcia-Herreros E. et S., 1994].

- **Réactivité** : La capacité d'un système de production à répondre à des conditions dynamiques (provenant de l'intérieur ou de l'extérieur de l'organisation manufacturière) qui ont un impact sur les objectifs de production [Matson et McFarlane, 1998]

Enfin, pour clarifier les systèmes holoniques dans un contexte de fabrication, la définition d'un système de fabrication holonique est donnée avec celle d'une holarchie dont les SMHs sont composés.

- **SMH** : Une holarchie (figure 2.3) qui intègre toute la gamme des activités de fabrication, de la réservation des commandes à la conception, la production et la commercialisation pour réaliser l'entreprise de fabrication agile [Garcia-Herreros E. et S., 1994].

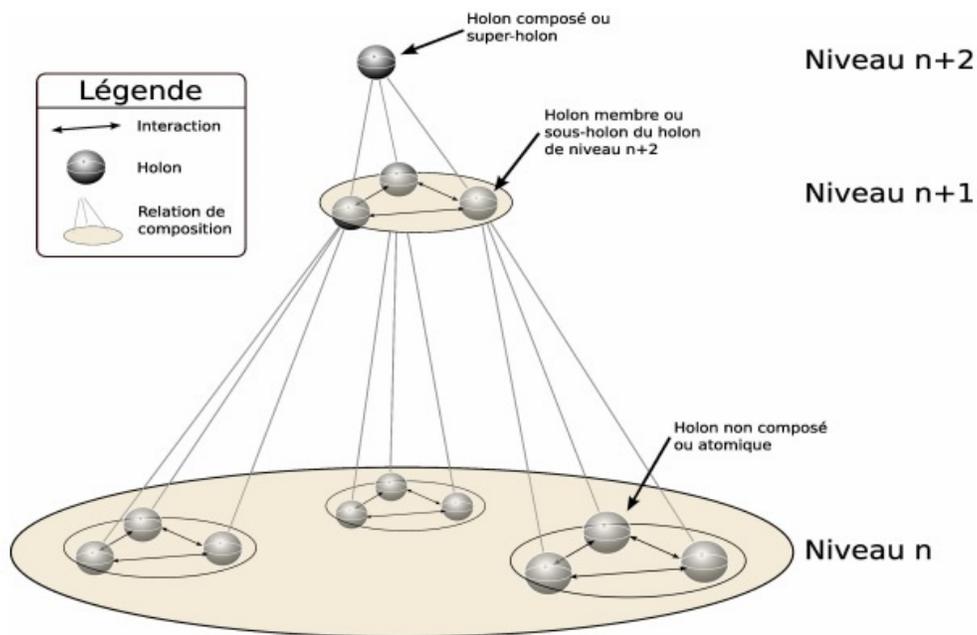


FIGURE 2.3 – Holarchie

- **Holarchie** : Un ensemble d'holons qui peuvent coopérer pour atteindre un but ou objectif. L'holarchie définit les règles de base pour la coopération des holons en limitant leur autonomie [Garcia-Herreros E. et S., 1994].

La conception d'un holon a été donnée dans la figure 2.4. Après avoir défini l'ensemble nécessaire de propriétés comportementales, l'attention peut maintenant se tourner vers les éléments de sa composition qui lui permettraient d'atteindre ces comportements. La partie matérielle physique d'un Holon est traditionnellement considérée comme les ressources de fabrication que l'on peut trouver dans une usine telle qu'une fraiseuse ou une machine à timbrer [Christensen, 1994]. Leur contrôle peut être une combinaison de contrôleurs logiques programmables (PLC), de réseaux locaux (LAN) et de PC [Christensen, 1994].

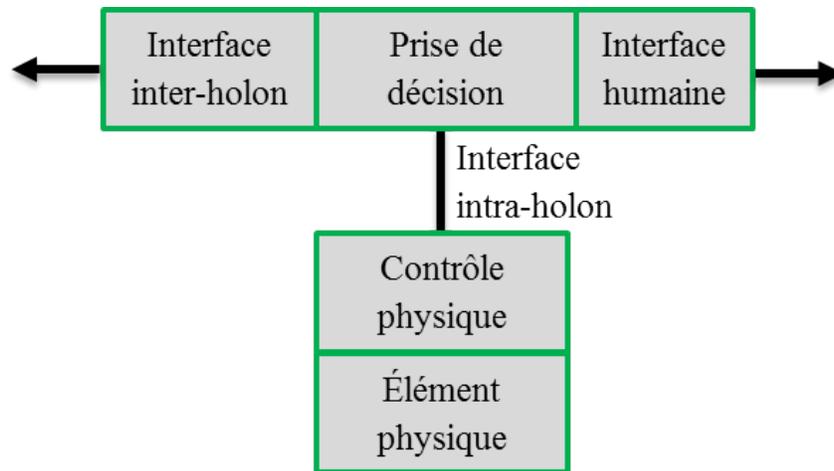


FIGURE 2.4 – Architecture générale d'un holon

### 2.3.2.6 Simulation des systèmes complexes orientés-agents

**Les systèmes multi-agents** Selon Jacques [1995] : Un agent est une entité autonome, réelle ou abstraite, qui est capable d'agir sur elle-même et sur son environnement, qui dans un univers multi-agents, peut communiquer avec d'autres agents, et dont le comportement est la conséquence de ses observations, de ses connaissances et des interactions avec les autres agents.

Un **Système Multi-Agent (SMA)** peut être considéré comme un ensemble d'agents partageant un environnement commun. Une définition d'un **SMA** est proposée dans [Durfée et Lesser, 1998] : Un réseau faiblement couplé d'agents qui interagissent pour résoudre des problèmes qui sont au-delà des capacités individuelles ou des connaissances de chaque agent.

Un **SMA** peut, d'une manière simpliste, être considéré comme un ensemble d'agents partageant un environnement commun. Jacques Ferber propose une définition détaillée des **SMA** comme étant un système composé des éléments suivants [Jacques, 1995] :

- Un **environnement E**, disposant en général d'une métrique ;
- Un **ensemble d'objets O**, auxquels on peut associer une position dans **E** à un moment donné. Ces objets (hormis les **agents**) sont passifs : les agents peuvent les percevoir, les créer, les détruire et les modifier ;
- Un **ensemble d'agents A**, lesquels représentent les entités actives du système ;
- Un **ensemble de relations R**, qui unissent les objets (et agents) entre eux ;
- Un **ensemble d'opérateurs Op** permettant aux agents de **A** de percevoir, produire, consommer, transformer et manipuler des objets de **O** ;
- Et, des opérateurs chargés de représenter l'application de ces opérations et la réaction du monde à cette tentative de modification, que l'on appellera les **lois de l'univers**.

Les caractéristiques principales des agents sont :

- **Autonomie** : est la capacité d'un agent de prendre des initiatives, d'exercer des contrôles sur ses actions et sur ses états, de percevoir les changements de son environnement et de décider quand il va agir [Jacques, 1995] ;
- **Apprentissage et adaptabilité** : est la capacité d'un agent d'apprendre et de modifier son comportement suivant les expériences [Russell et al., 1995] ;

- **Situé** : l'agent est « incorporé » dans l'environnement. Il est capable d'agir sur son environnement à partir des entrées sensorielles qu'il reçoit de ce même environnement [Demazeau et Costa, 1996];
- **Comportement Social** : un agent est capable d'interagir avec les autres agents (artificiels ou humains) dans un but coopératif ou bien compétitif [Demazeau et Costa, 1996].

Les **SMA**s : réseau(s) faiblement couplé(s) de composants logiciels actifs et persistants qui perçoivent, raisonnent et communiquent ensemble pour résoudre des problèmes qui dépassent leurs capacités individuelles. Le lecteur habitué à la programmation orientée objet peut noter que les agents sont similaires aux objets dans leur focalisation sur l'abstraction de données, l'encapsulation, la modularité et l'héritage [Booch, 2006]. Cependant, ils font la différence en ce sens qu'ils possèdent un plus grand degré d'autonomie pour contrôler leur état et leur comportement, peuvent manifester un comportement réactif, proactif et coopératif et avoir leur propre fil conducteur [Weiss, 1999].

### 2.3.3 Système multi-agents intelligent

Un **système intelligent** est un système dirigé par un objectif, un système de raisonnement d'entités interagissantes autonomes poursuivant un ensemble d'objectifs communs au-delà des capacités ou des connaissances individuelles d'une seule entité [Giret et Botti, 2004].

Un **système multi-agent intelligent** est basé sur un système multi-agents. Le but d'un système multi-agents intelligent est défini par l'ensemble des objectifs du système, tout comme les systèmes biologiques sont définis par leur but. Un système multi-agents intelligent peut être considéré comme une société ou une organisation d'agents (c'est-à-dire comme un ensemble d'agents qui interagissent ensemble pour coordonner leur comportement et coopèrent souvent pour atteindre des objectifs collectifs) [Ferber et al., 2003].

Une **organisation** est un ensemble d'agents qui interagissent et coordonnent leur comportement pour atteindre un ensemble d'objectifs communs [Ferber et al., 2003].

### 2.3.4 Holon et Agent

Le consortium **SMH** a presque universellement accepté que la partie logicielle d'un holon et sa holarchie sont activées par des agents et des **SMA**s [Van Oudheusden, 1998]. Brennan et Norrie [2001] expliquent en détail cette relation entre les holons et les agents et concluent que les **SMA**s sont une composante nécessaire de toute implémentation **SMH**.

#### 2.3.4.1 Plateformes agents

Les systèmes de fabrication intelligents distribués ou les systèmes de fabrication basés sur les agents sont basés sur le **SMA** [Leitão, 2009]. **SMA** étudie la coordination du comportement intelligent entre les groupes d'agents. Un agent est un système de computation autonome et flexible, capable d'agir dans un environnement [Ferber, 1999]. **SMA** [Wooldridge, 2009] est à la fois un paradigme et une technologie qui propose la conception de systèmes basés sur des sociétés d'entités distribuées, décentralisées, autonomes et intelligentes appelées agents. Chaque agent a une vision représentative du système et doit donc coopérer avec

les autres pour atteindre les objectifs prédéfinis globaux. Les holons et les agents sont des concepts très similaires [Leitão, 2009] et ils augmentent l'adaptabilité et la robustesse des systèmes. Ils sont caractérisés par des concepts tels que l'autonomie, la proactivité, la coordination et la communication afin de s'adapter à l'environnement. Les différences entre SMH et SMA sont liées à la façon dont l'information est gérée. La gestion physique et de l'information est clairement séparée dans les systèmes holoniques, mais les SMA ne les distinguent pas. La récursivité est très typique des systèmes holoniques, alors que la mobilité est courante dans les technologies SMA. Les agents du SMA peuvent coopérer ou concourir pour atteindre leurs objectifs, tandis que les holons coopèrent toujours pour résoudre un problème. Les SMAs permettent de concevoir et de mettre en œuvre des systèmes décentralisés et distribués dans lesquels chaque agent peut prendre ses propres décisions de contrôle et modifier son comportement en utilisant des informations provenant de l'environnement ou de son expérience antérieure. Selon Giret et al. [2005], les SMAs sont de bons candidats pour la modélisation des SMHs. Les systèmes (holoniques) basés sur des agents sont mis en évidence comme des outils prometteurs pour gérer la complexité, les changements et les perturbations dans les systèmes de production.

Le paradigme des SMAs est apparu au début des années 1980. Il offre aujourd'hui une alternative intéressante pour la conception, la mise en œuvre ou la simulation et la compréhension de systèmes coopératifs ou compétitifs (l'interaction est un support de la coopération entre entités), distribués (les entités du système ne partagent pas de connaissances globales) et ouverts (capable d'interagir avec des composants non spécifiés initialement ou de faire partie d'un système plus global). Les SMAs sont particulièrement utiles, pour résoudre des problèmes et concevoir des systèmes nécessitant la distribution (des traitements, du contrôle et des données) et l'autonomie des entités.

Définir un système revient à se situer à un niveau d'abstraction donné et à essayer de spécifier :

- la fonction globale du système ;
- les entités qui le composent en termes de rôles, de comportements et de dynamique ;
- les interactions entre ces entités d'une part, et entre ces entités et leur environnement d'autre part.

Nous avons présenté une analyse de la modélisation et de la simulation des SMRs afin de pouvoir comprendre les approches qui vont utiliser les différents concepts et paradigmes évoqués dans les sections précédentes.

Avant de passer à l'analyse synthétique sur les approches utilisées pour la conception des systèmes manufacturiers reconfigurables, nous présenterons la problématique de cette thèse dans la section suivante.

### 2.3.5 Problématique

L'apparition des aléas au sein d'un système manufacturier peut engendrer des conséquences non seulement anecdotiques mais aussi souvent catastrophiques. Ces aléas peuvent être des défaillances internes ou externes au système. Une des solutions la plus souvent utilisée pour faire face à ces aléas est la redondance, mais elle est très couteuse et parfois inefficace pour des défaillances imprévues. Dans le passé, les systèmes manufacturiers flexibles (SMFs) et les systèmes manufacturiers dédiés (SMDs) ont été les principaux paradigmes

de fabrication dans l'industrie. Aujourd'hui, les systèmes manufacturiers reconfigurables (SMR), devenant de plus en plus utilisés pour faire face aux aléas, dans la recherche de leur performance, leur modélisation et leur simulation, s'avèrent nécessaires.

En effet, la modélisation conceptuelle des SMRs peut être développée dans le cadre de l'IS qui est une démarche méthodologique permettant de maîtriser la conception des systèmes et des produits complexes. Comme le langage de modélisation SysML est un moteur clé de l'ingénierie des systèmes basé sur des modèles, il permet à l'ingénieur modélisateur d'établir une architecture de solution décrivant la structure et le comportement d'un système manufacturier. Alors, la modélisation conceptuelle d'un SMR nous amène à répondre à la première question :

**Quel artefacts peuvent être créés pour aider le concepteur-modélisateur à modéliser conceptuellement un SMR ?**

De nombreux travaux de recherche s'appuient sur le paradigme holonique, qui est la structure organisationnelle la mieux adaptée aux environnements dynamiques grâce à un réseau d'entités autonomes qui s'appellent des holons, afin de faire la modélisation opérationnelle. Cependant ces travaux nous semblent présenter des faiblesses. Ces modèles ne prennent pas suffisamment en compte le concept de la reconfigurabilité, notamment leurs caractéristiques clés comme la modularité ou l'évolutivité. Aussi, il n'y a pas une intégration entre la modélisation conceptuelle et la modélisation opérationnelle, c'est-à-dire, il n'y a ni une continuité, ni une cohérence entre les modèles établis. D'un point de vue scientifique, la modélisation opérationnelle d'un SMR nous amène à répondre à la deuxième question :

**Comment peut-on garantir la continuité et la cohérence par la modélisation opérationnelle pour faire face à un changement dans un SMR suite à l'occurrence d'un aléas interne ou externe ?**

La simulation est l'une des solutions qui permet de vérifier le bon fonctionnement et d'évaluer les performances d'un SMR. Mais, l'identification des meilleures configurations à prendre suite à l'apparition d'un aléa interne ou externe, est considérée comme l'une des problématiques dans cette thèse. La simulation orientée agents a été considérée par des chercheurs comme l'une des solutions la plus pertinente. Cependant, l'utilisation des agents, qui sont des entités autonomes, ne peuvent pas tout faire sans prise en compte des critères définis pendant la phase de la modélisation, et a des conséquences importantes au niveau de la simulation dans le cas où ils sont négligés. Alors, la simulation d'un SMR nous amène à répondre à la troisième question :

**Comment peut-on faire la mise en œuvre des modèles opérationnels au sein d'un système informatique pour simuler et évaluer un SMR ?**

## **2.4 Analyse synthétique sur les approches utilisées pour la conception des systèmes manufacturiers reconfigurables**

La synthèse du design conceptuel est la phase de base et de départ du processus de conception. Au cours de cette phase, les concepteurs doivent traiter un grand nombre de ressources de conception pour construire des modèles conceptuels qui répondent aux exigences fonc-

tionnelles.

Ces systèmes doivent être conçus pour satisfaire certaines exigences et contraintes varier au fil du temps. Les améliorations récentes de la productivité ont été davantage attribuées aux améliorations apportées à la conception et à l'exploitation des systèmes de fabrication, ainsi qu'à la conception des produits qu'aux procédés de fabrication ou aux améliorations technologiques. Certaines théories et méthodologies de conceptions modernes, telles que les **Axiome de conception (Axiomatic Design) (AD)** ([Cochran et al., 2000; Suh, 1998, 2001]) ont été appliquées à la conception de systèmes de fabrication.

Tableau 2.1 – Des travaux qui donnent une synthèse conceptuelle

Nom et références	Description du processus de conception
Le cadre FBS (systèmes de conception à base d'agents) [Gero, 1990; Gero et Kannengiesser, 2004]	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Variables de fonction (F) : décrivent la téléologie de l'objet, c'est-à-dire à quoi il sert.</li> <li>• Variables de comportement (B) : décrivent les attributs dérivés ou susceptibles d'être dérivés des variables de structure (S) de l'objet, c'est-à-dire ce qu'il fait.</li> <li>• Variables de structure (S) : décrivent les composants de l'objet et leurs relations, c'est-à-dire ce que c'est.</li> </ul>
Théorie de conception axiomatique pour le système (système de fabrication et système logiciels) [Suh, 1995, 1998, 2001]	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Domaine client : les besoins du client et les attributs recherchés par le client dans un produit ou un processus ou des systèmes ou des matériaux.</li> <li>• Domaine fonctionnel : les besoins du client sont spécifiés en termes de contraintes fonctionnelles et de contraintes.</li> <li>• Domaine physique : contient les paramètres de conception qui satisfont aux exigences fonctionnelles spécifiées.</li> <li>• Domaine de processus : développer un processus caractérisé par des variables de processus.</li> </ul>
Modèle de représentation des connaissances [Camelo et Mulet, 2010]	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Permettre au concepteur de démarrer la description d'un problème de conception à partir de n'importe quel niveau d'abstraction.</li> <li>• Augmenter le nombre de relations.</li> <li>• Considérer l'influence des flux externes de l'environnement sur plusieurs niveaux d'abstraction.</li> <li>• Mettre en œuvre un processus flexible de synthèse pour améliorer l'exploration des connaissances et élargir les voies d'exploration lors de la synthèse.</li> <li>• Représenter les intentions des utilisateurs dans le modèle de synthèse au moyen d'un ensemble standard de verbes, évitant ainsi toute ambiguïté.</li> </ul>
Approche systématique pour la conception technique [Pahl et Beitz, 2013]	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Planification du produit et clarification de la tâche.</li> <li>• Design conceptuel.</li> <li>• La conception détaillée.</li> </ul>
Système de conception conceptuelle automatique assisté par ordinateur (CACDS) [Chen et Xie, 2017]	<ul style="list-style-type: none"> <li>• L'intégration fonctionnelle est au cœur de la phase de conception : la sortie de l'intégration fonctionnelle est une solution fonctionnelle (les exigences fonctionnelles, les éléments fonctionnels et leurs entrées et sorties), qui est le point de départ de la conception détaillée. Pas de considération ni de l'intégration comportementale ni de l'intégration structurelle.</li> </ul>

Les études mentionnées dans le tableau 2.1 sont très utiles pour nous pour construire la nouvelle approche de synthèse de conception. Ces outils d'assistant de calcul pour la synthèse du design conceptuel sont établis sur la stratégie de conclusion des ressources de conception en unités fonctionnelles, puis, les reliant ensemble dans les schémas de synthèse. Cette stratégie est largement appliquée dans le domaine de la synthèse conceptuelle. Cependant, la plupart des travaux anciens sont axés sur un domaine d'ingénierie spécifique. Comment rendre cette étude plus commune et adaptée à des domaines largement conçus, est encore un problème qui nécessite une attention particulière. Pour cela, le niveau d'abstraction de cette étude devrait être plus élevé pour dépasser la limitation des disciplines, et certains principes fondamentaux et essentiels de l'activité de conception devraient être étudiés plus avant,

comme la structure d'un schéma de synthèse de conception.

### 2.4.1 Approches de conception intégrées

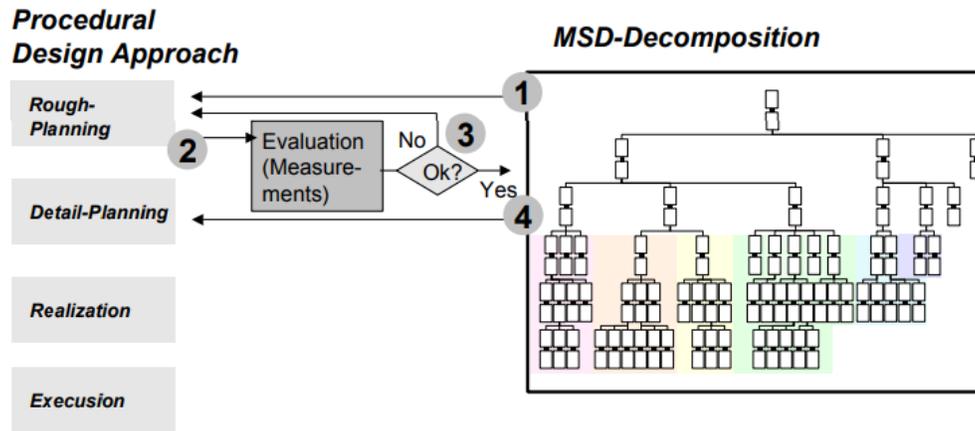


FIGURE 2.5 – procédure générale d'intégration de la conception procédurale avec la décomposition de la conception du système de fabrication [Cochran et al., 2000]

Cochran et al. [2000] ont expliqué comment la procédure de conception traditionnelle peut être liée à la décomposition des exigences du système de fabrication (figure 2.5). Leur méthodologie a été proposée pour résoudre les limitations des procédures de conception qui suivent une approche descendante structurée et qui ne permettent pas alors au concepteur de reconnaître comment les décisions de conception à diverses étapes affectent les exigences globales du système. La décomposition relie les objectifs de conception du système (exigences fonctionnelles) aux solutions de conception (paramètres de conception) en appliquant un plan axiomatique [Suh, 1998]. La décomposition conduit à six domaines fonctionnels différents : qualité de la production manufacturière, résolution de problèmes pour les perturbations existantes, obtention d'un temps prévisible du système, réduction du temps de traitement moyen, travail direct et indirect, et l'investissement. Concernant la procédure systématique de conception de système, elle est composée par les phases suivantes [Kettner et al., 1984] :

- détermination des objectifs du système ;
- préparation ;
- planification approximative ;
- planification idéale ;
- une planification réaliste ;
- planification détaillée ;
- planification opérationnelle ; et
- exécution

Les 4 étapes proposées qui sont effectuées pour la combinaison de l'approche de décomposition et de l'approche de conception procédurale sont :

1. La décomposition de la conception du système de fabrication définit les objectifs du système pour la première phase du processus de conception (phase de préparation).

2. La phase de préparation de la conception procédurale doit répondre aux objectifs issus la décomposition de la conception du système de fabrication.
3. L'évaluation vérifie, si les objectifs énoncés dans la décomposition de la conception du système de fabrication sont atteints.
4. Répétition des étapes 1 à 3 pour la phase suivante.

Enfin, les auteurs ont prouvé que la combinaison de la procédure de conception avec la décomposition fonctionnelle fournit aux concepteurs un outil pour concevoir des systèmes de fabrication en tenant compte des exigences du système de fabrication tout au long du processus de conception.

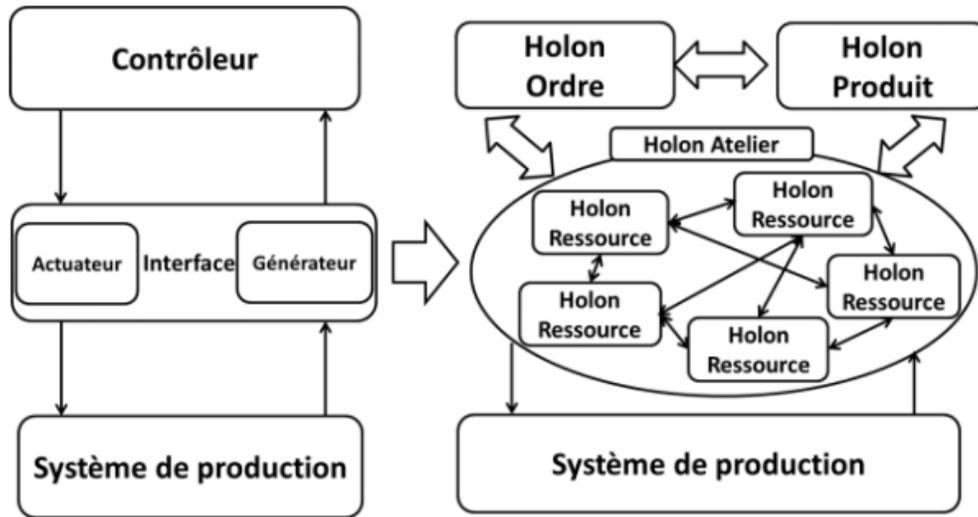


FIGURE 2.6 – Architecture holonique d'un système hybride [Indriago et al., 2015]

Indriago et al. [2015] ont proposé un modèle intégré pour évaluer la performance d'un contrôle prédictif-réactif simple en utilisant une approche holonique d'un système hybride. Le processus de production d'un système hybride est semi-continu, qui, est similaire à des processus continus impliquant des flux continus de matériaux et de services, mais dont l'état du système peut être discret, dans le sens où sa dynamique change à des instants précis correspondant à des événements. Ce type de système est structuré en trois niveaux différents, le contrôleur, le système et l'interface (figure 2.6). Ce type de système est généralement modélisé par des modèles de commutation représentant l'ensemble du système. Tout processus de reconfiguration est donc très complexe, car les temps de calcul sont fortement liés à la taille du système. Ils ont trouvé une adaptation d'une architecture de référence holonique sur un système hybride, ainsi le modèle proposé est composé de l'union du modèle hybride et du modèle holonique, où le contrôleur est représenté par le holon produit et le holon d'ordre, l'interface est représentée par la partie logique de la ressource holon, et enfin le système est représenté par la partie physique de la ressource holon. Un comportement prédictif-réactif simple a été défini avec l'objectif de minimiser le nombre de commutateurs du système, et comparé à la solution optimale trouvée par l'algorithme [Mixed Integer Linear Programming \(MILP\)](#) pour atteindre la solution optimale sur les petites instances.

Les résultats générés ont montré une bonne performance du contrôle holonique en termes d'optimalité, ce qui surpasse totalement l'algorithme MILP en termes de temps de calcul.

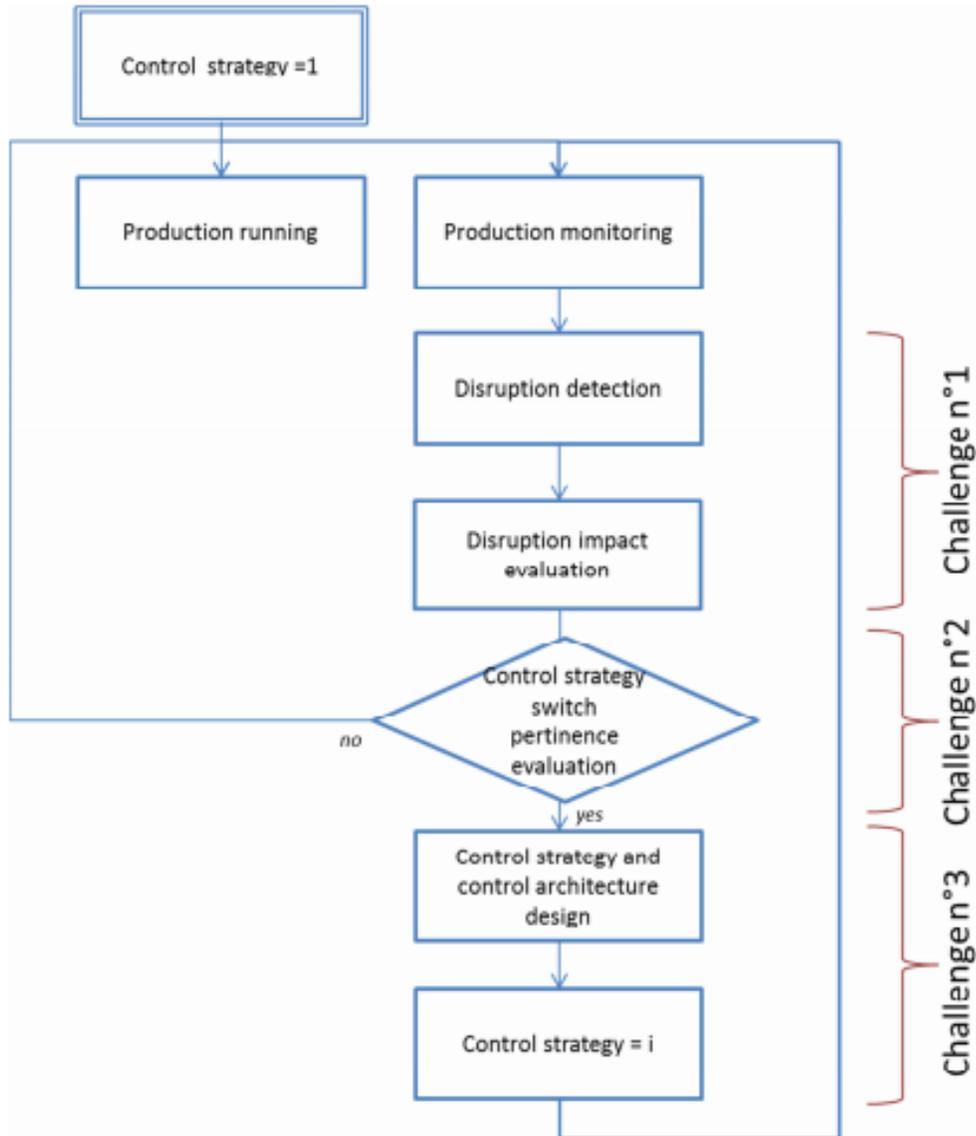


FIGURE 2.7 – Comportement général de l'architecture de contrôle auto-adaptative [Cardin et al., 2017]

Cardin et al. [2017] ont posé trois défis industriels (figure 2.7) liés à une Architecture de Contrôle Hybride (ACH) qui est capable de gérer de lourdes perturbations lors de l'exécution du scénario de production, à savoir la détection des perturbations et l'évaluation des impacts, la définition des mécanismes de commutation et la conception des ACHs. Cette architecture vise à capitaliser les avantages des approches réactives (la génération de solutions applicables) et prédictives/proactives (l'utilisation de la redondance par exemple), tout en limitant leurs inconvénients (la diminution de leurs performances rapidement avec le temps

par rapport aux performances purement centralisées (ou prédictives) si aucune perturbation ne se produit pour les approches réactives, et une faible robustesse et des limites de temps de calcul pour les approches prédictives/proactives). Alors, les auteurs ont utilisé les systèmes de contrôle holoniques/multi-agents qui couplent des mécanismes prédictifs/proactifs et réactifs dans des agents/holons. Plus précisément, l'idée est de fournir à ces agents/holons des informations et des mécanismes leur permettant de décider en ligne de leur meilleur comportement face aux événements attendus et inattendus (par exemple, rester en mode prédictif, passer en mode réactif, revenir en mode prédictif, passer à un mode intermédiaire contraint ...).

[Antonova et Batchkova \[2008\]](#) ont suggéré une méthodologie pour le développement de systèmes de contrôle multi-agents basés sur l'utilisation combinée des normes [UML/SysML](#), [Foundation for Intelligent Physical Agents \(FIPA\)](#) et IEC-61499 qui est appropriée pour le développement d'un système de contrôle ouvert, interopérable, reconfigurable et distribué. Cette méthodologie permet de décrire l'ensemble du cycle de vie du système de contrôle et de réaliser l'encapsulation et la réutilisation des entités définies (agents). L'une des caractéristiques les plus essentielles de cette approche est que les ingénieurs de contrôle peuvent modéliser le système de contrôle en boucle fermée et appliquer les différents types de techniques d'analyse afin de déterminer si ces modèles répondent à leurs exigences de performance et d'ordonnement du fonctionnement interne de ces techniques.

Dans un autre travail, [Mejjaouli et Babiceanu \[2014\]](#) ont proposé une nouvelle architecture de système holonique pour la surveillance de l'état et la récupération pour les entreprises durables, qui comprend des mécanismes de détection de fautes, d'isolement et de récupération. Le [SMH](#) avec des capacités de surveillance et de contrôle en temps réel est composé des éléments suivants :

- Holon tâche : est responsable de l'allocation des ressources en temps réel et de la planification des tâches.
- Holon opérationnel : est responsable du traitement des tâches assignées par le Holon tâche (à savoir, Machine Holon, Manutention de matériaux Holon, Équipement Holon).
- Superviseur du système Holon : est l'unité de surveillance des cellules de la machine.
- Superviseur des conditions Holon : est responsable du chargement/déchargement et du transport des articles du service des achats.

L'architecture du modèle holonique amélioré a été obtenue à l'aide d'un diagramme d'activité [SysML](#). Les résultats de simulation en utilisant l'environnement de simulation Arena montrent une amélioration significative en termes de productivité, de réactivité, de flexibilité et de qualité lorsque le système de surveillance et de récupération des conditions est utilisé.

[Varvara \[2014\]](#) ont présenté une nouvelle solution pour l'intégration d'informations sensorielles pour un système expérimental holonique en utilisant la stratégie de conception [GORITE](#) pour intégrer les informations sensorielles au niveau de décision de l'agent en utilisant l'analogie d'équipe-holon et les mécanismes explicites d'exécution des objectifs. L'orientation d'équipe de ce cadre permet une définition claire des comportements complexes du système en utilisant des méthodologies de conception descendantes.

[GORITE](#) (framework logiciel) traite le comportement comme une activité normale d'ingénierie logicielle avec une portée bien définie. Cette portée est définie par la spécification

explicite des objectifs qui préoccupent les entités du système, ainsi que par la manière dont ces objectifs sont décomposés en sous-objectifs et, en fin de compte, en actions. Après l'orientation de l'équipe, le contrôle et la coordination des systèmes de fabrication à organisation holonique peuvent être modélisés complètement et intuitivement avec le framework GORITE. Les objectifs ont une représentation explicite et peuvent être manipulés directement dans un contexte de raisonnement **Belief Desire Intention (BDI)** au niveau du système. L'équipe agit selon les mécanismes de raisonnement **BDI** classiques en sélectionnant différentes voies pour la réalisation des objectifs, mais de manière améliorée, car elle peut reconsidérer la manière de réussir lorsque le contexte actuel a changé. Ce sont les prémisses favorables de la mise en œuvre présentée qui offre de meilleurs résultats par rapport aux méthodes de planification classiques.

Les résultats obtenus sont : la réaction rapide et dynamique du système aux changements de son environnement, obtenant ainsi des avantages personnel visibles.

**Quintanilla et al. [2014]** ont proposé une stratégie de modélisation pour la spécification de processus d'un produit qui se félicite de la personnalisation du produit et améliore le potentiel flexible, réactif et productif du système manufacturier holonique pour atteindre l'efficacité de la production. Ils ont proposé ainsi une méthodologie pour déterminer les capacités de production du Ressource Holon (RHs) qui peuvent s'interfacer avec la spécification de processus du produit proposé. Ce travail s'adresse principalement aux entreprises qui ont besoin de mettre en œuvre de nouveaux systèmes de production suffisamment flexibles pour produire une grande variété de produits que la nouvelle tendance de la personnalisation des produits implique. Leurs méthodologie s'appuie sur **PROSA**, une architecture de référence holonique classique, qui utilise une spécification de produit, une spécification de processus et un moyen de déterminer les capacités de production et la capacité d'une ressource. Les services de fabrication d'architectures orientés services représentent une opération unique ou une série d'opérations de nature plus ou moins intangible, qui se déroulent normalement dans les interactions entre un client et un fournisseur, donnés comme une solution à un problème client. Les réseaux de Petri-Nets, un formalisme de modélisation bien connu dans le domaine académique et industriel, s'avère être un très bon candidat à cet effet. Ceci est principalement dû à sa capacité caractéristique à capturer les aspects synchrones et asynchrones entre les services de fabrication impliqués dans le processus de production. Grâce à cela et à leurs mécanismes d'évolution, les réseaux de Petri-Nets ont la capacité de représenter un grand nombre de combinaisons de séquences avec un seul réseau. Ceci est d'une grande importance, car l'objectif principal est de concevoir un modèle d'information sur la fabrication des produits permettant l'exploitation de la flexibilité inhérente au **SMH**, qui à son tour projette l'exploration de tous les flux de production alternatifs possibles.

**Chalfoun et al. [2013]** ont proposé un modèle générique pour les **Reconfigurable and Agile Manufacturing Systems (RAMS)** ce qui permet la modélisation de systèmes de fabrication réels et permet une bonne description des activités de reconfiguration.

Les Systèmes Reconfigurables s'agissent d'après eux le faite de fournir exactement la capacité et la fonctionnalité nécessaires, exactement quand c'est nécessaire. Quant aux Systèmes de Fabrication Agiles, elle est définie comme la capacité de survivre et de prospérer dans un environnement concurrentiel de changements continus et imprévisibles, en réagissant

rapidement et efficacement à l'évolution des marchés, grâce à des produits et services conçus par les clients.

La phase de conception proposée est basée sur une décomposition de **RAMS** selon deux axes :

- **Le premier axe** : décrit la structure du système (définissant les éléments du système et ses capacités en tant que ressources et produits et les connexions entre eux) et ses configurations (décrivant comment les éléments de structure sont utilisés et comment ils sont organisés)
- **Le deuxième axe** : distingue la partie logique (décrivant les fonctions à réaliser) et la partie physique (décrivant l'organisation des différents éléments matériels qui vont réaliser ces fonctions).

Le modèle générique de **RAMS** dans leur travail aide à :

reconfigurer la ligne de production rapidement et efficacement en modifiant les ressources, les coordonnées, les capacités associées et les programmes de contrôle actuellement utilisés pour chaque composant d'une nouvelle structure. Par conséquent, les utilisateurs réaffectent de nouvelles opérations à de nouvelles ressources. Ainsi, la fonction de reconfiguration réduit le temps avec toutes les conséquences positives en termes de logistique. Par conséquent, l'utilisation d'un **RAMS** permet d'améliorer la qualité du service et de fournir plusieurs avantages.

**Chalfoun et al. [2014]** visent à spécifier la fonction de reconfiguration d'un **RAMS** en :

- Définissant les exigences pour spécifier les fonctions que le système devrait atteindre, et analyser les exigences fonctionnelles et non-fonctionnelles.
- Définissant les contraintes qui doivent être satisfaites par le futur système **RAMS**.
- Décrivant avec un haut niveau de fonctionnalité du système.
- Décrivant la structure **RAMS**.

Le **RAMS** est un système industriel composé des ressources stationnaires suivantes :

- k machines PT1, ..., PTK (usinage, traitement, assemblage, ...).
- Q machines d'urgence PS1, ..., PSQ qui permettent au système de continuer à fournir des services lorsqu'une machine tombe en panne.
- Deux tampons, IN et OUT, qui sont respectivement les tampons d'entrée et de sortie.
- Chaque machine est équipée d'un étui de rangement situé à son entrée.
- Toutes ces ressources stationnaires sont accessibles via un robot mobile AGV (véhicule guidé automatique).

Les tampons IN et OUT sont associés aux ressources de transport "loader and unloader".

Les opérations sont décomposées en six groupes : opérations principales, opérations de transport, opérations de stockage, opérations d'activation, opérations d'affectation et opérations d'implantation.

En tant que travail en perspective, les auteurs introduiront un modèle générique pour ce système et s'intéresseront au processus de reconfiguration qui définit les mécanismes utilisés lors de la reconfiguration du système.

**Leitão et Restivo [2003]** ont traité de l'auto-organisation et des capacités d'apprentissage dans les holons autonomes et coopératifs. Il a conclu que ces capacités soutiendront l'adaptation dynamique du contrôle de fabrication à l'évolution de la fabrication et de l'urgence,

en particulier la réaction agile aux perturbations inattendues en utilisant [ADaptive holonic COntrol aRchitecture for distributed manufacturing systems \(ADACOR\)](#) [Leitão et Restivo, 2006]. L'architecture [ADACOR](#) porte sur l'adaptation dynamique et agile aux perturbations et l'intégration de toutes les fonctions de fabrication, à savoir la planification du processus, la planification et l'exécution du plan.

[Babiceanu et al. \[2005\]](#) ont décrit une solution pour planifier les dispositifs de maintenance dans l'environnement de fabrication cellulaire en utilisant l'approche de contrôle holonique. Par conséquent, le système holonique est capable de s'adapter aux nouveaux emplois et de fournir de bonnes solutions en temps réel.

De plus, [Wang et Choi \[2014\]](#) ont proposé une nouvelle approche holonique basée sur la décomposition pour minimiser la durée de fabrication d'un atelier d'écoulement flexible avec un temps de traitement stochastique. Une politique d'ordonnancement est assignée à chaque holon de cluster pour la génération d'horaire.

[Indriago et al. \[2015\]](#) ont utilisé une approche holonique appliquée à un système d'arrivée de commutateur pour évaluer la performance d'un contrôle prédictif réactif simple. Par conséquent, ils ont rencontré de bonnes performances de contrôle holonique en termes d'optimalité.

Ensuite, [Xue et al. \[2001\]](#) ont présenté un développement d'un mécanisme d'ordonnancement optimal intelligent. Il est caractérisé par la modélisation des exigences de fabrication des primitives du produit dans le cadre de la description de la caractéristique. En passant, ils ont utilisé une approche système multi-agent pour modéliser les systèmes de fabrication, et ont combiné le mécanisme de collaboration basé sur l'agent avec le mécanisme de recherche basé sur la contrainte.

[Case-Based Reasoning \(CBR\)](#) [Aamodt et Plaza, 1994] est une technique d'[Intelligence Artificielle \(IA\)](#) qui combine la résolution de problèmes et l'apprentissage continu dans des systèmes avancés d'aide à la décision. De même, [Abdoos et al. \[2013\]](#) ont présenté une méthode basée sur un système multi-agent pour contrôler les signaux de trafic dans un grand réseau. Cette méthode est basée sur le Q-learning holonique pour apprendre le timing des signaux. De même, la [CBR](#) recueille et exploite les connaissances expérientielles intégrées dans des situations précédemment rencontrées et résolues, appelées cas. Ainsi, en utilisant la [CBR](#), les difficultés d'acquisition des connaissances et de représentation des connaissances sont souvent atténuées. Trouver ces exigences est utile pour concevoir de nouveaux produits qui peuvent partager certaines de ces circonstances spécifiques avec des produits conçus précédemment. Dans la communauté du design, la résolution de nouveaux problèmes de conception en identifiant des points communs avec des problèmes de conception résolus précédemment est connue sous le nom de [CBR](#). [CBR](#) se compose de quatre étapes : récupération d'un ou plusieurs cas pertinents d'une base de connaissances, adaptation des cas récupérés au nouveau problème, évaluation de la nouvelle solution (par exemple, simulation) et enrichissement de la base de connaissances avec le nouvelle solution de design.

[Chami et Bruel \[2015\]](#) ont présenté une approche de recherche (figure 2.8) basée sur les modèles pour une évaluation du design conceptuel intégrée de systèmes mécatroniques en utilisant [SysML](#) comme langage commun entre les ingénieurs systèmes et disciplinaires et

il était capable de représenter les interrelations interdisciplinaires qui compliquent habituellement le processus de conception. Cette approche qui s'appelle SysDICE est basée sur trois étapes qui sont effectuées de manière itérative et évolutive jusqu'à ce que l'ingénieur système arrive à la solution optimale requise.

- La première étape consiste à la génération du modèle de système en décrivant six types d'activités de modélisation (évaluation, exigences, fonctionnel, structure, comportement et contraintes). L'objectif est de présenter les exigences du système, les fonctions du système et la solution du design conceptuel du système en utilisant SysML.
- La deuxième étape est la transformation du modèle de système en utilisant une formulation mathématique du modèle de système pour assurer le transfert vers une version exécutable.
- La troisième étape est l'évaluation du modèle de système qui implique l'activité d'évaluation en faisant la capture et l'identification des critères d'évaluation de la conception (en stéréotypant les exigences respectives en tant qu'objectifs d'évaluation) et finit par les fournir au modèle transféré pour appliquer les algorithmes mathématiques.

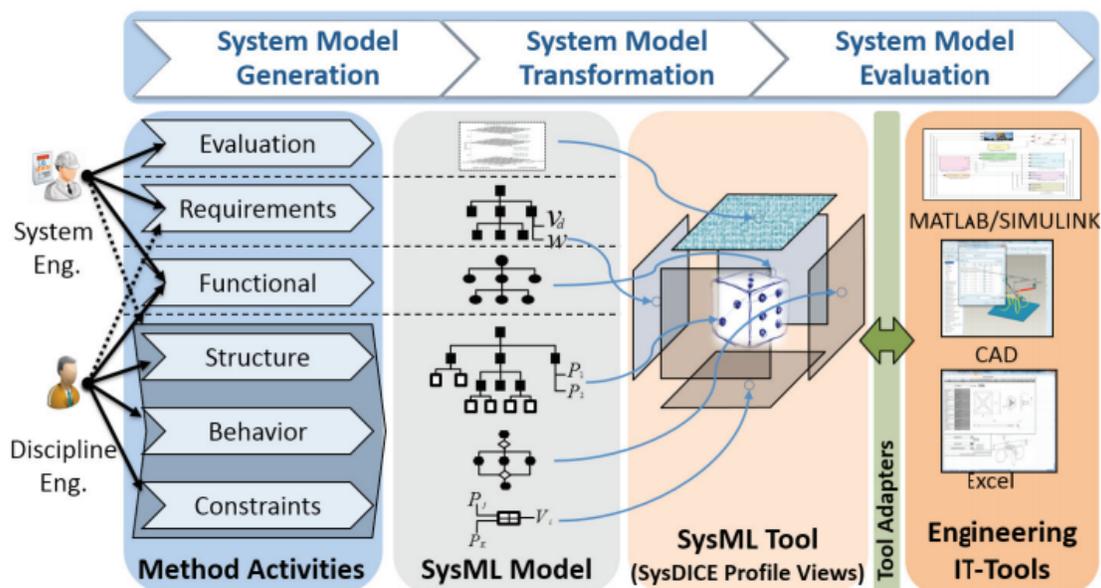


FIGURE 2.8 – Cadre global de SysDICE [Chami et Bruel, 2015]

## 2.4.2 Synthèse et motivation

Les systèmes manufacturiers reconfigurables doivent satisfaire différentes exigences surtout celles du client qui exige toujours des produits de qualité et à bon prix. Cette demande induit une compétitivité entre les industriels qui doivent être toujours compétitifs. En même temps, les chercheurs et les scientifiques tentent de trouver des solutions à différents problèmes telles la réduction des délais grâce à l'intégration de nouvelles technologies, méthodologies, normes et approches. Ces dernières contribuent souvent à différencier les industriels

en termes d'efficacité et d'efficience. Elles leur permettent d'adapter leurs systèmes de production à leurs processus de production. Dans l'industrie, les parties prenantes demandent d'une manière prédictive, proactive ou bien réactive une modification soit sur le système manufacturé dans le but de faire adapter ou bien évoluer l'ensemble des fonctionnalités du système, ou de diminuer le coût de développement du système durant son cycle de vie. Les concepteurs utilisent directement, sans une méthodologie particulière, le cahier des charges pour élaborer une analyse et une solution qui satisfait les exigences demandées par le client. Fréquemment, il n'avait pas au préalable une définition précise de ce qu'il doit faire dans chaque partie du cycle de développement d'un système manufacturier. Cette situation s'aggrave par la suite, car il faudra passer du temps inutile pour assurer que ce soit la maintenance, l'évolution, l'adaptation, ou tout simplement la reconfiguration du système, qui n'est pas viable. Tout développement nécessite de prendre une multitude de décisions. Les méthodologies servent à passer du problème à la solution. La question de recherche de notre thèse est la suivante :

*Comment modéliser un système de fabrication (manufacturier) reconfigurable dans le but de la simulation ?*

## 2.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons analysé les différents travaux effectués dans le domaine abordé par notre problématique. L'objectif était de comprendre les différentes approches et démarches existantes ainsi que les caractéristiques dont il faut tenir compte dans la conception des SMRs. Nous avons vu que la plus part des travaux assurent la simulation sans tenir compte de la phase de modélisation et sans avoir une continuité et une cohérence de développement des modèles. Alors, nous allons intégrer la reconfigurabilité dans les modèles orientés objets. Puis, nous utiliserons les modèles SysML développés pour effectuer une simulation basée sur les systèmes multi-agents en gardant une continuité et une cohérence entre les différents modèles développés.

# Chapitre 3 : Proposition d'une approche basée sur l'ingénierie système pour la modélisation et la simulation des systèmes manufacturiers reconfigurables

## Chapitre 3

# Proposition d'une approche basée sur l'ingénierie système pour la modélisation et la simulation des systèmes manufacturiers reconfigurables

*"Faire tout aussi simplement que possible, mais pas plus simplement."*

---

Albert Einstein

## 3.1 Introduction

Les travaux exposés dans ce chapitre se sont appuyés sur les besoins des entreprises industrielles de développer une approche mécatronique pour la conception intégrée d'un **SMR** dans laquelle le concepteur trouve une variété d'outils (modèles, méthodes, solution) pour mener à bien son travail. L'entreprise exige à son tour au concepteur de satisfaire le besoin du client, de respecter des délais et des coûts, et de satisfaire des critères de qualité.

Ce chapitre a pour objectif d'introduire le cadre méthodologique proposé sur lequel notre approche est articulée, en se basant sur des normes et concepts dédiés au développement et l'organisation des modèles. Afin de mieux intégrer la reconfigurabilité dans le processus de conception d'un système manufacturier, les caractéristiques clés de la reconfigurabilité et le processus de reconfiguration doivent être cernés à l'origine de la phase de modélisation. Selon **Le Moigne [1994]**, tout système manufacturier (figure 3.1) vu de manière globale est formé d'un système opérant/physique et d'un système de pilotage dont chacun à sa propre structure et comportement.

D'une part, le système opérant/physique regroupe l'ensemble des processus physiques de production mis en œuvre pour transformer les matières premières, des composants, ou des informations en produits finis ou services. Il est généralement modélisé selon la vision fonctionnelle par une architecture fonctionnelle, et, selon une vision organique, par une architecture physique. D'autre part, afin de piloter les fonctions et organes, le système de pilotage déclenche et régule leurs activités. Il est composé par un système de décision et un système d'information. Le système de décision modifie par ses décisions l'évolution du système en fonction du comportement de ce dernier, de l'état de l'environnement et des objectifs qu'il s'est fixés. Le système d'information regroupe l'ensemble des informations échangées ou stockées dans le système de gestion de production pour assurer l'adaptation du système avec son environnement. Les interfaces entre systèmes opérant et systèmes de pilotage sont composées par des capteurs et actionneurs.

Nous présenterons dans un premier temps le processus de conception global d'un système manufacturier. Puis, nous présenterons la démarche de l'approche proposée pour la conception d'un **SMR**, en introduisant les différentes hypothèses prises en compte. Ensuite, nous allons définir les différentes contraintes, entrées et sorties pour chaque étape de la démarche de conception. Puis, nous ferons une synthèse sur le niveau d'abstraction de chaque étape.

## 3.2 Processus de conception global

Nous distinguons quatre phases dans le processus de conception globale d'un système manufacturier (figure 3.2) :

- **Une phase d'initialisation** : elle permet de définir le cahier des charges concernant les exigences que le système doit satisfaire ainsi que les contraintes existantes de conception. Elle consiste à collecter, analyser et définir les objectifs. Une étape importante de cette phase est de spécifier l'ensemble des informations nécessaires pour alimenter le processus de conception ;
- **Une phase de conception préliminaire** : elle décrit essentiellement la vue fonctionnelle et physique du système opérant et pilotage en parallèle. Cependant, il existe un

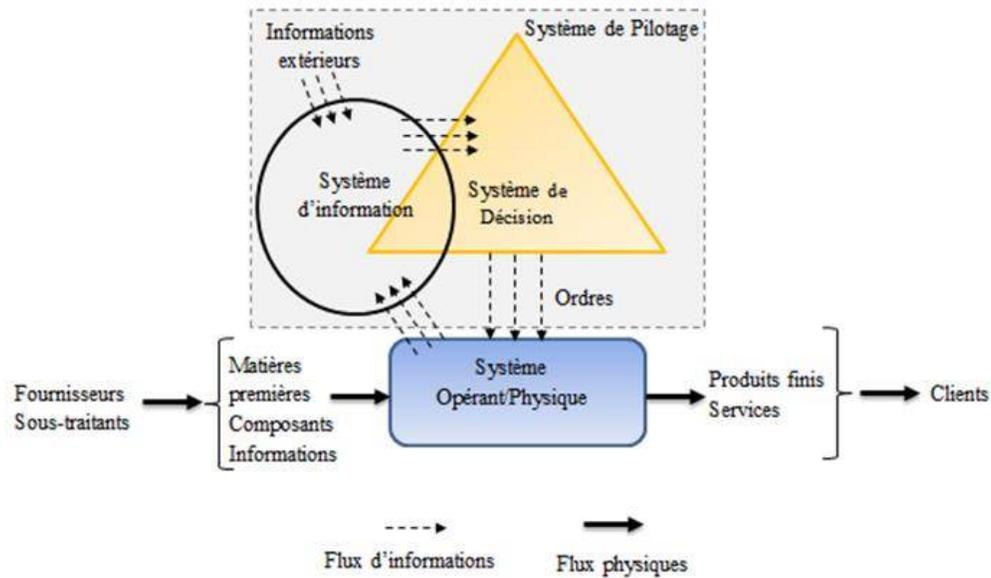


FIGURE 3.1 – Les trois sous-systèmes représentés par le cadre GRAI [Le Moigne, 1994]

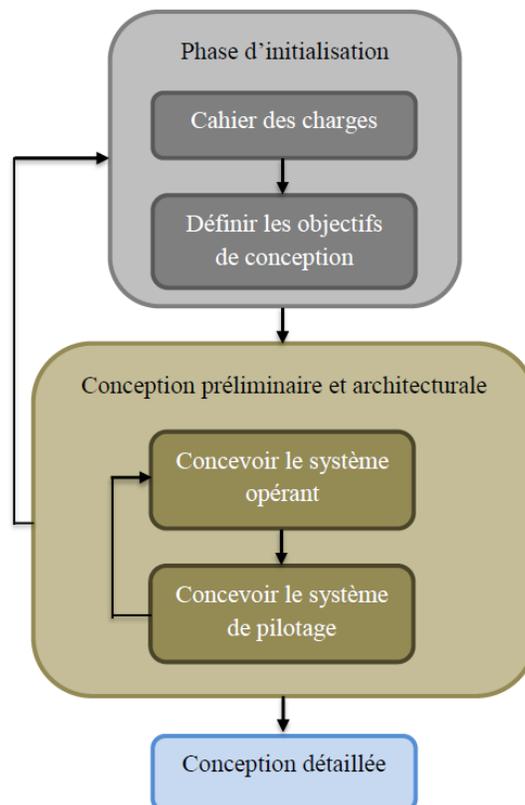


FIGURE 3.2 – Processus de conception d'un système manufacturier

décalage entre les deux niveaux de conceptions dû au fait qu'il faut savoir ce que l'on pilote (système opérant/physique) avant de spécifier comment on le pilote (système de

pilotage). Alors, à partir du cahier des charges, cette phase génère plusieurs concepts du système opérant en répondant aux exigences définies. Sur la base d'une évaluation de ces concepts vis-à-vis des objectifs du cahier des charges, un concept de pilotage est choisi pour être développé par la suite ;

- **Une phase de conception architecturale** : à partir du concept de solution retenue à la phase précédente, les concepteurs définissent et spécifient la configuration globale physique et de pilotage du système manufacturier. Enfin, à partir de la solution finale retenue, les performances attendues des concepts proposés sont évaluées ;
- **Une phase de conception détaillée** : L'ensemble des plans et représentations des composants détaillés du système manufacturier sont générés grâce à des simulations et des calculs avancés. Cette phase ne sera pas traitée dans cette thèse.

## 3.3 Cadre méthodologique proposé pour la conception du SMR

### 3.3.1 Introduction

Nous définissons dans cette étape trois sous-étapes. La première est la modélisation conceptuelle, la seconde, la modélisation opérationnelle et la troisième la simulation orientée agents afin d'évaluer les indicateurs de performance issus de l'architecture de reconfiguration générée. La modélisation et/ou la simulation du SMR est une tâche qui nécessite la mise en œuvre de connaissances et de compétences spécifiques. Pour aider le concepteur à la conception de ces modèles, une démarche méthodologique reposant sur l'élaboration de divers modèles est nécessaire afin d'aboutir à la simulation informatique, évaluant les indicateurs de performances. Dans la revue de littératures, nous avons présenté différents travaux de recherche consacrés à la définition de méthodologies guidant les concepteurs dans le développement de modèles exécutables, permettant d'évaluer certaines métriques de performance de production. Nous avons aussi présenté un ensemble de travaux méthodologique centrés sur la reconfigurabilité des SMRs pour s'adapter aux aléas internes et/ou externes. Cependant, ces travaux nous semblent présenter un certain nombre de faiblesses qui sont liées d'une part à la réactivité des SMRs aux aléas internes et/ou externes. D'autre part, il existe des faiblesses d'intégration et d'organisation des modèles conceptuelles afin de passer à l'implémentation informatique orientée agents. D'une autre façon, un problème de passage de la modélisation à la simulation persiste toujours dans les SMRs. La première faiblesse est liée au fait que ces travaux méthodologiques ne semblent pas suffisamment prendre en compte les clés caractéristiques de la reconfigurabilité et les critères de performances dès la phase de conception d'un SMR. Une seconde faiblesse porte sur la transformation des modèles conceptuelles ou organisationnelles vers des modèles exécutables. Le fait que ce passage ne soit pas bien défini dès le premier niveau de modélisation, il a des conséquences importantes au niveau de la simulation du système de production manufacturier par le fait qu'on peut avoir toujours une complexité pour l'implémentation et l'évaluation de la simulation clairement. Enfin, au niveau de la simulation, la principale faiblesse nous semble résider dans le fait que les architectures de support à la simulation proposées, peuvent paraître assez rigides. En plus, ils ne permettent pas suffisamment l'intégration et la réutilisation de modèles de simulation.

Dans ce chapitre, nous proposons un nouveau cadre méthodologique de modélisation et simulation d'un **SMR**, tentant de répondre à ces faiblesses. Notamment en prenant en compte explicitement les caractéristiques clés de la reconfigurabilité, ainsi les indicateurs de performance pour évaluer la réactivité du **SMR** aux aléas interne et/ou externes. Dans les chapitres suivants, nous proposons de détailler les différentes étapes selon ce cadre méthodologique proposé. Dans la section suivante, nous précisons les objectifs, les fondements ou principes, du cadre méthodologique que nous proposons pour la conception du **SMR**. Ensuite, nous présenterons de façon générale ce cadre méthodologique, notamment les différentes étapes qui la structure : modélisation conceptuelle et opérationnelle, et la simulation multi-agent.

### 3.3.2 Objectifs et fondements du cadre méthodologique proposé

La conception du **SMR** est de plus en plus utilisée pour étudier la dynamique et la réactivité du système de production aux aléas internes et externes. Comme nous l'avons vu dans le chapitre précédant, peu de travaux de recherche proposent un cadre général relatif, à la fois, la modélisation et la simulation. L'objectif général du cadre méthodologique proposé dans cette recherche est de palier les faiblesses évoquées précédemment, plus précisément il s'agit plus de permettre au concepteur de modéliser et simuler le **SMR** prenant mieux en compte les caractéristiques clés de reconfigurabilité pour réagir aux aléas internes et/ou externes, ainsi évaluer les performances de production générées. Alors, nous avons la volonté de garantir au manufacturier la réduction des coûts et des délais de conception, l'accroissement de la qualité, et la gestion de la complexification croissante des systèmes manufacturiers. Pour atteindre ces objectifs, le cadre méthodologique proposé est fondé sur trois grandes approches qui sont déjà définies dans le premier chapitre : (i) *l'approche de l'ingénierie système*, (ii) *le concept des systèmes manufacturiers holoniques*, et (iii) *le concept des systèmes multi-agents*.

### 3.3.3 Présentation générale du cadre méthodologique proposé

La figure 3.3 représente le processus de conception global qu'on va le suivre dans notre cadre méthodologique proposé :

- le processus de définition du système :
  - Le processus de définition des exigences :
  - Processus de définition des besoins des parties prenantes
  - Processus d'analyse des exigences
- Le processus de conception :
  - Processus de conception logique (ou fonctionnelle)
  - Processus de conception physique
- Le processus d'IVV :
  - Processus d'intégration
  - Processus de vérification
  - Processus de validation

Le processus de conception doit préciser ce qui doit être fait et à quel moment, quelles techniques et outils sont nécessaires à chaque étape, quelles informations nécessitent d'être collectées et quels seront les résultats et le rendu de chaque étape. Le processus de conception est souvent représenté comme un processus linéaire, bien qu'il soit localement itératif. Le

cadre de conception proposé par Wu [2012] permet de mettre en lumière deux approches de conception d'un système de production :

- **La première approche**, qui peut être qualifiée de conception originale du système. Elle débute par la définition d'un ensemble d'objectifs pour créer un système de production manufacturier, qui satisfasse à ces objectifs ;
- **La deuxième approche** suppose l'existence d'un système antérieur et consiste à apporter des modifications au système existant afin de satisfaire aux nouvelles exigences. Cette approche peut s'apparenter à une démarche de re-conception du système.

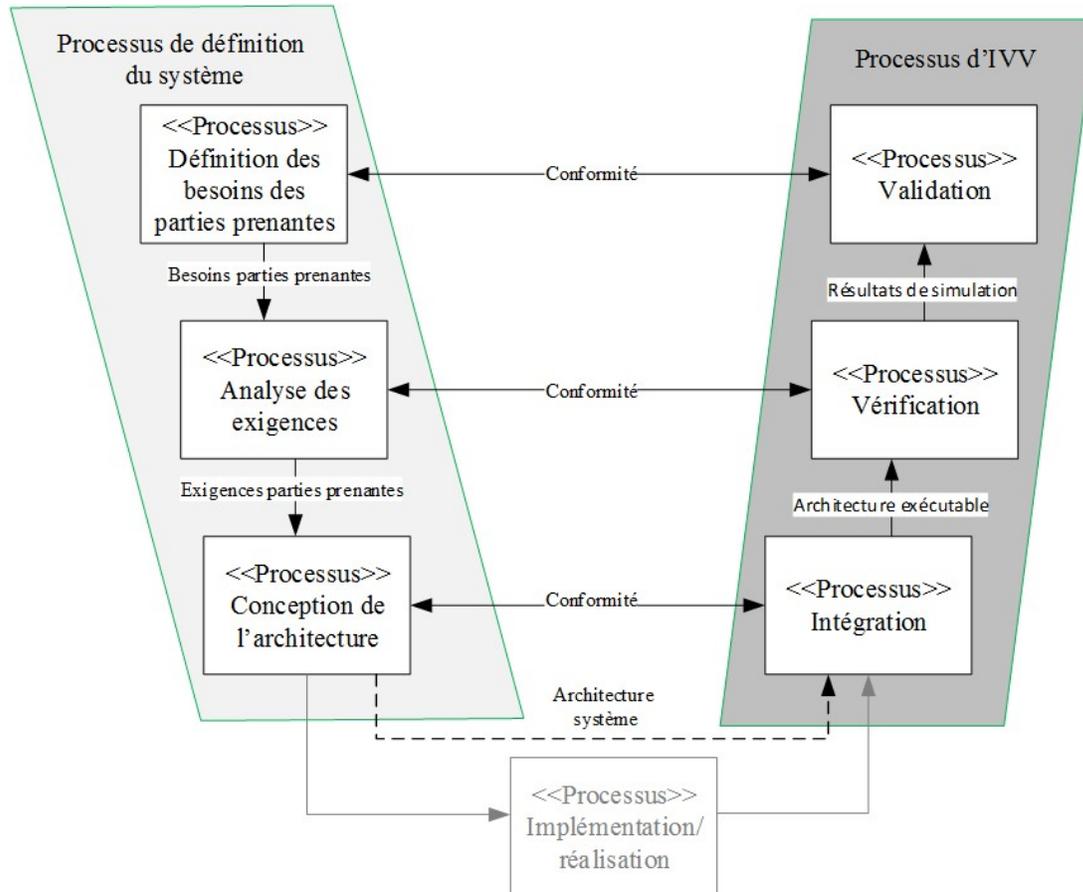


FIGURE 3.3 – Les processus techniques de développement ajustés selon le cycle en V et en considérant la norme ISO 15288

Dans ce sens, nous sommes intéressé par la première approche parce qu'elle est plus générale que la deuxième ainsi elle peut en servir.

Dans ce contexte, face à la complexité de la modélisation et de la simulation des SMRs, il s'agit d'assister les concepteurs (modélisateurs et informaticiens) en leur proposant une démarche composée d'étapes, lors desquelles seront développés des modèles, selon des objectifs de modélisation spécifiques, ceci de la modélisation du SMR à sa simulation informatique. La figure 3.4 représente le cadre méthodologique pour la conception d'un système manufacturier reconfigurable. Dans cette section, nous présenterons de façon générale notre

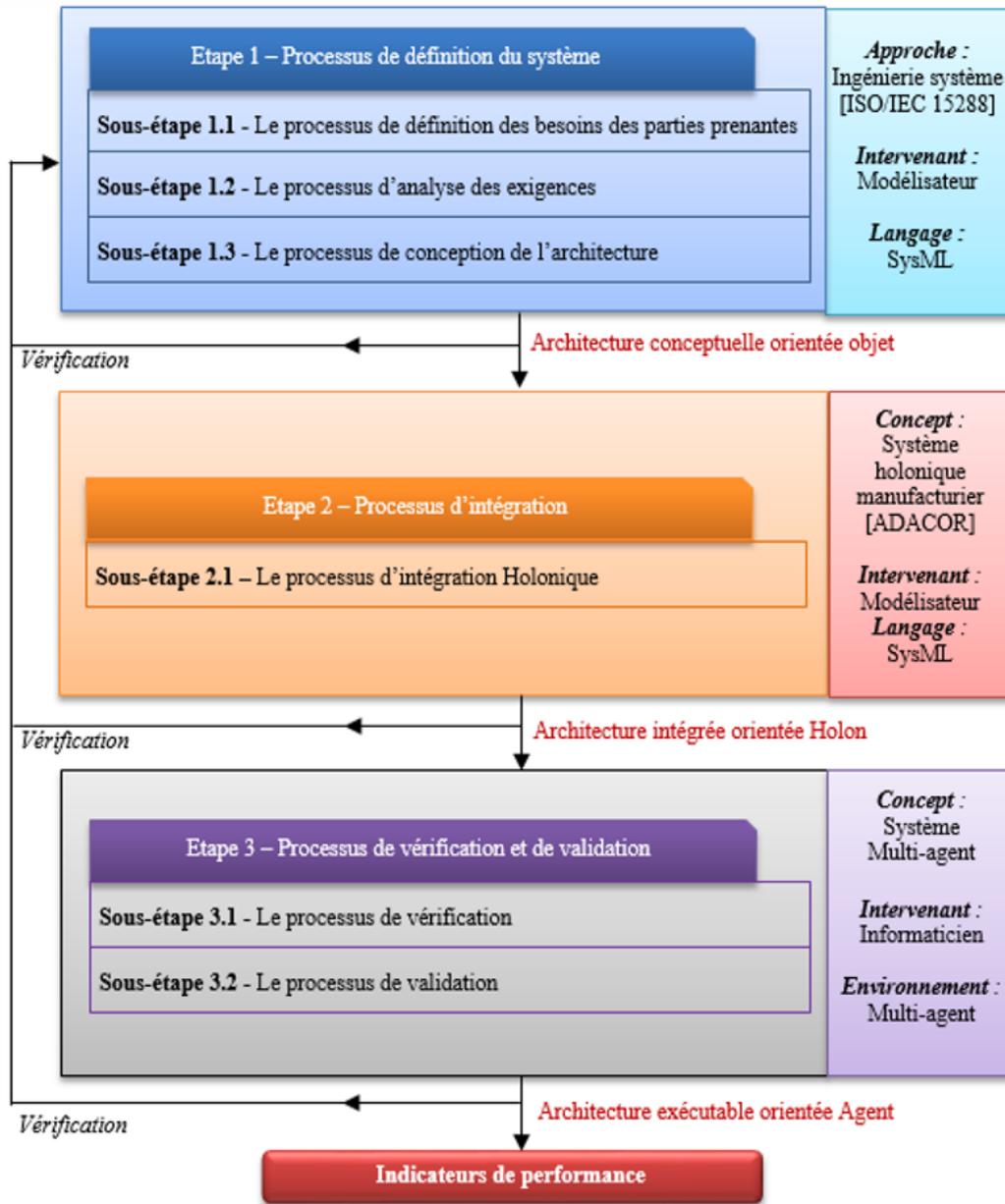


FIGURE 3.4 – Cadre méthodologique pour la conception d'un système manufacturier reconconfigurable

cadre méthodologique, en définissant les hypothèses, les contraintes, les entrées et les sorties de notre démarche. Ensuite, nous développons les niveaux d'abstraction sur lesquels sont fondées les étapes du cadre méthodologique. La démarche de conception globale repose sur une approche incrémentale durant laquelle différents modèles sont élaborés. Dans la figure 3.4, nous précisons les champs d'intervention des experts, les différents processus et les transitions entre les étapes, ceci à travers du cadre méthodologique proposé. Nous définissons dans les processus de modélisation et de simulation du SMR trois principales étapes : l'étape de modélisation conceptuelle, l'étape de modélisation opérationnelle, et la simulation

Tableau 3.1 – Types du système de production choisi

Type : Production dérivée de :	Type 1	Type 2	Type 3
La demande	Demande indépendante	Demande dépendante	
Les quantités fabriquées	Production unitaire	Production en série	
La structure du produit	Production convergente	Production divergente	Production rectiligne
Les exigences de la clientèle	Production sur stock	Production juste à temps	Production sur commande
Le processus de production	Production continue	Production discontinue	Production de processus
Les ateliers de production	Atelier à postes de charge	Atelier à flux continu	Ateliers flexible
	Choisi	Non choisi	

multi-agents. L'étape de modélisation conceptuelle conduit à l'élaboration d'une architecture conceptuelle. Concernant l'étape de modélisation opérationnelle, elle a comme sortie une architecture opérationnelle. Enfin, l'étape de simulation multi-agents est constituée du système multi-agents et du cadre d'évaluation.

### 3.3.3.1 Hypothèses du Cadre méthodologique proposé

Nous présentons les différentes hypothèses prises en compte dans le cadre méthodologique proposé qui sont liées aux systèmes de production manufacturier en générale ainsi qu'aux systèmes opérant et de pilotage.

#### **Hypothèses liées au système de production :**

Dans le domaine industriel, plusieurs types de production peuvent exister selon la stratégie générale de l'entreprise qui est fortement liée à la demande des clients et aux capacités de production programmée. Nous présenterons dans le tableau 3.1 les types de production en fonction de plusieurs caractéristiques dont notre démarche méthodologique proposée pourra les servir.

#### **Hypothèses liées au système opérant :**

Les hypothèses liées au système opérant les plus importantes sont les suivantes :

- Nous supposons que le système opérant était déjà conçu pour être reconfigurable ;
- Les analyses fonctionnelles et logiques du système opérant sont connues d'avance et fournis par le concepteur.

#### **Hypothèses liées au système de pilotage :**

Le niveau de décision du système de pilotage nous intéresse beaucoup et il doit être précisé dès le début parce que chaque niveau correspond à un objectif bien déterminé. D'après la figure 3.5, plusieurs niveaux de décision sont représentés dont chacun correspond à un sys-

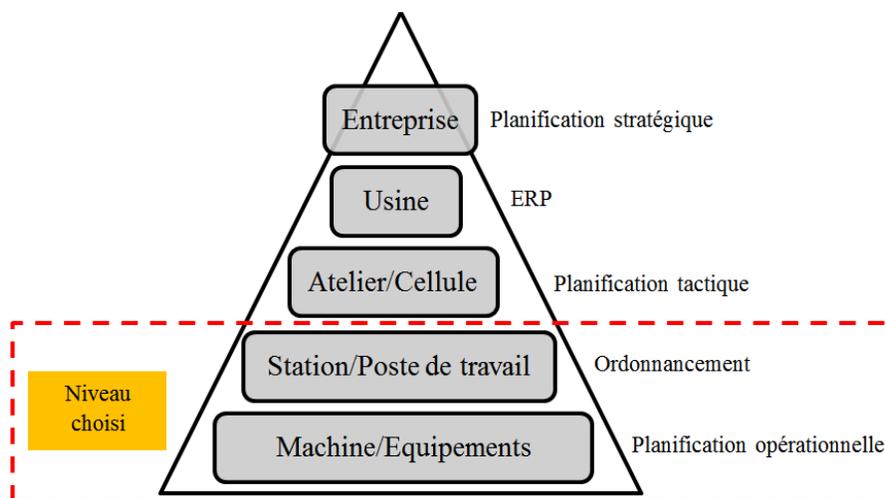


FIGURE 3.5 – Le système de pilotage de l’entreprise et ses 5 niveaux de décision [Vernadat, 1999]

tème de production précis. Tant que nous allons étudier les systèmes manufacturiers reconfigurables, nous choisissons alors les deux niveaux de décision qui correspondent à l’ordonnancement et la planification opérationnelle. Nous allons proposer la démarche de conception qui permet d’amortir les perturbations venant des niveaux "Station/Poste de travail" et "Machine/Équipement" pour essayer de tenir les objectifs imposés par le niveau supérieur.

### 3.3.3.2 Contraintes du cadre méthodologique



FIGURE 3.6 – Concevoir un système manufacturier reconfigurable

Les systèmes de production doivent fonctionner dans un environnement en perpétuelle évolution. Cette situation nécessite une adaptation aux contraintes qui sont généralement des fluctuations/aléas internes et externes. Grâce à la réactivité du système de pilotage, les systèmes de production permettent de donner rapidement une solution pertinente. La prise en considération de ces contraintes que nous appelons ici aléas internes et externes (figure 3.6), nous semblent obligatoires pas seulement pendant la conception du système opérant, mais aussi pendant la conception du système de pilotage.

Afin de s’adapter à un marché turbulent, les entreprises industrielles doivent comprendre et cerner les principaux facteurs qui déclenchent des changements dans leur environnement et nécessitent une adaptation de leurs systèmes de production manufacturiers.

**Les aléas internes :**

Les perturbations internes au système de production manufacturier rassemblent tous les problèmes sur les processus de production.

- Immobilisation des équipements pour des interventions de maintenance ;
- Amélioration de la qualité de produit, des processus et des ressources ;
- Perturbations internes considérées peuvent provenir de l'organisation ou bien des ressources (humaines, logicielles) ;
- Aléas de fonctionnement : pannes, défauts d'alimentation, outillage non disponible, absence de matière première, le manque de personnel. . . ;
- La non qualité du produit est aussi une source d'aléa qu'il faudra la corriger ;
- La non cohérence de données entre les niveaux de décision pouvant générer des perturbations. Si le suivi n'est pas effectué en temps réel alors les perturbations ne seront pas correctement rapportées.
- Incohérence des données entre les différents niveaux de production ;
- Exigences exprimées initialement par l'industriel pour la conception du système de production manufacturier concernent :
  - La réduction des coûts ;
  - Le respect des délais ;
  - Le maintien de la qualité.

#### **Les aléas externes :**

Les perturbations externes au système de production manufacturier considérées dans cette thèse sont généralement les fluctuations au niveau de la demande (en quantité et en diversité), essayant de satisfaire le maximum possible les exigences du client suivantes :

- Un prix faible ;
- Un délai de livraison court ;
- Un respect des spécifications demandées ;
- Un produit personnalisé ou bien la volatilité des exigences [Russell, 2004] : ces facteurs sont le changement d'une exigence, changement de sa priorité, changement de technologie, le conflit des exigences, changement d'environnement ou la complexité du système ;
- Contrôler l'avancement de sa commande n'importe quand ;
- Modifier certaines caractéristiques en cours de sa commande.

Nous constatons alors qu'il y a de fortes contraintes possibles et fortement probable sur les systèmes de production manufacturiers, de types internes et externes. C'est notre mission pour faire face à ces contraintes en appliquant le concept de la reconfigurabilité dès la phase de conception, puis en évaluant les performances du système de production manufacturier au niveau de chaque configuration/reconfiguration.

#### **3.3.3.3 Entrées du cadre méthodologique**

Le cadre méthodologique proposé contient des entrées qui alimentent la démarche de conception du système manufacturier reconfigurable. Les entrées sont principalement sous forme de spécifications (fonctionnelles et physiques) du système opérant et les caractéristiques clés de reconfiguration qui seront le mécanisme du processus de re/configuration.

##### **Spécification du système opérant :**

Une conception initiale du système opérant est déjà faite qui est adaptée à la reconfi-

gurabilité. Par exemple pour la vue physique, on trouve le système de fabrication, système d'assemblage, système de transfert, système de stockage, etc, en identifiant les interactions possibles. Concernant les exigences fonctionnelles du système opérant, c'est un ensemble de fonctions qui sont allouées à chaque partie physique correspondantes.

#### **Les caractéristiques de la reconfigurabilité :**

Les caractéristiques clés de la reconfiguration sont des références à respecter afin d'assurer le processus de reconfiguration :

- **Personnalisation** : La flexibilité d'un système ou d'une machine limitée à une famille de produits.
- **Convertibilité** : La capacité de transformer facilement la fonctionnalité du système ou de la machine pour répondre aux nouvelles exigences de production.
- **Évolutivité** : La possibilité de modifier facilement la capacité de production en ajoutant ou éliminant des ressources de production.
- **Modularité** : La classification des fonctions opérationnelles en unités qui peuvent être manipulées et échangées entre les systèmes de production pour un arrangement optimal.
- **Intégrabilité** : La capacité à intégrer rapidement des modules et précisément par un ensemble d'interfaces mécaniques, électriques, et informationnelles.
- **Diagnosticabilité** : La capacité de diagnostiquer et corriger rapidement les défauts opérationnels.

#### **3.3.3.4 Sorties du cadre méthodologique**

Les indicateurs de performance sont les métriques pour évaluer les architectures exécutables en suivant la démarche de conception proposée. Principalement, l'amélioration continue de la productivité sera notre indicateur à partir duquel on va s'appuyer sur l'efficacité<sup>1</sup>, la pertinence<sup>2</sup>, l'efficacité<sup>3</sup> et l'effectivité<sup>4</sup> des systèmes manufacturiers reconfigurables. L'évaluation des indicateurs de performances d'une architecture exécutable est basée essentiellement sur la productivité des systèmes manufacturiers reconfigurables et sur d'autres indicateurs comme la capacité de production.

#### **3.3.3.5 Niveau d'abstraction considéré**

Nous proposons une démarche de conception incrémentale selon laquelle différents modèles sont élaborés à des niveaux d'abstraction différents. Dans un premier temps, nous avons recours à l'approche de l'ingénierie système pour commencer la conception du SMR. Dès la phase d'abstraction, nous prenons en considération les entrées et les contraintes citées ci-dessus. La transformation du modèle conceptuel vers un modèle opérationnel sera effectuée en respectant des règles de transformation (chapitre 4). L'organisation des modèles sera faite

---

1. Efficacité : caractérise l'écart entre les objectifs à atteindre et les résultats obtenus [Bousbia, 2006]  
2. Pertinence : concerne l'adéquation entre les moyens mis en œuvre et les objectifs [Bousbia, 2006]  
3. Efficacité : mesure le rendement du système par comparaison entre les moyens mis en œuvre et les résultats obtenus [Bousbia, 2006]  
4. Effectivité : c'est l'adéquation des objectifs, des moyens et des résultats au regard de la finalité du système [Bousbia, 2006]

en utilisant un concept *Holonique* que nous détaillerons dans le cinquième chapitre 5. Enfin l'architecture opérationnelle holonique sera traduite vers des modèles multi-agents afin de faire la vérification et la simulation. Il y'a deux intervenants majeurs, le modélisateur et l'informaticien qui travaillent conjointement dans le but de concevoir et de manipuler des modèles aux objectifs différents. Le modélisateur se réfère aux spécifications système pour concevoir les SMRs, et s'appuie pour cela sur l'approche de l'ingénierie système. Puis il fait la transformation de ces modèles vers des modèles opérationnelle afin d'intégrer la partie opérante et la partie de pilotage, en s'appuyant sur des méta-modèles de référence. Ensuite, L'informaticien traduit les modèle opérationnels orientés Holon vers des modèles orientés agents pour faire l'implémentation au sein d'un environnement de simulation. De plus l'informaticien peut concevoir un environnement d'expérimentation pour l'exploitation des simulations et des résultats associés. La démarche méthodologique, alors, peut être structurée sur trois grandes étapes (figure 3.7) qu'on va les détailler dans les prochains chapitres (4 et 5).

**Étape 1** Le modélisateur décrit la structure reconfigurable du SMR ainsi que son comportement reconfigurable. La modélisation conceptuelle repose sur plusieurs modèles précisant l'architecture du SMR.

**Étape 2** Le modélisateur traduit les modèles conceptuels afin de les rendre opérationnels, en ajoutant des modèles des processus de re/configuration. Il traduit les modèles de conception vers des modèles qui décrivent la dynamique reconfigurable. Chaque ordre, tâche, ressource, qui est identifiée au niveau conceptuelle est spécifiée selon une approche de référence et un méta-modèle holonique afin d'organiser l'architecture du SMR.

**Étape 3** L'informaticien traduit les modèles opérationnels vers des modèles orientés agents afin de faire la mise en oeuvre des modèles opérationnels au sein d'un système informatique. Il s'agit pour l'informaticien de prendre en compte les contraintes techniques ignorées au niveau opérationnel et les rajouter aux attributs de chaque agent. Ainsi, les SMRs orientés agent seront déployés au sein d'un environnement logiciel autorisant son exécution pour la conduite d'expérimentation par simulations.

L'enchaînement et les transitions de ces étapes seront traités dans les prochains chapitres (4 et 5).

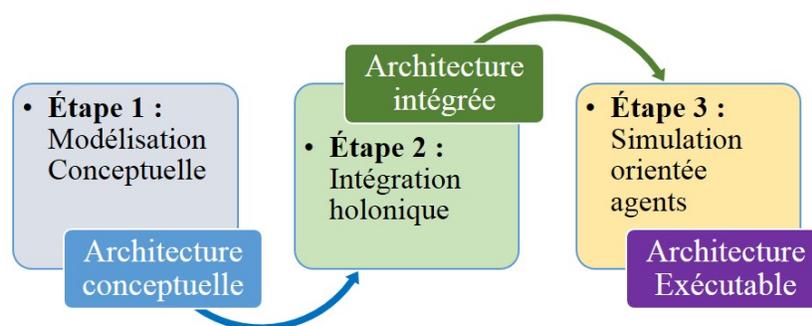


FIGURE 3.7 – Les 3 grandes étapes du cadre méthodologique de conception proposé

### 3.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le cadre méthodologique proposé qui est fondé sur trois grandes approches : (i) *l'approche de l'ingénierie système*, (ii) *le concept des systèmes manufacturiers holoniques*, et (iii) *le concept des systèmes multi-agents*. Aussi, nous avons défini les hypothèses prises en considération pendant le développement de la démarche de conception. Les contraintes, les entrées et les sorties de ce cadre méthodologique, ont été présentées dans le but d'avoir une idée claire et précise.

Dans les chapitres suivants (4 et 5), nous détaillerons les trois grandes étapes : la modélisation conceptuelle, opérationnelle et la simulation orientée agents. Précisément, il s'agit de permettre au concepteur de modéliser et simuler le **SMR** prenant mieux en compte les caractéristiques clés de reconfigurabilité pour réagir aux aléas internes et/ou externes, ainsi évaluer les performances de production générées. Ceci permet de garantir au manufacturier la réduction des coûts et des délais de conception, l'accroissement de la qualité, et la gestion de la complexification croissante des systèmes manufacturiers.

# Chapitre 4 : Processus de modélisation des systèmes manufacturiers reconfigurables

# Chapitre 4

## Processus de modélisation des systèmes manufacturiers reconfigurables

*“La simplicité est la sophistication suprême .”*

---

Léonard De Vinci

## 4.1 Introduction

Généralement, la notion de conception d'un système (ou d'un produit) concerne la création d'un artefact (modèle, architecture, cas de test...). Dans le domaine de l'ingénierie, la « conception » signifie l'élaboration de spécifications explicites de la structure, essentiellement : physique et logique, d'un produit ou d'un système qui satisfait les besoins désirés par le client ou l'industriel en respectant les contraintes et les exigences.

Ce chapitre a pour objectif de présenter la première étape de la démarche proposée (chapitre 3) pour la conception d'un système manufacturier reconfigurable qui est la modélisation conceptuelle. L'intervenant principale dans cette étape est le modélisateur qui est en générale censé réaliser la conception du système. Nous cherchons donc à définir le mécanisme de création des artefacts pour aider le modélisateur à la conception des systèmes manufacturiers reconfigurables. D'après [March et Smith \[1995\]](#), la création d'un artefact complet nécessite cinq niveaux permettant sa compréhension complète. Ces cinq niveaux sont : un construit (concept), un modèle (représentation de la réalité), une méthode (ensemble des étapes), une instantiation (réalisation effective d'un artefact) et des propositions théoriques de conception généralisables à une classe de problème (templates générique) [[Aken et al., 2012](#)].

Nous proposons de mieux définir le travail du modélisateur sur la conception des systèmes manufacturiers reconfigurables et de proposer les capacités pouvant l'aider à concevoir les systèmes manufacturiers en intégrant la reconfigurabilité pour faire face aux aléas internes et externes. Cette intégration est appréhendée sous forme de méta-modèles basés sur le langage de modélisation [SysML](#). Nous présenterons l'architecture conceptuelle d'un système manufacturier reconfigurable à travers un processus de modélisation conceptuelle répartie sur trois sous-étapes :

- Processus de définition des besoins des parties prenantes ;
- Processus d'analyse des exigences ; et
- Processus de conception de l'architecture.

Il est important de comprendre que nous ne sommes pas seulement dans la création d'une solution pour concevoir un [SMR](#) mais aussi dans l'aide à la création d'une solution pour que le système manufacturier soit reconfigurable.

Nous allons dans un premier temps présenter les problématiques de la modélisation conceptuelle d'un système manufacturier. Puis, nous établirons un méta-modèle de la notion de la reconfigurabilité en utilisant un ensemble de stéréotypes qui va étendre des éléments du langage [SysML](#). Ensuite, nous allons élaborer l'architecture conceptuelle physique et logique du système de pilotage.

## 4.2 Problématiques de la modélisation conceptuelle

### 4.2.1 Problématique

Nous allons répondre à l'un des problèmes de conception d'un [SMR](#) :  
**Quel artefacts peuvent être créés pour aider le modélisateur à modéliser conceptuellement un [SMR](#) ?**

Cette question nous mène à répondre aux cinq questions de recherche suivantes :

- Q1 (Concept) : Comment le modélisateur intègre-t-il la notion de la reconfigurabilité dans la conception d'un système manufacturier ? ;
- Q2 (Enjeux) : Pourquoi l'intégration de la reconfigurabilité dès le début de la phase de conception est une phase stratégique, quelles en sont les conditions, et quelles capacités manufacturières sont nécessaires pour intégrer la reconfigurabilité ? ;
- Q3(voie amélioration) : Quels concepts d'organisation sont applicable afin de dépasser les limites de cette phase de conception ? ;
- Q4 (artefact) : Quelle représentation proposée pour permettre au modélisateur de faciliter l'organisation des modèles de conception et passer à l'étape suivante (*la modélisation opérationnelle*) ?

## 4.2.2 Objectifs

Nous allons traiter l'aspect fonctionnel (structure et sous-fonction du système) et l'aspect physique (architecture) d'un **SMR**. Concevoir un système de manufacturier reconfigurable nécessite principalement l'utilisation des artefacts suivants : les modèles du système ou de ses sous-systèmes et les différentes vues de ces modèles.

L'objectif est de préciser les fonctions représentant les besoins en conception du **SMR** et la structure représentant la solution de conception du **SMR**. Les besoins en conception ne peuvent pas être identifiés de manière complète et cohérente au début de la conception ; la conception implique des activités pour identifier, corriger et raffiner les besoins en conception.

Dans les situations réelles de conception, la conception revient à un processus évolutif de transformation des besoins en solutions de conception. Pour concevoir un nouveau système, il est nécessaire de définir les spécifications de la solution correspondant aux nouveaux besoins.

Deux sortes d'activités sont définies dans [Eynard, 1999] :

- les activités de conception utilisées pour générer des solutions candidates. Les travaux sont basés sur cette activité ;
- Les activités de choix servant à sélectionner une solution parmi celles proposées. Cette phase sera parmi les perspectives de notre recherche parce qu'elle est toute seule peut être un sujet de thèse.

En effet, nous allons développer des artefacts conceptuels et architecturaux pour aider le modélisateur à concevoir la conception des **SMRs**. Les artefacts exécutables et comportementaux seront définis dans le chapitre suivant en établissant le couplage entre les artefacts conceptuels/architecturaux et les artefacts exécutables/comportementaux.

Dans la section suivante, nous allons définir les principes de la modélisation conceptuelle dont notre première étape de conception est basée.

## 4.3 Préparation pour la modélisation conceptuelle

Comme l'ont démontré de nombreux chercheurs, le design conceptuel représente plus de 70% des coûts et des performances du produit/système conçu [Zimmer et Zablit, 2001]. La conception commence par la spécification des buts/objectifs du produit/système. Par la suite,

toutes les configurations possibles qui pourraient atteindre ces buts/objectifs devraient être générées.

La conception est la tâche la plus cruciale dans le cycle de développement de produits d'ingénierie. Elle commence avec des descriptions de haut niveau des exigences et procède avec une description de haut niveau d'une solution. Les décisions au stade du design conceptuel ont une influence significative sur des facteurs tels que la performance, la fiabilité de la sécurité et l'impact environnemental d'un produit/système [Hsu et Woon, 1998].

La modélisation conceptuelle est un stade précoce de la conception dans lequel les modélisateurs sélectionnent les concepts qui seront utilisés pour résoudre un problème de conception donné et décident comment interconnecter ces concepts dans une architecture système appropriée. Au début de chaque processus de conception, il existe une grande variété de solutions possibles à un problème de conception donné et une incertitude considérable quant à laquelle de ces solutions sera la mieux adaptée à la spécification donnée. Cela est particulièrement vrai lorsque le modélisateur doit répondre à des exigences d'utilisateur très dynamiques ou insuffisantes.

Dans l'industrie, les systèmes manufacturiers sont de plus en plus complexes et sophistiqués. Alors, la conception d'un système manufacturier complexe que se soit reconfigurable ou non-reconfigurable résulte l'établissement de plusieurs artefacts sous plusieurs aspects différentes qui sera difficile ou même impossible de vérifier la consistance du modèle globale. Pour résoudre ce problème, nous proposons de créer un profil du langage formel SysML qui sera spécialisé pour la conception des systèmes manufacturiers reconfigurables de manière contrôlée, étape par étape.

La modélisation conceptuelle aboutit normalement à une description schématique des liens entre les blocs conceptuels, connue sous le nom d'architecture du système. Le terme Architecture a cependant une signification beaucoup plus large. Dans tous les domaines dans lesquels il est utilisé, il décrit comment un système s'intègre dans son environnement et comment les composants du système interfacent les uns avec les autres [Rzevski, 2003].

Dans la section suivante, nous présenterons en détails le processus de définition du système manufacturier et le profil de conception des SMRs à partir duquel nous allons pouvoir établir une architecture du système manufacturier reconfigurable.

## 4.4 Processus de définition du système

Le processus de définition du système présenté par la figure 4.1 est composé par les deux processus suivants :

- le processus de définition des exigences système :
  - Processus de définition des besoins des parties prenantes.
  - Processus d'analyse des exigences.
- Le processus de conception de l'architecture :
  - Processus de conception logique (ou fonctionnelle).
  - Processus de conception physique.

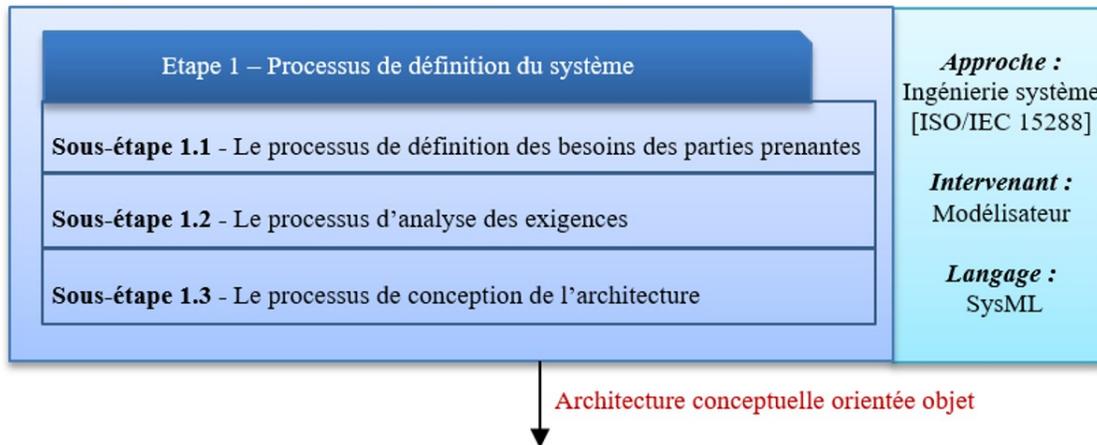


FIGURE 4.1 – Représentation de l'étape de modélisation conceptuelle

#### 4.4.1 Processus de définition des besoins des parties prenantes

Le modélisateur définit les exigences des parties prenantes pour obtenir le système de fabrication capable de fournir les capacités requises par les clients et autres parties prenantes dans un environnement défini. Premièrement, il établit un diagramme de définition de blocs **BDD** et un diagramme de machine d'état **StmD** afin de se préparer aux besoins des parties prenantes et à la définition des besoins en identifiant les parties prenantes qui ont un intérêt dans le système de fabrication tout au long de son cycle de vie. Ensuite, il définit les besoins des parties prenantes à travers un **BDD** tout en définissant le contexte de l'utilisation. La définition des concepts opérationnels et des autres concepts de cycle de vie est l'étape suivante. Le modélisateur définit un ensemble représentatif de scénarios pour identifier toutes les fonctionnalités requises à l'aide du diagramme de cas d'utilisation (**UCD**). Puis, il définit les interactions entre les parties prenantes (intéressées) et le système en utilisant du diagramme de séquence (**SD**). Après cela, il transforme les besoins des parties prenantes en exigences en utilisant le diagramme des exigences (**ReqD**). À la fin de cette sous-phase, une version révisée du diagramme des exigences (**ReqD**) est livrée avec l'établissement de la traçabilité des exigences aux besoins des parties prenantes.

Alors, résumons le processus de définition des besoins des parties prenantes dans les étapes suivantes :

1. Identifier les parties prenantes qui ont intérêts dans le système tout au long de son cycle de vie (**BDD + StmD**).
2. Définir les besoins des parties prenantes et définir le contexte d'utilisation (**BDD**).
3. Définir l'ensemble représentatif des scénarios pour identifier toutes les fonctionnalités requises (**UCD**).
4. Définir les interactions entre les parties prenantes (intéressées) et le système (**SD**).
5. Transformer les besoins des parties prenantes en exigences des parties prenantes (impliquées) (**ReqD**).

6. Faire une version révisée du diagramme des exigences avec l'établissement de la traçabilité des exigences aux besoins des parties prenantes (ReqD + Trace Matrix).

#### 4.4.2 Processus d'analyse des exigences

Le modélisateur transforme les capacités souhaitées des parties prenantes et de la vue orientée fabricant en une vue technique d'une solution qui répond aux besoins opérationnels du fabricant. D'abord, il prépare la définition des besoins du système de fabrication en tenant compte de la sous-phase précédente en développant le diagramme des exigences (ReqD). En outre, il inclut les caractéristiques clés du SMR en tant compte des exigences du système de fabrication. Ensuite, il analyse les exigences du système de fabrication et il fournit une version révisée du diagramme des exigences. Cela inclut également la traçabilité appropriée des exigences des systèmes de fabrication et des principales caractéristiques du SMR par rapport aux autres caractéristiques de la sous-phase précédente. Enfin, il vérifie et valide la compatibilité des exigences des parties prenantes (impliquées) avec les exigences système par un diagramme d'activité (ActD). Et il évalue et compare les différents cas de tests générés.

Nous résumons les étapes pour analyser les exigences dans les étapes suivantes :

1. Définir les exigences système (ReqD).
2. Établir la traçabilité des exigences des parties prenantes (impliquées) aux exigences système (allocation matrix).
3. Vérifier, valider, évaluer et comparer (ActD + test cases).

Alors, le processus de définition des exigences système est composé par les deux sous processus suivants :

- **Processus de définition des besoins des parties prenantes.**
- **Processus d'analyse des exigences.**

Ceci consiste à transformer les exigences des parties prenantes et les capacités attendues du point de vue des utilisateurs en une représentation technique d'une solution qui satisfait aux besoins opérationnels des utilisateurs.

Nous présenterons dans la section suivante le processus de conception de l'architecture qui est composé par les deux sous processus suivants :

- Processus de conception logique (ou fonctionnelle).
- Processus de conception physique.

#### 4.4.3 Processus de conception de l'architecture

Le modélisateur construit des alternatives d'architecture de système de fabrication, sélectionne une ou plusieurs alternatives qui encadrent les préoccupations des parties prenantes et répond aux exigences des produits personnalisés et les exprime dans un ensemble de vues cohérentes. D'abord, il se prépare à la définition de l'architecture principalement en définissant des critères d'évaluation basés sur les préoccupations des parties prenantes et les exigences clés. Ensuite, il développe des points de vue architecturaux en gardant à l'esprit les questions suivantes :

- **L'opérationnel** (pourquoi le système de production est-il conçu et construit, quelles sont ses missions et ses objectifs, quelles sont les missions opérationnelles dans lesquelles il sera utilisé ?);
- **Le fonctionnel** (quels sont les services que le système de production fournit à son environnement ? Quelle est l'organisation de ces services ?); et
- **Le physique** (comment les composants du système interagissent-ils ensemble pour fournir ces services ?).

En effet, le développement du processus de conception est basé sur les deux processus suivants :

— **Processus de conception logique (ou fonctionnelle) : Modèles Structurels / Comportementaux :**

1. Définir l'architecture logique suivant une vision structurelle (statique) (**BDD + IBD**).
2. Établir une allocation des exigences techniques aux fonctions (Allocation matrix).
3. Définir l'architecture logique suivant une vision comportementale (dynamique) (**ActD + SD + StmD + UCD**).

— **Processus de conception physique : Modèles Structurels :**

1. Définir l'architecture physique avec la spécification des exigences allouées aux constituants à développer (**BDD + IBD**).
2. Vérifier, valider, évaluer et comparer (**ActD + test cases**).

Développer des modèles et des vues d'architectures candidates via des diagrammes de structure (diagramme de définition de bloc et diagramme de bloc interne); les diagrammes de comportement (diagramme d'activité, diagramme de séquence, diagramme de machine d'état et diagramme de cas d'utilisation) et la matrice d'allocation appropriée des différentes vues tout en maintenant la traçabilité de l'architecture de la solution constituent l'étape finale de cette sous-phase.

Comme **SysML** est un moteur clé de l'ingénierie des systèmes basée sur des modèles, il permet au modélisateur d'établir une architecture de solution décrivant la structure et le comportement du système de fabrication et prenant en compte les caractéristiques clés des **SMRs**. De plus, **SysML** permet la traçabilité entre les modèles **SysML** et les exigences des parties prenantes.

le processus de définition de l'architecture (Architecture definition process) consiste à élaborer plusieurs alternatives d'architecture afin de sélectionner l'une d'entre elles répondant aux exigences formulées préalablement et de représenter cette solution d'architecture en modèles cohérents.

#### 4.4.4 Besoin d'un profil pour intégrer la reconfigurabilité

La demande pour les temps de développement courts, la complexité des systèmes, mais aussi l'effort de modélisation parfois important dans les systèmes intelligents de virtualisation, peut répondre qu'une fois employé et donc la connaissance de solution éprouvée, est systématiquement réutilisée dans des projets ultérieurs.

Parce que la recherche manuelle répétitive pour les éléments de solution d'appariement optimale et en particulier la création ultérieure de modèles de simulation pour l'analyse du système global est un obstacle majeur très complexe et souvent dans la pratique.

L'objectif est de réduire l'effort dans la création de modèles de simulation. À cet effet, il est déjà utile de préparer des modèles afin qu'ils puissent être couplés dans les développements ultérieurs simplement et automatiquement aux nouveaux systèmes.

La complexité des systèmes manufacturiers conçus est de plus en plus croissante à cause de l'hétérogénéité et l'intégration des systèmes dits mécatroniques. Nous proposons donc de suivre l'approche de l'ingénierie système pour supporter la conception des systèmes mécatroniques manufacturiers. Il est donc préalablement nécessaire de mettre à la disposition des modélisateurs, les outils et les moyens utiles et adéquats pour les permettre de résoudre la complexité de conception des systèmes manufacturiers. Nous choisissons le langage de modélisation [SysML](#) que nous allons le spécifier aux systèmes manufacturiers reconfigurables à travers la méta-modélisation.

La création de profils est l'une des tâches de méta-modélisation. Alors, nous allons utiliser le profile [SysML](#), et le spécifier par la création d'un autre profile contenant un ensemble de stéréotypes pour intégrer la reconfigurabilité dans la conception des systèmes manufacturiers.

Tant que [SysML](#) a été conçu comme un profile [UML](#) pour être adopté dans le monde de l'ingénierie système, nous pouvons réutiliser les stéréotypes, les tagged values (méta-propriétés) et les contraintes pour spécialiser davantage [SysML](#).

Plusieurs besoins sont nécessaires pour intégrer la reconfigurabilité dans l'étape de conception d'un système manufacturier et peuvent être stéréotypés en utilisant [SysML](#) :

- Besoin de représenter les clés caractéristiques de la reconfigurabilité :
  - Création de stéréotypes pour désigner la capacité d'un composant manufacturier hardware d'être modulaire, extensible, flexible, convertible, évolutif, diagonalisable, personnalisable et intégrable ;
  - Création de stéréotypes pour différencier les aléas externes et les aléas internes.
- Besoin de représenter des attributs de performance (ou critères de performances) et de données :
  - Attribut stéréotypé : performances requises ;
  - Attributs de données pour les systèmes opérants ;
  - Attributs de données pour représenter la capacité des systèmes physiques d'être reconfigurable.
- Éléments de modélisation pour représenter les entrées/sorties :
  - Utilisation d'un lien de couplage entre le système opérant et le système de pilotage ;
  - Entrées/sorties du système opérant (flux physiques) ;
  - Entrées/sorties du système de pilotage (flux d'informations) ;
  - Utilisation d'un diagramme qui représente le plan d'ordonnancement.

Alors, nous allons répondre à ces besoins afin de faciliter et aider le modélisateur (figure 4.2) de concevoir la conception du [SMR](#) en tenant compte de la reconfigurabilité pour lui permettre de mettre en œuvre la procédure de conception (ou la démarche de conception) qui sera représentée dans la section suivante.

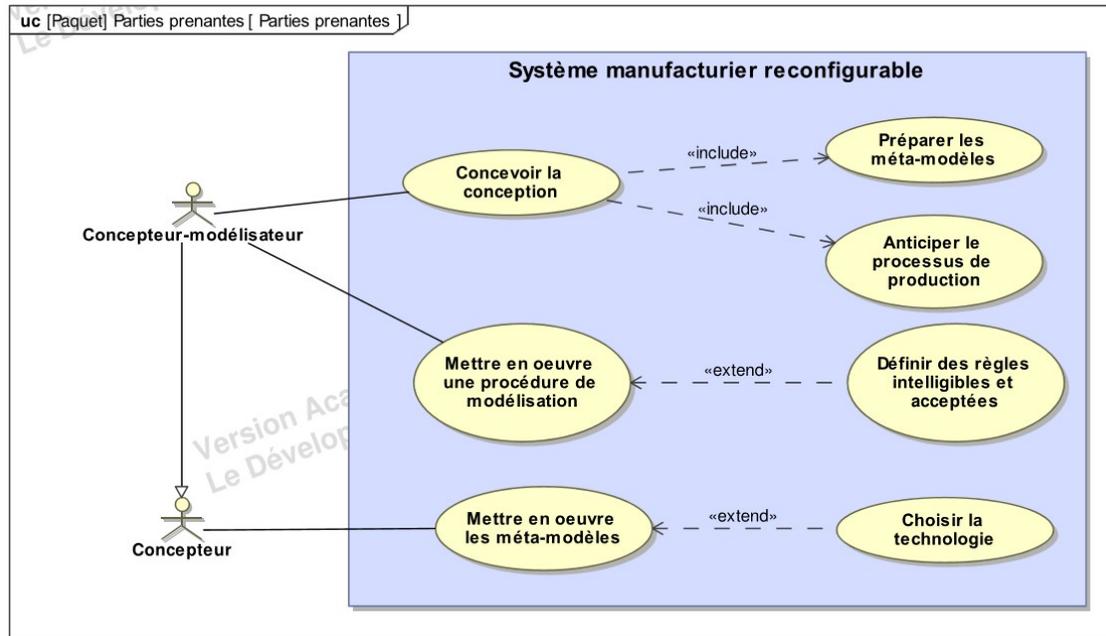


FIGURE 4.2 – Les parties prenantes dans la conception du système manufacturier reconfigurable

#### 4.4.5 Profil de la reconfigurabilité

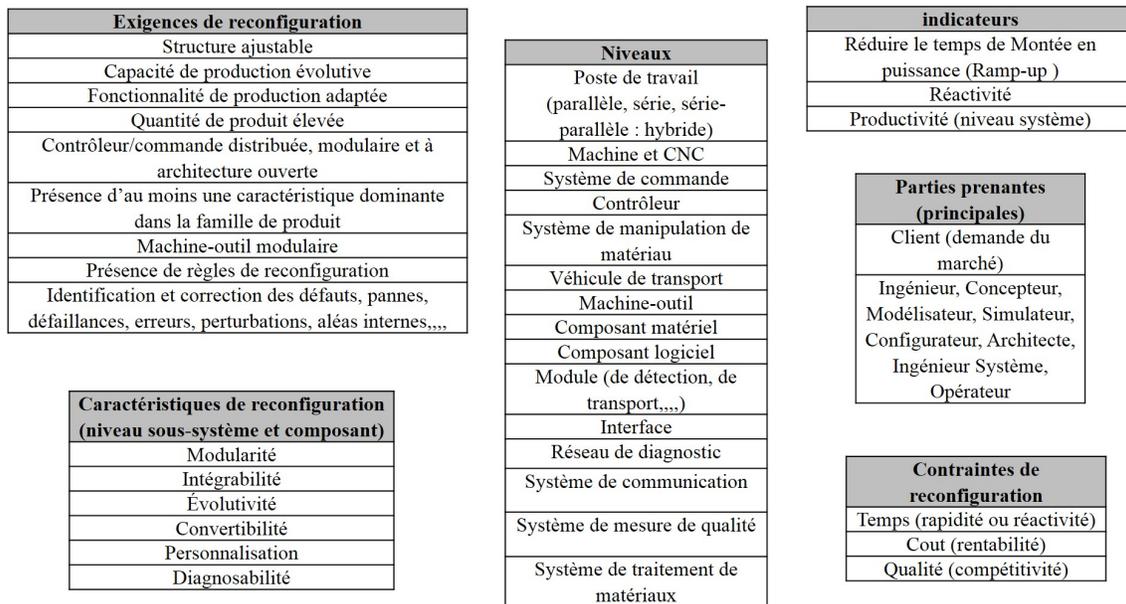


FIGURE 4.3 – Les éléments stéréotypés de la reconfigurabilité

Dans cette partie, nous établirons un profil (figure 4.4) dédié à la notion de la reconfigurabilité des systèmes manufacturiers, contenant des stéréotypes qui représentent les besoins et les éléments liés à la reconfigurabilité.

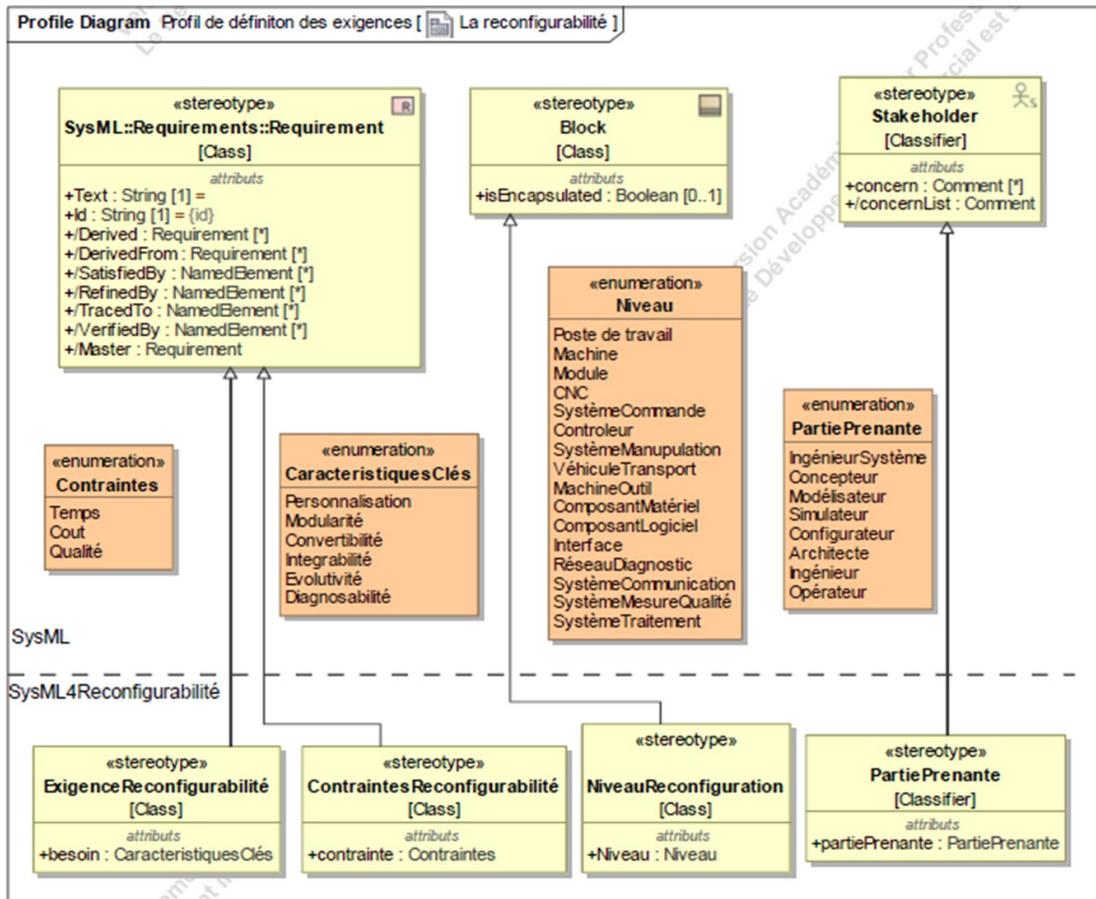


FIGURE 4.4 – Le stéréotype de la reconfigurabilité

Nous rappelons d'abord que les stéréotypes qui seront développés ont été utilisés dans la première phase de notre démarche méthodologique. Aussi, cette partie a pour objectif de répondre aux questions Q1 (concepts) et Q2 (enjeux) de la problématique de la modélisation conceptuelle d'un système manufacturier reconfigurable. Nous allons préparer un méta-modèle de reconfigurabilité pour que le modélisateur soit capable de tenir en compte de la notion de reconfigurabilité dès les premières étapes de modélisation.

Après la définition du cahier des charges, le modélisateur commence à spécifier les exigences du système manufacturier. Le développement de la conception du système opérant/physique et du système de pilotage se fait avec un décalage par le fait que le système opérant/physique doit être conçu avant le système de pilotage. La condition principale que le modélisateur doit la respecter pendant la conception est la reconfigurabilité de tout le système manufacturier. Il s'agit, alors de respecter les caractéristiques clés de la reconfigurabilité citées dans le chapitre précédent. Le profil de la reconfigurabilité va jouer alors doubles rôles :

- Intégration rapide et facile de la reconfigurabilité grâce aux stéréotypes prédéfinis.
- Diminution du temps de conception et surtout avoir un gain du temps pendant l'implémentation et la vérification de la reconfigurabilité.

Le paragraphe suivant représente les éléments stéréotypés (figures 4.3, 4.5, 4.6) qui vont aider le modélisateur à intégrer la reconfigurabilité pendant l'étape de la modélisation concep-



tuelle qui seront détaillés dans la section suivante :

- **Le système physique/Hardware reconfigurable** est généralement composé de :
  - Le système de fixation : il est composé de module basé sur des localisateurs, des pinces et des connecteurs, des matériaux spéciaux ou des composants réglables sont utilisés dans les appareils changeables.
  - Le système d'assemblage : ils sont généralement robotisés. Cela peut être amélioré si le système de robot lui-même a été modularisé. L'utilisation de robots pour calibrer automatiquement les systèmes d'assemblage reconfigurables réduira le temps de montée en puissance.
  - Le système d'usinage : des machines modulaires ont été définies depuis les années 70. Des projets ont été mis en place pour personnaliser la configuration des outils modulaires. Les machines à cinématique parallèle (PKM) tombent également dans cette catégorie du [SMR](#).
  - Le système de manutention : les composants principaux sont des robots autonomes. Des systèmes de transport reconfigurables ont également été développés permettant un changement de volume en temps réel du produit. Des convoyeurs programmables ont également été développés.
  - Le système supérieur : c'est un [SMR](#) dans un atelier comme par exemple cinq cellules machine, chaque cellule comprenant deux ou trois stations de travail dédiées à des tâches particulières.
- **Le système logique/Software :**
  - Rééchelonnement ++
  - Ré-aménagement
  - Re-programmation
  - Amélioration
- **Cause de la reconfigurabilité :**
  - Aléas internes
  - Aléas externes
- **Action de la reconfigurabilité :**
  - Ajouter
  - Supprimer
  - Modifier
  - Interchanger
- **Niveau de la reconfigurabilité :**
  - Système
  - Composant
  - Pièce
  - Opération
- **Type de reconfiguration :**
  - Corrective
  - Évolutive
  - Adaptative
  - Perfective
- **Mode de reconfiguration :**
  - Hors ligne

- En ligne
- **Objectif de la reconfigurabilité :**
  - Continuité de la production
  - Amélioration des performances de production
- **Caractéristiques clés de la reconfigurabilité :**

Les caractéristiques clés de la reconfigurabilité présentés par le profil développé dans la figure 4.6 contiennent chacune ces attributs et ses opérations spécifiques.

  - Personnalisable
  - Modulaire
  - Flexible
  - Convertible
  - Intégrable
  - Extensible
  - Évolutif
  - Diagonalisable

Dans la section suivante, nous intéresserons à la conception architecturale pour déterminer les composants du système également leurs interactions entre eux. Les composants sont encapsulés dans des modules et les interactions sont des liens lorsque les modules sont assemblés. L'idée est de concevoir un système manufacturier pour produire autant de variantes de produits ou de parties de produits que possible afin que le système manufacturier puisse gérer les changements et les incertitudes de manière rentable.

## 4.5 Élaboration de l'architecture conceptuelle du système manufacturier de pilotage

Dans cette section, nous présenterons le processus de l'élaboration de l'architecture conceptuelle du système manufacturier de pilotage (figure 4.7) pour guider le modélisateur à appréhender la structure et les interactions du système manufacturier, mais aussi de tenir en compte la notion de reconfigurabilité tout au long de cette étape.

L'objectif alors consiste à élaborer l'architecture du système manufacturier reconfigurable en décrivant l'organisation des fonctions (architecture fonctionnelle) et des composants (architecture physique) du système, sous les angles comportementaux, structuraux et dynamiques. Afin d'établir cette étape conceptuelle, nous avons choisi l'approche de l'ingénierie des systèmes dont le but est de formaliser et d'appréhender la conception du système manufacturier reconfigurable avec succès, en se basant sur la norme ISO/IEC 15288 [ISO/IEC-15288, 2005]. Le modélisateur suit les processus techniques requis tels qu'ils ont été définis dans la norme ISO 15 288 qui lui permettent d'établir cette première phase (figure 4.8).

Notre contribution est d'intégrer la reconfigurabilité dans cette étape. Au début de la conception, le modélisateur décompose et décrit l'architecture du système de fabrication tout en analysant quatre ensembles de points de vue (structurels, comportementaux, besoins et paramétriques) définis dans SysML. À chaque point de vue, il devrait considérer les caractéristiques clés du SMR au moins pendant le premier cycle de conception pour vérifier facilement la reconfigurabilité des modèles de systèmes de fabrication pour le futur cycle de conception.

Nous présenterons l'architecture conceptuelle d'un système manufacturier reconfigurable à travers un processus de modélisation conceptuel réparti sur trois sous-étapes :

- Processus de définition des besoins des parties prenantes ;
- Processus d'analyse des exigences ;
- Processus de conception de l'architecture.

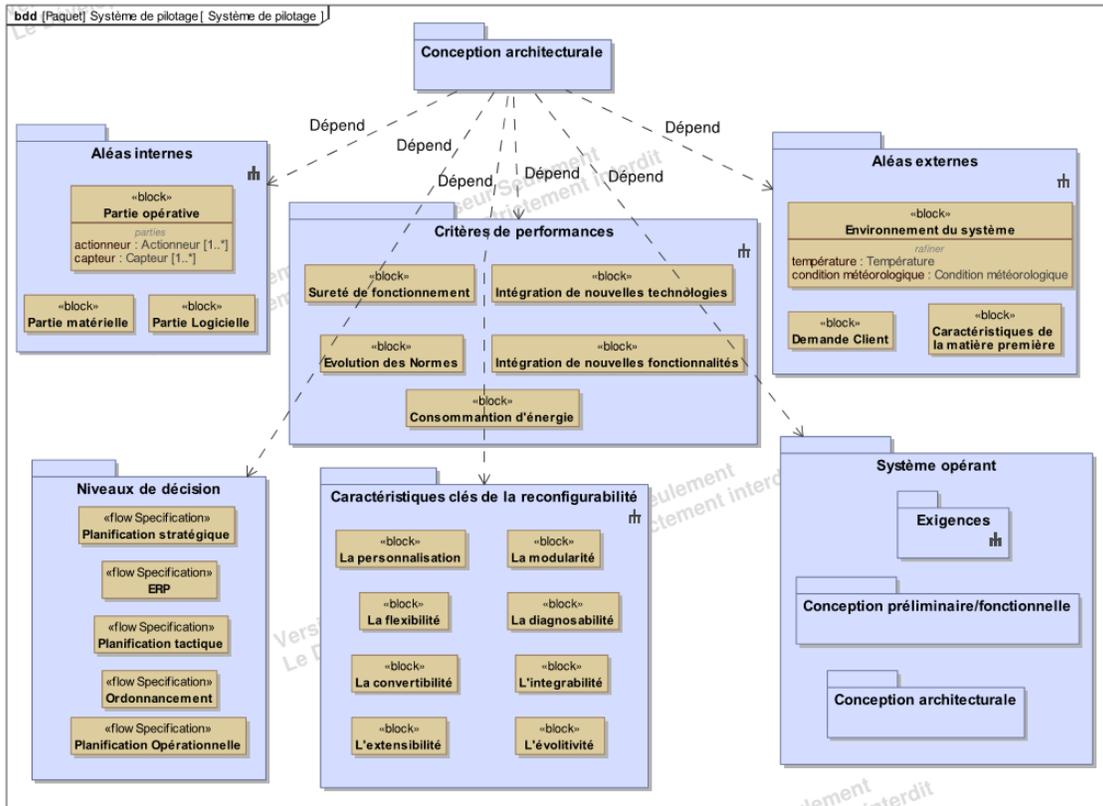


FIGURE 4.7 – La structure générale d'un système manufacturier reconfigurable

L'architecture <sup>1</sup> système décrit l'organisation du système à faire, sa structure, l'organisation des services qu'il fournit, ainsi que ses liens avec les autres systèmes qui sont dans son environnement. On différencie plusieurs types d'architectures, dont l'architecture fonctionnelle et l'architecture physique [Luzeaux et Ruault, 2013].

Le système est d'abord regardé comme une boîte noire dans ses interactions avec son environnement. Identifier ces interactions permet d'identifier les services qu'il fournit à cet environnement, et donc les fonctions qu'il doit réaliser. L'architecture fonctionnelle décrit l'organisation des fonctions du système et leurs interrelations. Ces fonctions expriment ce que fait le système (le quoi), dans quel but (le pourquoi) indépendamment de la façon de faire le système (le comment). Ces fonctions sont décomposées hiérarchiquement pour permettre d'identifier les fonctions terminales. La représentation simplifiée est une arborescence fonctionnelle. Une fonction est une transformation des entrées qui lui sont fournies pour pro-

1. Architecture : ensemble de concepts fondamentaux ou propriétés d'un système dans son environnement incorporés dans ses éléments, ses relations et dans les principes de sa conception et de son évolution (ISO, 2011).

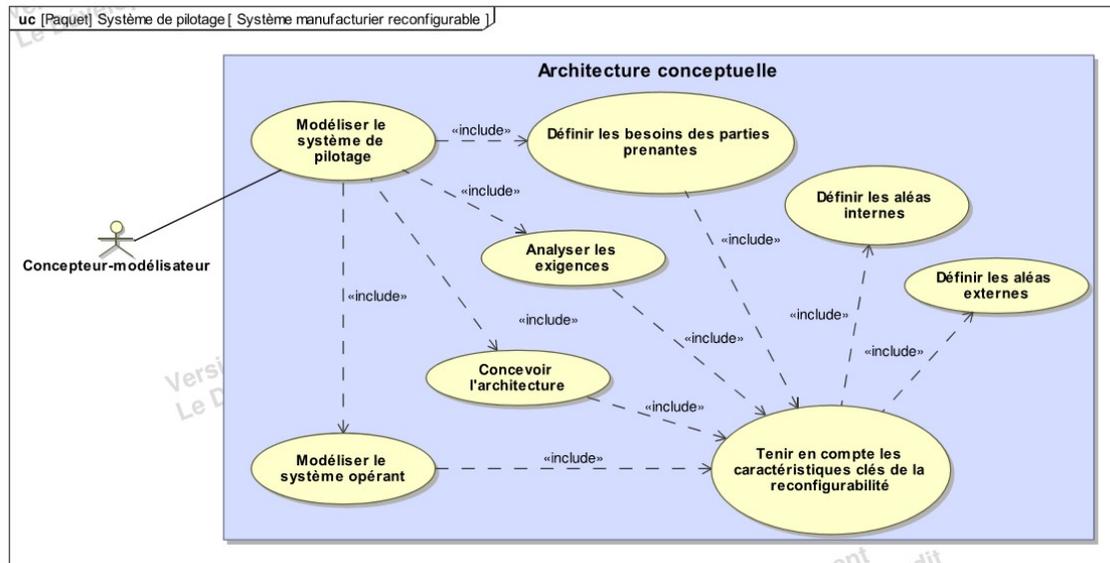


FIGURE 4.8 – Cas d’utilisation pour la conception d’un système manufacturier reconfigurable

duire des résultats sous forme de sorties. Pour cela, la fonction s’appuie sur des ressources et suit un ensemble de règles d’exécution prédéfinies.

Notre contribution met en œuvre la modélisation **SysML** que nous détaillons dans le cas d’étude dans le dernier chapitre. Les liens entre fonctions sont des relations logiques et temporelles. Les premières décrivent les liens entre les fonctions telles que l’exclusion et l’inclusion. Les secondes concernent la séquentialité, le parallélisme, l’itération. Des contraintes logiques ou temporelles peuvent être attachées aux fonctions.

Chaque fonction est réalisée par un ou plusieurs composants. Cette relation s’appelle l’allocation des fonctions aux composants. Il existe d’autres façons de représenter les fonctions principales d’un système, dont les le diagramme de cas d’utilisation ou le diagramme d’activités. Ces solutions permettent de modéliser l’arborescence des fonctions, ainsi que les relations logiques et temporelles qu’elles entretiennent entre elles.

L’architecture physique, quant à elle, décrit l’organisation de ces composants qui réalisent les fonctions. Le choix parmi plusieurs architectures physiques candidates s’appuie sur une comparaison de ces architectures en tenant compte du coût et du niveau de maturité technologique (Technology Readiness Level) de ces composants. Des composants réalisent des fonctions différentes. Il n’y a donc pas de relation de bijection entre l’architecture fonctionnelle et l’architecture physique.

La description d’architecture (ISO, 2011) comprend l’ensemble des produits d’ingénierie décrivant l’architecture d’un système sous différents angles, différents points de vue, pour contribuer à :

- la formalisation du système et de ses évolutions ;
- la communication avec les parties prenantes ;
- l’évaluation et la comparaison des architectures de manière cohérente ;
- la planification, la gestion et l’exécution des activités de développement du système ;
- la formalisation des caractéristiques persistantes du système et les principes permettant des évolutions acceptables du système ;

- la vérification de l'implémentation du système conformément à la description de l'architecture ;
- l'enregistrement des contributions des savoirs et savoir-faire en architecture des systèmes à logiciel prépondérant.

Cette norme (ISO, 2011) présente les trois niveaux de point de vue d'architecture que sont :

- le niveau opérationnel : pourquoi le système est-il conçu et construit ? Quelles sont ses missions et buts ? Quelles sont les missions opérationnelles dans lesquelles il sera utilisé ?
- le niveau fonctionnel : comment sont organisés les services que le système fournit à son environnement ?
- le niveau physique : comment les composants du système interagissent ensemble pour fournir ces services ? Cette norme ne prescrit pas un langage particulier pour décrire l'architecture d'un système.

## 4.6 Conclusion

Nous avons traité l'aspect fonctionnel (structure et sous-fonction du système) et l'aspect physique (architecture) d'un [SMR](#). Nous avons développé des artefacts conceptuels et architecturaux pour aider le modélisateur à concevoir la conception des [SMRs](#). Les artefacts exécutables et comportementaux seront définis dans le chapitre suivant en établissant le couplage entre les artefacts conceptuels/architecturaux et les artefacts exécutables/comportementaux.

Dans le chapitre suivant, nous nous intéresserons à la modélisation du contrôle des systèmes manufacturiers reconfigurables. La conception de la configuration est impliquée dans la phase d'application du système. Dans cette phase, nous allons déterminer la configuration du système sous une architecture système donnée pour une tâche spécifique. Une configuration est un assemblage des modules sélectionnés, il peut remplir les tâches données de manière optionnelle. Concernant la modélisation du contrôle qui est impliquée à la phase de fonctionnement du système, elle sera traitée dans le même chapitre parce qu'elle est fortement liée à la modélisation de la configuration. La modélisation du contrôle détermine les variables de processus approprié (déplacement, vitesse). La configuration est utilisée pour remplir la tâche de manière satisfaisante.

# Chapitre 5 : Processus d'intégration et de simulation des systèmes manufacturiers reconfigurables

## **Chapitre 5**

# **Processus d'intégration et de simulation des systèmes manufacturiers reconfigurables**

## 5.1 Introduction

Après la définition de la conception architecturale qui est impliquée à la phase de conception du système, nous continuons à développer dans ce chapitre la conception de la configuration et la conception de contrôle qui sont impliquées respectivement dans la phase d'application du système et dans la phase de fonctionnement du système. Dans la phase de la conception de la configuration, notre objectif est de déterminer la configuration du système sous une architecture système donnée pour une tâche spécifique. Une configuration est un assemblage des modules sélectionnés, il peut remplir les tâches données de manière optionnelle. Concernant la conception de contrôle, nous allons déterminer les variables de processus approprié (déplacement, vitesse). La configuration est utilisée pour remplir la tâche de manière satisfaisante.

Toujours dans le contexte de satisfaire l'exigence de l'intégration de la reconfigurabilité dans les systèmes manufacturiers, il faut préciser une stratégie pour faire face à un changement. Ceci peut varier selon les objectifs visés.

La modélisation/simulation orientée agent étend considérablement les capacités de simulation à événements discrets à des fins descriptives et normatives dans le contexte des connaissances complexes d'un [SMR](#). Les agents sont des entités autonomes aptes à exercer leurs fonctions sans avoir besoin d'une interaction continue de la part d'utilisateur. Les agents sont exploités pour la construction et ou la simulation de systèmes complexes.

La [simulation orientée agent - Agent Oriented Simulation \(SOA\)](#) est aujourd'hui utilisée dans un nombre croissant de domaines, citons notamment la sociologie, biologie, l'économie, la physique, la chimie, l'écologie et le domaine industriel. Dans tous ces domaines, elle remplace progressivement les différentes techniques de micro simulation et de simulation orientée objets. Cette tendance tout d'abord est due à la capacité de la [SOA](#) à appréhender des modèles dynamiques très différents, composés d'entités très simples (agents réactifs), jusqu'à des entités plus complexes (sous la forme d'agents délibératifs).

Le concept d'agent permet d'abord de développer des modèles qui ont le principal intérêt d'être exécutés (simulés), permettant l'étude du comportement du système complexe modélisé, et donc de sa dynamique, résultant des comportements des agents en interaction. Un autre intérêt de la [SOA](#), souvent mis en avant par rapport aux automates cellulaires, est la facilité avec laquelle elle permet à un modélisateur de manipuler différents niveaux de représentation, par exemple individus et groupe d'individus. L'entreprise peut avoir plusieurs stratégies :

- Une stratégie réactive qui vise uniquement à satisfaire le besoin du changement immédiat, et qui porte uniquement sur le plan opérationnel avec une adaptation des installations ou processus concernés.
- Une stratégie proactive qui, au-delà de répondre aux changements présents, anticipe ceux qui peuvent avoir lieu dans un avenir proche.
- Enfin, l'entreprise peut avoir aussi la possibilité de mener des investissements stratégiques pour espérer à des avantages compétitifs à plus long terme.

## 5.2 Problématique de la modélisation opérationnelle

### 5.2.1 Problématique

Comment la relation complexe entre les différentes composantes d'un système manufacturier reconfigurable devrait-elle être coordonnée et gérée ? Dans ce chapitre, il est montré que cela peut être fait en utilisant l'organigramme de l'architecture du système (modélisation conceptuelle) (ou en utilisant le concept holonique dans le diagramme de d'activité).

Comment garantir la stabilité et la contractibilité d'un système ? Un système manufacturier reconfigurable doit être stable et contrôlable. Si le **SMR** n'est pas contrôlable, il ne peut pas satisfaire les exigences fonctionnelles à tout moment. Dans la partie (validation par les **SMA**s) suivante, on fait valoir qualitativement que lorsqu'un **SMR** satisfait l'indépendance, le système est stable et contrôlable dans la tolérance spécifiée.

Quel est le rôle des opérateurs humains dans un système ? Les gens font partie intégrante de nombreux systèmes. Les systèmes homme-machine sont une considération importante dans ces systèmes, car la performance des êtres humains est un facteur déterminant dans le résultat du système.

**Comment peut-on garantir la continuité et la cohérence par la modélisation opérationnelle pour faire face à un changement dans un **SMR** suite à l'occurrence d'un aléa interne ou externe ?**

**Comment faire mettre en œuvre des modèles opérationnels au sein d'un système informatique pour simuler et évaluer un **SMR** ?**

### 5.2.2 Objectif

Lors de la conception des systèmes manufacturiers reconfigurables (qui sont des systèmes mécatroniques), le choix architectural principal se situe entre les différents types d'architectures de pilotage citées dans chapitre 1.

Comme les grands systèmes requièrent une architecture raisonnablement transparente d'un point de vue structurel et fonctionnel pour permettre une gestion efficace, l'architecture qui peut répondre à cette exigence : l'architecture holonique. D'après notre étude de l'art, c'est la structure organisationnelle la mieux adaptée aux environnements dynamiques grâce à un réseau d'entités autonomes (holons), c'est-à-dire des unités habilitées à prendre des décisions selon des règles générales flexibles et acceptées, sans attendre d'instructions. De plus, ces entités ont la capacité de changer rapidement leurs comportements en réponse ou en anticipation aux changements de l'environnement et d'autonomie. Ainsi, ils sont capables de décider quand et comment changer le comportement du système manufacturier sans attendre les instructions externes.

L'objectif de faciliter le passage de la conception architecturale vers la conception opérationnelle (des modèles de transformations). L'objectif est d'intégrer ainsi la logique, le processus et le contrôle de la décision (pilotage) dans le système manufacturier reconfigurable en

se basant sur l'architecture conceptuelle (figure 5.1). L'objectif aussi est de préparer tout ce qu'il faut à l'informaticien pour faire le processus de vérification et de validation, c'est-à-dire de permettre une simulation dans une plateforme multi-agents.

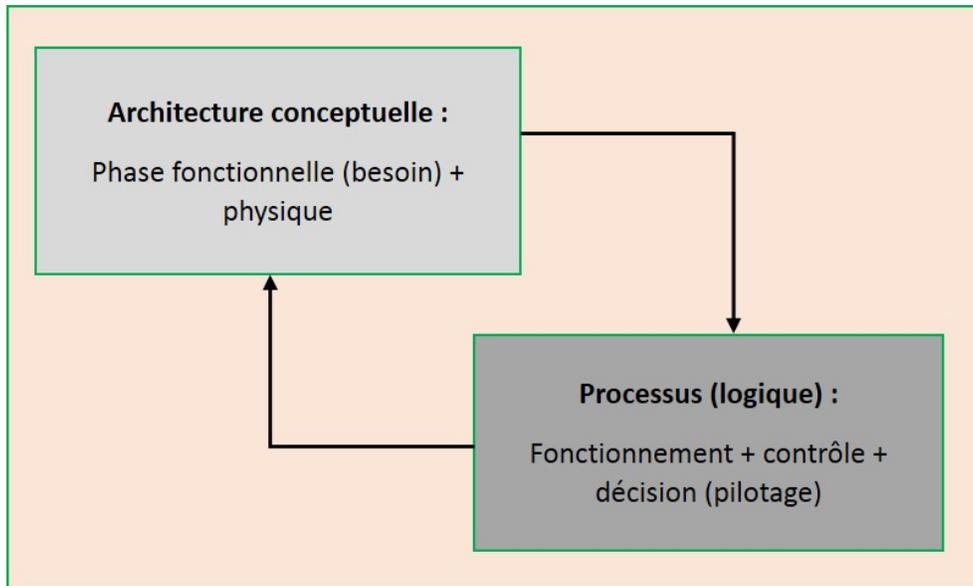


FIGURE 5.1 – Objectif du chapitre

### 5.3 Architecture opérationnelle du système de pilotage

La couche de pilotage correspond au contrôle de haut niveau. Elle contient tout ce qui se réfère aux prises de décision concernant le pilotage. Cette couche est divisée en trois modules :

- Le Module de Traitement Pilotage qui s'occupe de gérer l'information de haut niveau. Cette gestion peut concerner la structuration, la modification ou le stockage des données, voire un module d'apprentissage. C'est ce module qui transmet ou reçoit les informations provenant des autres holons. Il agit donc comme l'interface du niveau pilotage.
- Le Module Stockage Pilotage qui intègre l'ensemble des données nécessaires à la prise de décision de haut niveau. Ce module n'effectue aucun traitement.
- Le Module de Décision Pilotage qui prend les décisions de haut niveau basées sur les informations mises à disposition dans le module de stockage. Ce module définit le comportement décisionnel du holon lui permettant d'atteindre ses propres objectifs et de coopérer ou collaborer avec les autres holons. Il peut aussi restreindre les comportements d'entités de niveaux inférieurs pour garantir une optimisation globale et ainsi permettre un contrôle de la « myopie ».

La couche opérationnelle correspond au contrôle de bas niveau. Elle concerne le contrôle des éléments physiques, et la réalisation opérationnelle des objectifs définis par la couche de pilotage. La couche opérationnelle contient les éléments physiques du holon s'il en existe. Cette couche est elle aussi divisée en trois modules :

- Le Module de Traitement Opérationnel qui gère l'information de bas niveau (la partie physique). Il agit comme l'interface du niveau opérationnel.
- Le Module Stockage Opérationnel qui intègre l'ensemble des données nécessaires à la prise de décision opérationnelle. Il intègre aussi les éléments physiques si l'entité en contient. Ce module n'effectue aucun traitement.
- Le Module de Décision Opérationnel qui prend les décisions de bas niveau (rotation d'un aiguillage, lancement d'un programme robot) en se basant sur les informations fournies par le module de stockage. Ce module de décision opérationnel fournit des objectifs intermédiaires permettant d'atteindre ceux fixés par le niveau supérieur.

## 5.4 Principe de la modélisation opérationnelle

La modélisation opérationnelle d'un **SMR** est basée sur trois principaux fondements, c'est la décomposition/l'intégration, l'abstraction et l'organisation. Le concept Holonique permet de satisfaire ces notions. Le premier fondement consiste à traiter une tâche et la développer sur des sous-tâches. Ces derniers seront renvoyés vers un solveur qui intègre les sous-problèmes sous la forme d'une solution générale pour la tâche originale. Le deuxième fondement est le processus de la suppression ou bien l'ignorance des détails non essentiels entre temps se focaliser sur les détails les plus importants ou bien essentiels. Finalement, le principe d'organisation consiste à respecter l'architecture d'une telle référence holonique par exemple **ADACOR** [Leitão et Restivo, 2006].

## 5.5 Processus d'intégration

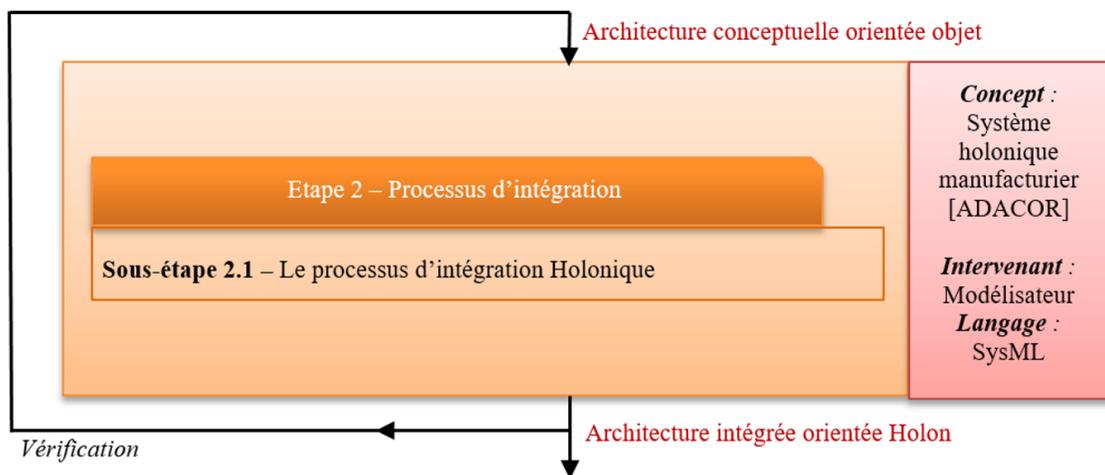


FIGURE 5.2 – Représentation de l'étape de l'intégration holonique

La modélisation opérationnelle commence par le processus d'intégration présenté dans la figure 5.2. Ce processus est composé par les étapes suivantes :

1. Choisir la référence **ADACOR**.

2. Identifier les holons en utilisant le profil holonique.
3. Récupérer les limites et les fonctionnalités des holons dans l'holarchie (description de l'exigence de domaine) (UCD).
4. Identifier l'organisation (partie physique et informationnelle) (UCD).
5. Identifier les interactions (BDD)
6. Décrire les scénarios (SD).
7. Définir le plan des rôles dans l'holarchie (ActD)
8. Analyser le modèle de l'holarchie.

Dans la section suivante, nous détaillerons les étapes précédentes et nous expliquerons l'utilisation du profil holonique avec les transformations requises.

## 5.6 Élaboration de l'architecture opérationnelle du système de pilotage

En réalité, le modélisateur continue d'adopter une approche documentaire pour tenir compte des interdépendances des disciplines (c-à-d. Comment, quand, et de quelle manière une discipline influence une autre). Cela conduit fréquemment à une faible synchronisation et entraîne des inefficacités qui n'apparaissent souvent que lors de l'intégration et des tests.

Afin d'éviter ces problèmes, un environnement intégré est exigé pour répondre à toutes les demandes. Ainsi, l'utilisation de modèles et de transformations de modèles pour combler ces lacunes d'intégration et l'initiative de la MBSE sont les approches les plus prometteuses dans ce domaine. Les modèles de systèmes de fabrication typiques possèdent une structure compliquée avec divers niveaux d'abstraction et une large gamme de points de vue. On propose dans cette thèse d'utiliser le modèle holonique comme solution.

Par conséquent, une formulation supplémentaire et un support informatique sont absolument nécessaires. Adopter des techniques d'Intelligence Artificielle (IA) appropriées pour de tels modèles peut entraîner une diminution du temps de calcul de l'exécution du modèle. Dans ce cas, nous utiliserons la technologie multi-agents.

### 5.6.1 Transformation holonique

La simulation est devenue de plus en plus complexe avec la complexité croissante des exigences du système. Pour cette raison, la transformation entre le processus de niveau de modélisation et le processus de niveau de simulation constitue un guide important pour réduire la complexité technique et faciliter une spécification plus abstraite des logiciels basés sur SysML.

Dans cette phase intermédiaire, les diagrammes SysML sont les artefacts utilisés dans le développement d'une architecture de système de fabrication complète. Afin de générer une cartographie utile, nous devrions établir des liens de traçabilité entre les éléments cibles et les éléments sources. Les cibles sont des holons correspondants de l'architecture SMH et les éléments source sont des modèles SysML. Le modélisateur s'occupe de créer des liens entre les diagrammes SysML et les holons ADACOR (Holon-Produit (HP), Holon-Tâche

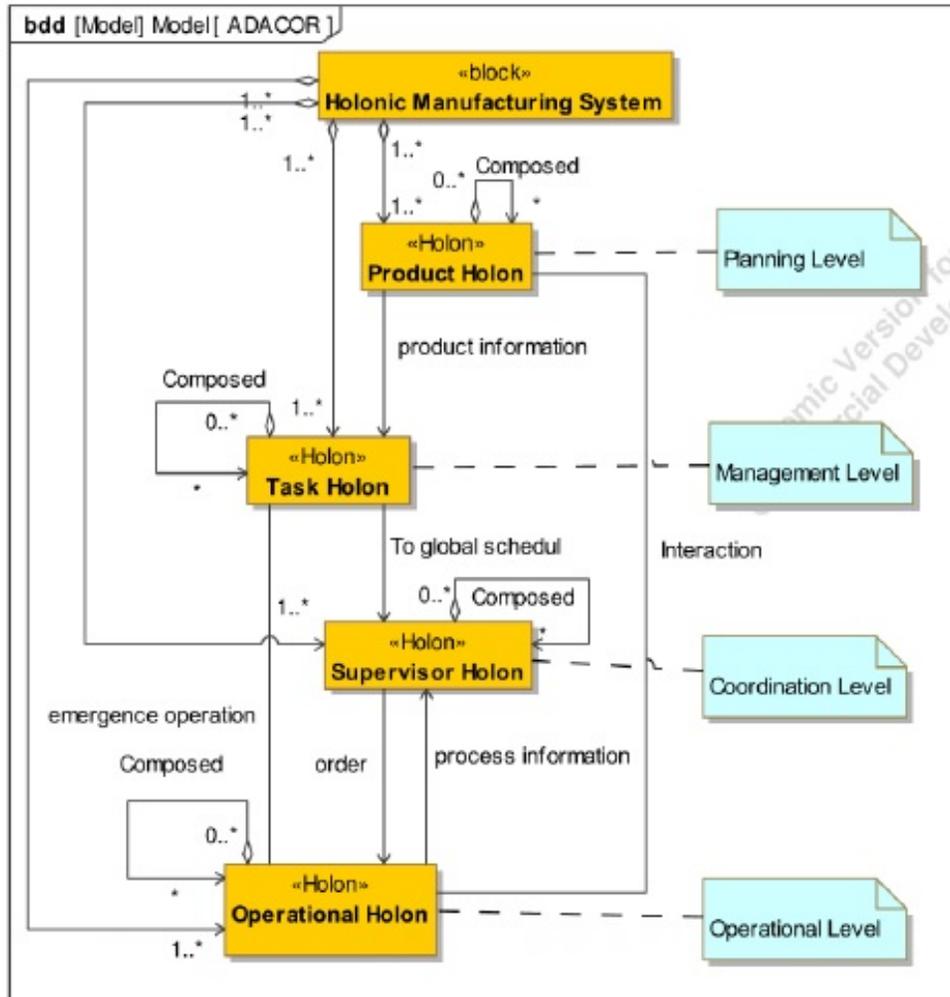


FIGURE 5.3 – Le concept ADACOR : le modèle de transformation holonique

(HT), Holon-Superviseur (HS) et Holon-Opérationel (HO)) (figure 5.3) en quatre points avec seulement les diagrammes proposés et correspondants dans chaque point de vue.

La transformation des spécifications SysML au concept holonique doit être cohérente pour l'implémentation en utilisant les SMAs. En conséquence, une transformation non ambiguë entre les éléments de divers diagrammes SysML et les holons de l'architecture ADACOR doit être établie.

Les tableaux 5.1 et 5.2 présentent le point de vue structurel. Pour chaque BDD et IBD, les éléments SysML sont liés aux éléments holon appropriés de l'architecture ADACOR. Les tableaux 5.3 et 5.4 illustrent le point de vue comportemental. Le diagramme de machine d'état et le diagramme d'activité donnent les éléments adéquats pour chaque holon. Concernant la vue paramétrique présentée dans les tableaux 5.5 et 5.6, le modélisateur pourra extraire les paramètres appropriés du diagramme paramétrique SysML afin de configurer les holons. Le tableau 5.7 décrit le point de vue des exigences. Nous proposons ici au modélisateur d'inclure les éléments du diagramme d'exigences SysML uniquement dans le produit holon, car il contient les connaissances relatives au produit.

Tableau 5.1 – Transformation du point de vue structurel en PH, TH et SH

Phase 1			Phase 2					
View point	SysML Diagram	SysML element	PH, TH, SH					
			Holon	Informational part	Physical part	Physical flow	Informational flow	Holon flow
Structural	BDD	A Block	×					
		B Block, Value property, relationship type		×				
		C Interconnection					×	×
	IBD	A Block		×				
		B Block, Value type, Flow Spec		×			×	×
		C Connector					×	

A: Model definition, B: Port definition, C: Edge

Tableau 5.2 – Transformation du point de vue structurel en OH

Phase 1			Phase 2					
View point	SysML Diagram	SysML element	OH					
			Holon	Informational part	Physical part	Physical flow	Informational flow	Holon flow
Structural	BDD	A Block	×					
		B Block, Value property, relationship type		×	×			
		C Interconnection				×	×	×
	IBD	A Block		×	×			
		B Block, Value type, Flow Spec		×	×		×	
		C Connector				×	×	×

A: Model definition, B: Port definition, C: Edge

Tableau 5.3 – Transformation du point de vue comportemental en PH, TH et SH

Phase 1			Phase 2					
View point	SysML Diagram	SysML element	PH, TH, SH					
			Holon	Informational part	Physical part	Physical flow	Informational flow	Holon flow
Behavioural	STM	A State	×	×				
		B Trigger, action					×	×
		C Transition					×	×
	Act	A Activity		×				
		B Block, Value type		×			×	
		C Object Flow					×	×

A: Model definition, B: Port definition, C: Edge

Tableau 5.4 – Transformation du point de vue comportemental à OH

Phase 1			Phase 2					
View point	SysML Diagram	SysML element	OH					
			Holon	Informational part	Physical part	Physical flow	Informational flow	Holon flow
Behavioural	STM	A State	×					
		B Trigger, action		×	×			
		C Transition				×	×	×
	Act	A Activity	×					
		B Block, Value type		×	×			
		C Object Flow				×	×	×

A: Model definition, B: Port definition, C: Edge

Tableau 5.5 – Transformation du point de vue paramétrique en PH, TH et SH

Phase 1			Phase 2					
Phase 1			PH, TH, SH					
View point	SysML Diagram	SysML element	Holon	Informational part	Physical part	Physical flow	Informational flow	Holon flow
Parametric	Par	A Constraint Bloc	✗	✗				
		B Value Type		✗				
		C Binding Connector	✗	✗			✗	✗

A: Model definition, B: Port definition, C: Edge

Tableau 5.6 – Transformation du point de vue paramétrique en OH

Phase 1			Phase 2					
Phase 1			OH					
View point	SysML Diagram	SysML element	Holon	Informational part	Physical part	Physical flow	Informational flow	Holon flow
Parametric	Par	A Constraint Bloc	✗	✗	✗			
		B Value Type		✗				
		C Binding Connector	✗	✗		✗	✗	✗

A: Model definition, B: Port definition, C: Edge

Tableau 5.7 – Transformation du point de vue des besoins en PH

Phase 1			Phase 2					
Phase 1			PH					
View point	SysML Diagram	SysML element	Holon	Informational part	Physical part	Physical flow	Informational flow	Holon flow
Requirement	Req	A Requirement	✗	✗				
		B id, text description	✗	✗				
		C Req relationship					✗	✗

A: Model definition, B: Port definition, C: Edge

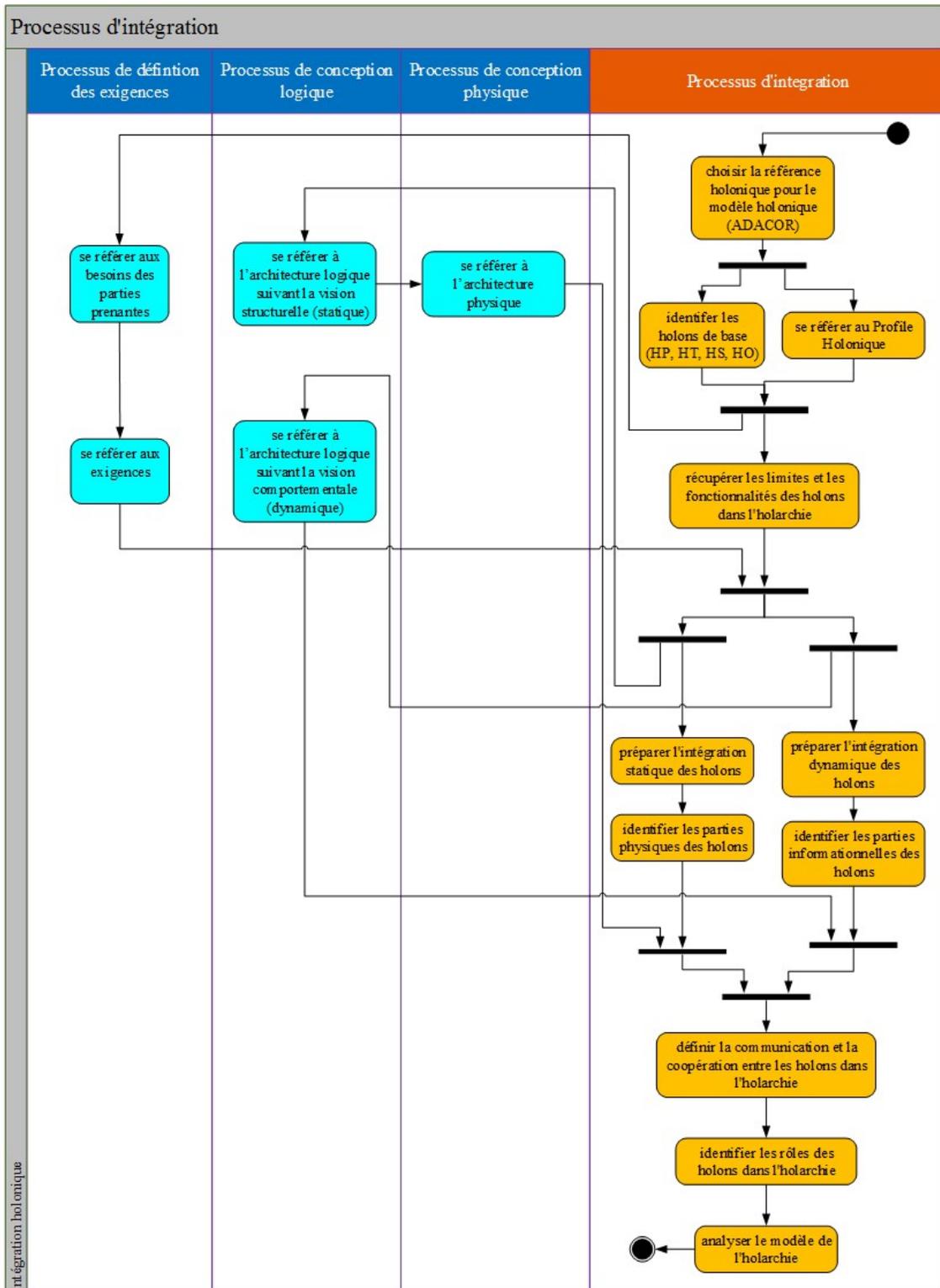


FIGURE 5.4 – Processus d'intégration holonique

Les références de ces transformations sont la définition du concept [ADACOR](#) et les informations requises dans la phase suivante. Ces figures aident à comprendre les relations qui

existent dans et entre les modèles SysML et l'intégration holonique. Pour cette raison, ces informations seront traitées au cours de la deuxième phase d'intégration afin de spécifier les méta-modèles holoniques lors de l'application du profil holonique.

L'un des principaux avantages de cette transformation est qu'elle pourrait être utilisée pour gérer la reconfigurabilité des systèmes de fabrication à une nouvelle demande du client. Cela permet de comprendre la logique des anciens modèles SysML. La mise en œuvre de toutes les transformations entre les diagrammes SysML et le concept holonique est une contribution significative. Il sera possible de passer des diagrammes SysML au concept holonique.

Les artefacts utilisés sont les tables de transformation établies entre les spécifications SysML et l'architecture holonique. Les artefacts générés sont des diagrammes holoniques de méta-modèles SysML qui décrivent la solution de l'architecture holonique. À ce niveau intermédiaire de conception, le modélisateur se réfère à la matrice de transformation (tableaux 5.1, 5.2, 5.3, 5.4, 5.5, 5.6 et 5.7) qui lui aide à intégrer les différents points de vue SysML impliquant la création et la mise à jour de l'architecture ADACOR.

Le but de cette phase est d'augmenter l'abstraction des modèles en considérant le profil holonique suggéré (figure 5.5) comme l'une des différentes approches disponibles pour définir des langages spécifiques au domaine (DSL) dans SysML. Ensuite, il est possible d'ajouter des spécifications holoniques utiles pour aider le modélisateur à effectuer la simulation en considérant la reconfigurabilité des systèmes de fabrication. De plus, cette phase permettra au modélisateur de simplifier l'organisation et d'assurer la cohérence lors de l'application de la reconfigurabilité entre différents points de vue des objets du système de fabrication.

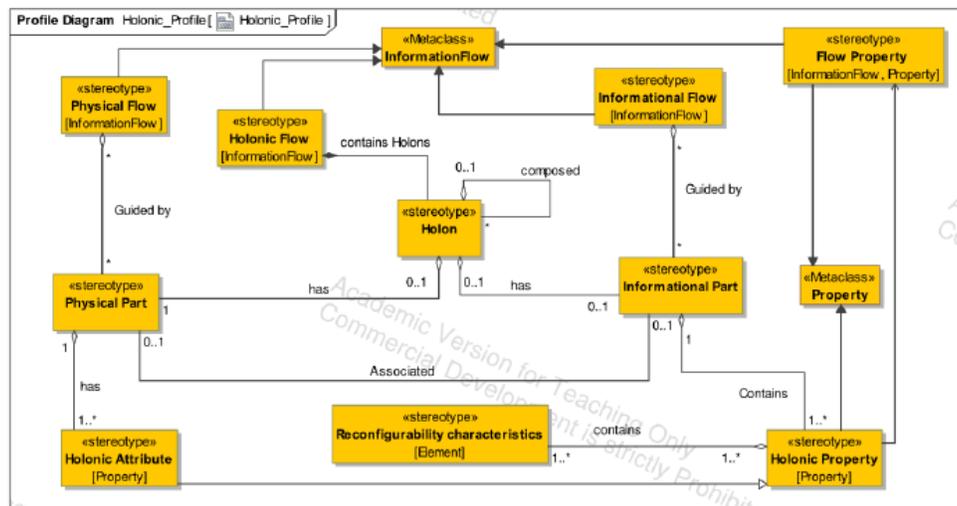


FIGURE 5.5 – Le profil Holonique

Pour appliquer le paradigme holonique sur l'architecture proposée, le modélisateur construit les méta-modèles holoniques pour chaque holon afin de relier les éléments du modèle de manière à guider les relations plus rigoureuses qui sont développées au cours de la phase suivante. Cette transformation permet de voir le méta-modèle holonique comme une structure de référence pour une implémentation similaire du concept holonique selon la reconfiguration requise dans les systèmes de fabrication. Les holons ADACOR sont définis comme des stéréotypes qui prolongent les constructions SysML et UML existantes, telles que la méta-classe

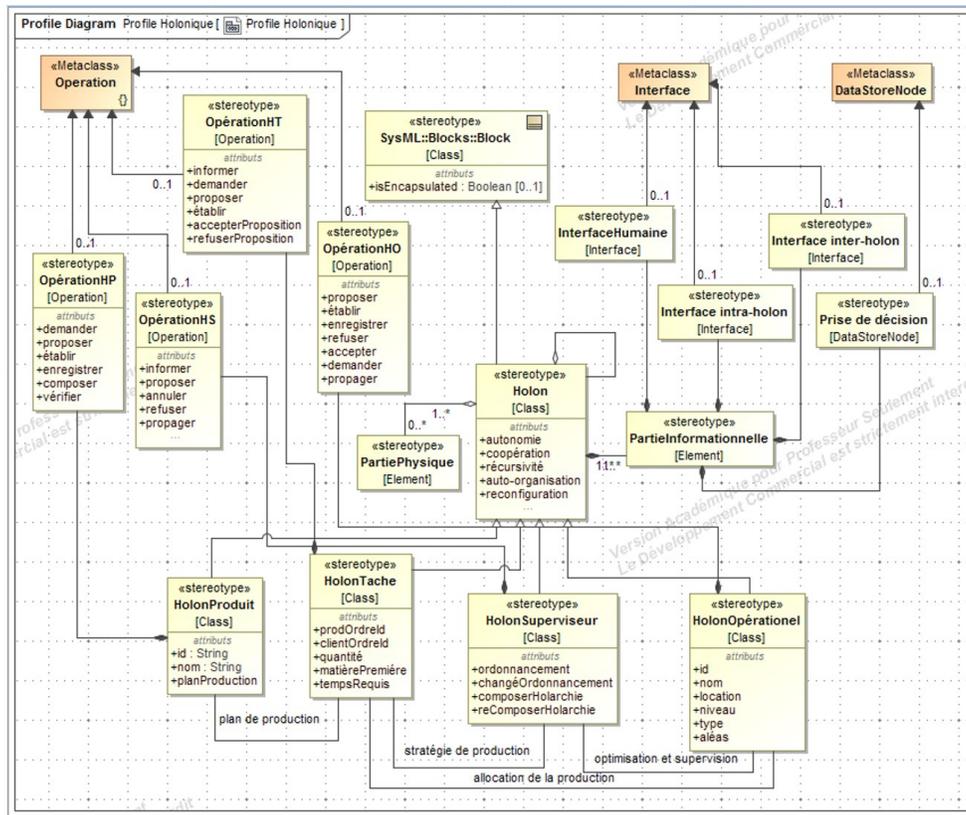


FIGURE 5.6 – Le profile Holonique étendu

### Block de SysML.

De cette manière, il est essentiel de décrire de manière formelle plusieurs vues d'un même système pour les intégrer de manière systématique. Un méta-modèle correspondant de chaque holon est utilisé pour lier les éléments des modèles source et cible sur lesquels les transformations sont définies dans les tables de transformation proposées. Les méta-modèles holoniques de chaque holon lient les objets des vues SysML à la vue de l'architecture ADACOR. Les méta-modèles holoniques sont modélisés en utilisant les constructions spécifiques au domaine spécifiées dans le profil SysML. Les constructions définies dans le profil sont appliquées en tant que stéréotypes sur des constructions SysML génériques telles que des blocs. Cela affecte automatiquement les propriétés aux blocs, ce qui simplifie la tâche du modélisateur. En parallèle, le mécanisme de reconfiguration dans cette phase est basé sur l'architecture distribuée de SMH et la coopération des holons, pour reconfigurer le système de fabrication et faire face à la variabilité des besoins des clients tout en satisfaisant les principales caractéristiques de SMR. Pour atteindre cet objectif, le modélisateur doit inclure la sémantique des caractéristiques clés du SMR avec les profils holoniques.

En conclusion, la combinaison de profils et de méta-modèles fournit le cadre dans lequel les transformations peuvent être appliquées pour intégrer ces multiples points de vue SysML et maintenir la cohérence entre eux dans l'architecture holonique. Par conséquent, les processus de conception des systèmes de fabrication reconfigurables tirent parti des processus d'intégration utilisant le profil holonique pour gagner du temps et réduire les coûts lors de

la création de modèles exécutables à base d'agents pendant le processus de vérification par simulation. Le temps supplémentaire consacré à la mise en place de cette phase est facilement remboursé grâce à des cycles de conception plus rapides, à une maintenance simplifiée des informations de conception et à une reconfiguration efficace des systèmes antérieurs.

## 5.7 Simulation orientée agents

La simulation orientée agent s'est désormais imposée dans le paysage des solutions conceptuelles et logicielles pour l'étude de comportements de systèmes complexes. Au travers des interactions entre agents et leurs actions sur leur environnement (au sens large), les agents apportent une vision à la fois macroscopique et microscopique du système simulé. Elles peuvent également compléter et s'associer à d'autres approches de simulation afin d'agréger l'ensemble des points de vues du système étudié.

Dans cette section, nous définissons tout d'abord brièvement le terme général de « simulation », de simulation analogique et numérique, de modèle de simulation. Ensuite, nous introduisons le concept de simulation orienté agents (SOA), ses principes théoriques, les modèles de simulation, ses relations avec le temps.

## 5.8 Simulations et modèles de simulation

### 5.8.1 Méta-modèle Agent

Le méta-modèle agent identifie la structure interne d'un agent. La figure (figure 5.7) décrit cette vue en dégagant les concepts suivants :

- L'Agent modélise les agents du système. Les trois types d'Agent : Hybrid agent, Cognitive agent et Reactive agent héritent des caractéristiques de l'Agent ;
- Le Reactive agent modélise les agents du système dotés d'une réaction rapide face à un stimulus (capacités réactives) ; Le Cognitive agent modélise les agents dotés d'une intelligence lui permettant, selon la situation, d'atteindre d'une manière optimale leurs objectifs (capacités cognitives) ; L'Hybrid agent modélise les agents qui conjuguent la rapidité de réponse des Reactives agents ainsi que les capacités de raisonnement des Cognitive agents (capacités cognitives et réactives) ;
- Le concept « Goal » modélise l'objectif que l'Agent voudra atteindre. Ces Goals seront effectués suivant un ou plusieurs plans (modélisé par Plan) mis en œuvre par un ou plusieurs Agents. Chaque Plan est composé d'une ou plusieurs actions élémentaires modélisées par le concept « Action ». D'où la nécessité du concept « Capability » qui modélise la ou les capacités que l'Agent doit posséder pour mettre en œuvre des Plans ou/et pour réaliser une ou plusieurs Actions. Le concept « Reactive action » modélise l'Action élémentaire effectuée le plus souvent par Reactive agent ou Hybrid agent ;
- Le concept « Mental status » modélise les attitudes mentales composant les capacités cognitives de chaque Cognitive agent et Hybrid agent. Ce concept intègre les "croyances" de chacun de ces Agent (modélisées par le concept « Belief ») et les

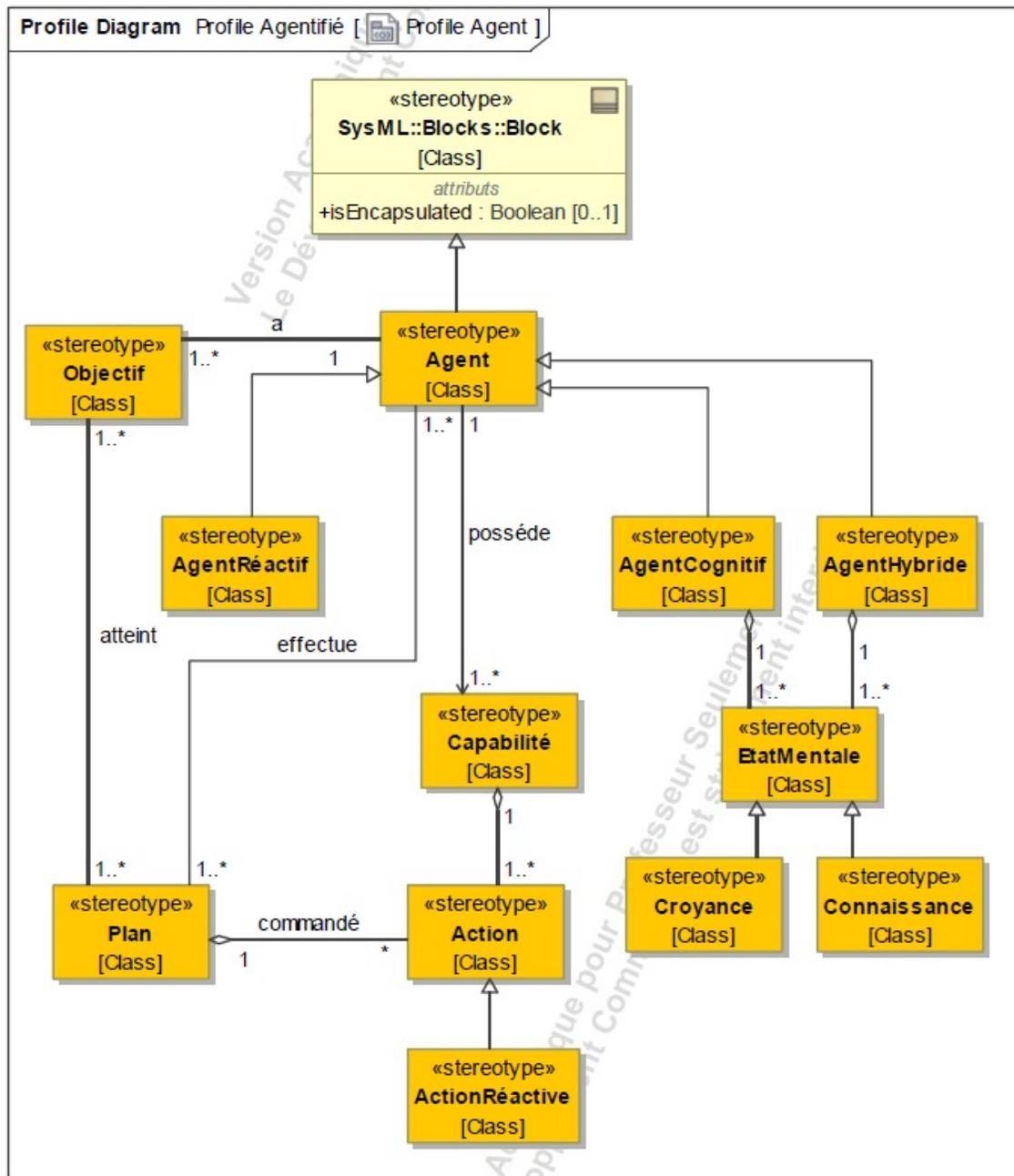


FIGURE 5.7 – Méta-modèle Agent

connaissances (modélisées par le concept « Knowledges ») nécessaires pour agir d'une manière appropriée.

Commençons par poser une première définition de la simulation; pour Bradley [1987] elle : « Signifie faire évoluer le modèle d'un système avec les entrées appropriées et observer les sorties correspondantes ». De manière plus précise, dans le cadre de notre recherche, nous avons retenu la définition de Drogoul [2008] pour qui : « la simulation est l'activité au cours de laquelle, selon un protocole et avec un objectif précis, on utilise un simulateur pour faire évoluer les entrées d'un modèle dynamique, l'exécuter, et en recueillir les sorties.

Tout modèle écrit en respectant le méta-modèle associé au simulateur et comportant au moins un paramètre d'entrée peut se prêter à ce processus de simulation ». On retrouve cette notion d'objectif dans la définition antérieure, devenue classique, proposée par **Minsky et al. [1974]** : « Pour un observateur B, un objet A\* est un modèle d'un objet A dans la mesure où B peut utiliser A\* pour répondre aux questions qu'il se pose au sujet de A ».

Nous pouvons alors retenir de ces trois définitions, qu'un modèle n'est pas apprécié par sa complexité ou sa précision de représentation du réel, mais par sa capacité à apporter des réponses aux questions posées par les scientifiques qui utiliseront ce modèle. En relation avec l'intention initiale de la simulation, l'objectif de la simulation est alors de fournir des résultats en fonctions de paramètres d'entrées contrôlés. Ces résultats, leur nature et leur métrique, participent à la définition de l'objectif des expérimentateurs. Le choix du paradigme et du langage de modélisation dépendra des connaissances du système réel disponibles.

La notion d'objectif est ainsi relativement large. Elle peut recouvrir l'usage que l'on escompte faire des résultats ou plus précisément les type d'informations que l'on recherche. Dans le premier cas, une simulation peut viser des objectifs de :

- Prédiction : estimation d'une valeur ou réponse à une observation à un choix multiple.
- Extrapolation : trouver la valeur en dehors des périmètres observés.
- Interpolation : permettre à compléter et combler la connaissance.
- Compréhension : évoluer la connaissance des phénomènes ou des processus.

Indépendamment de ces objectifs globaux, la notion d'objectif peut également plus prosaïquement caractériser le type d'informations attendues sur le comportement du système simulé en cours et en fin de simulation. En fonction de sa nature, cet objectif peut conduire à différents types de modèle et nécessiter un processus de conception particulier.

## 5.9 Principe de la simulation

La virtualisation est la base dans la conception de systèmes intelligents pour assurer la vérification des performances fiables et une conception précoce des composants nécessaires à l'étape de la conception. Notre objectif est d'augmenter la valeur informative des modèles de simulation et les propriétés du produit dérivé du modèle afin que les études complexes à des prototypes produits puissent être considérablement réduites.

Le développement des systèmes intelligents se caractérise par la coopération des différentes disciplines, ainsi que la réutilisation des solutions partielles éprouvées. Nous travaillons donc sur le développement de la technologie de conception, qui soutient explicitement la virtualisation du système à travers les différentes disciplines techniques. Au cours de la phase de conception, la détection de la solution est fourni au moyen d'un modèle de simulation idéalisée sur la base d'un modèle. Dans la phase de rédaction ultérieure en équipes parallèles de spécialistes, les composants sont développés et enrichis avec des modèles de simulation détaillés. Et une coordination interdisciplinaire assure la cohérence de l'ensemble du système.

Le prototypage virtuel fait partie intégrante du processus de création de produits d'aujourd'hui. Le prototypage virtuel signifie construire un modèle informatique d'un futur produit/système et l'analyser comme un vrai prototype. Cela permet un assemblage et un test virtuels de différentes variantes de produit sans construire un prototype réel. Il réduit le temps

et les coûts dans le développement de produits et augmente la qualité du produit/système.

Les technologies clés pour le prototypage virtuel sont la réalité virtuelle (VR), la réalité augmentée (AR) et la simulation. VR et AR sont nécessaires pour la présentation visuelle du prototype virtuel. La simulation leur donne un comportement réaliste. Selon les demandes de l'application, le traitement de l'image et la visualisation scientifique sont utilisées pour améliorer la présentation réaliste du prototype virtuel. Dans un proche avenir, il sera indiscernable du prototype réel.

Dans le deuxième et le troisième cycle du processus de création de produit/système, nous explorons comment la réalité virtuelle associée à une simulation discrète et non-discrète peut être utilisée pour la présentation et l'analyse réalistes de prototypes virtuels.

### 5.9.1 Simulation orientée objet

L'architecture holonique est composée de 4 classes qui sont considérées comme des objets :

- La classe Holon produit (HP) représente chaque produit enregistré au catalogue de l'usine et contient les informations de production.
- La classe Holon tâche (HT) représente les étapes particulières des ordres de production lancés à l'usine.
- La classe Holon opérationnel (HO) représente les ressources physiques et les opérateurs de transport disponibles dans l'usine, qui effectuent des tâches de fabrication et de manutention.
- La classe Holon superviseur (HS) est employée, qui fournit des services de coordination aux autres holons. Il est chargé de surveiller les horaires de certaines cellules ou groupes de machines, contenant des machines (opérateurs) d'attributs ou compétences similaires.

Les objets dynamiques (Hardware) dans le modèle VR peuvent communiquer avec les agents dans le module de contrôle holonique (Software) à travers les sockets TCP/IP, qui assurent le transfert de données entre plates-formes logicielles.

### 5.9.2 Systèmes multi-agents

L'Agent peut avoir des paramètres qui sont fréquemment utilisés pour représenter certaines caractéristiques de l'objet modélisé. Ils sont utiles lorsque les instances d'objet ont le même comportement décrit en classe, mais différent dans certaines valeurs de paramètre.

Il existe une nette différence entre les variables et les paramètres. Une variable représente un état de modèle et peut changer pendant la simulation. Un paramètre est couramment utilisé pour décrire les objets statiquement.

Un paramètre est normalement une constante dans une simulation unique et n'est modifié que si on veut ajuster le comportement du modèle.

L'Agent peut contenir des variables.

Les variables sont généralement utilisées pour stocker les résultats de la simulation du modèle ou pour modéliser certaines unités de données ou des caractéristiques d'objet, changeant dans le temps.

AnyLogic qui est un outil de simulation prend en charge deux types de variables : les variables et les collections (les collections sont utilisées pour définir des objets de données qui regroupent plusieurs éléments en une seule unité).

## 5.10 Processus de vérification et de validation

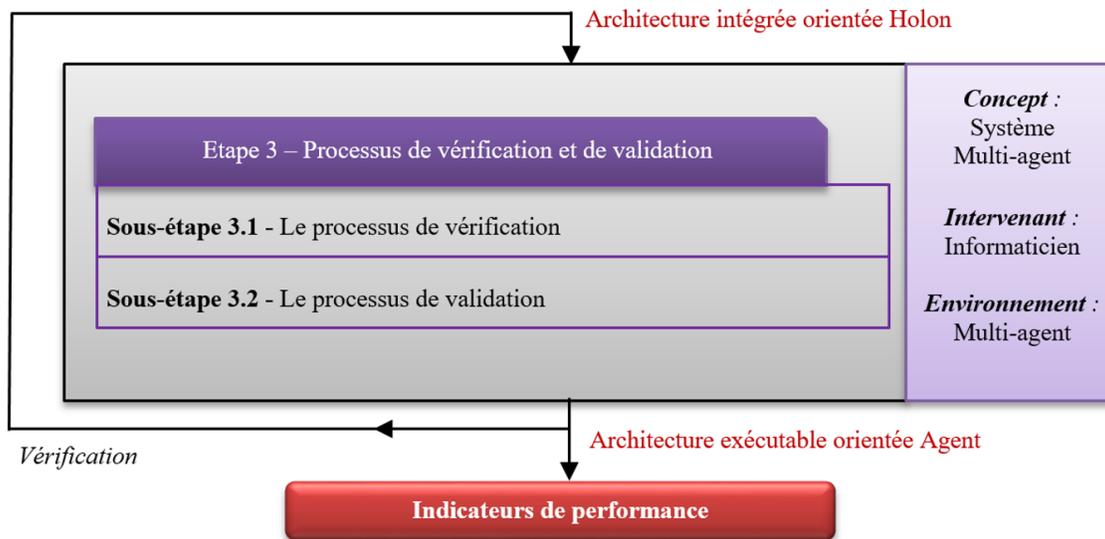


FIGURE 5.8 – Représentation du processus de vérification et de validation

La modélisation opérationnelle se termine par le processus de vérification et de validation présenté dans la figure 5.8. Ce processus est composé par les processus suivants :

1. **Processus de vérification**
2. **Processus de validation**

Dans la section suivante, nous détailleront comment élaborer l'architecture exécutable du système de pilotage d'un [SMR](#).

### 5.10.1 Élaboration de l'architecture exécutable du système de pilotage

Les artefacts utilisés sont des diagrammes de méta-modèles [SysML](#) holoniques et les artefacts générés sont des modèles exécutables basés sur un agent [SMR](#). Cette phase permet au concepteur d'établir la traçabilité des exigences entre les exigences des parties prenantes ainsi que les spécifications du système et les modèles développés.

Comme les agents logiciels peuvent être utilisés pour implémenter l'architecture de contrôle holonique, nous utilisons les [SMAs](#) pour implémenter l'architecture de contrôle holonique contenant la sémantique [SMR](#). Une autre observation, les [SMAs](#) ont une grande modularité et reconfigurabilité permettant d'augmenter la flexibilité et de réduire la complexité du système de fabrication. Une transformation un-à-un de holon à agent est effectuée, car le modélisateur a déjà organisé et administré les informations de conception dans la phase précédente. Cette traçabilité aide le modélisateur à satisfaire et à garantir les exigences d'un

**SMR** lors de l'utilisation des modèles **SysML** développés et des modèles multi-agents. La reconfigurabilité du système de fabrication est exigée dans les situations où des changements dans les besoins de production sont à prévoir. Des exemples de ces changements sont le changement de séquence de tâches, l'ajout de tâches de produit, l'ajout de nouveau produit et l'ajout de nouveau matériel. Les contraintes pour implémenter la reconfigurabilité sont le temps de développement et le temps de reconfiguration.

Dans cette phase, l'informaticien se réfère à des diagrammes de méta-modèles **SysML** qui peuvent être spécialisés pour des besoins spécifiques en fonction des paramètres de reconfiguration de fabrication. De cette manière, l'informaticien intègre les méta-modèles holoniques dans un environnement basé sur un agent afin de tester l'utilisabilité de la proposition de conception sur des cas de test d'application spécifiques.

Par conséquent, les rapports de traçabilité générés sont utilisés pour analyser les lacunes de traçabilité et évaluer comment la conception du système satisfait aux exigences du système et à la reconfigurabilité des systèmes de fabrication.

Alors, l'informaticien reçoit les méta-modèles holoniques développés dans la phase précédente afin de préparer l'élaboration de modèles multi-agents. Cette implémentation consiste à intégrer ce méta-modèle dans l'environnement **SMA**. Principalement, il traite les méta-modèles de chaque holon selon trois points de vue : structurel, comportemental et paramétrique.

En détails, les modèles mis en œuvre sont construits en trois étapes. Chaque étape est représentée par une vue spécifique avec différents niveaux de détails :

- Définition de flux qui permet la création et la définition de flux dans l'environnement basé sur l'agent en se référant au point de vue comportemental du méta-modèle holonique ;
- Définition de Holon : cette étape est basée sur le point de vue structurel et exige la définition des hiérarchies et des connexions inter/intra entre chaque holon.
- La définition des propriétés et des attributs est basée sur la vue paramétrique. En attendant, les propriétés et attributs manquants sont créés et associés au holon correspondant.

L'informaticien a utilisé ces fonctionnalités pour intégrer le méta-modèle holon dans un environnement multi-agent afin de tester la facilité d'utilisation de la proposition du modélisateur sur des cas de test spécifiques.

Ensuite, l'informaticien est capable de simuler le modèle conceptuel qui décrit les aspects pertinents de **SMR**. Dans cette sous-phase, l'évaluation des modèles de simulation à travers des indicateurs quantitatifs liés aux paramètres de production est proposée dans le tableau 5.8. La productivité, la capacité du débit, l'utilisation des ressources et la discontinuité sont les indicateurs étudiés lors de l'évaluation des modèles de simulation. Ces résultats quantitatifs permettent à l'informaticien de mesurer directement la productivité et indirectement les caractéristiques clés de **SMR**. Si les résultats de l'évaluation sont insuffisants, le modèle d'architecture doit être modifié pour mieux représenter l'architecture du système ou l'architecture du système doit être reconfigurée afin de mieux répondre aux exigences.

Cette phase améliore la traçabilité entre la description de l'architecture et sa mise en œuvre, en utilisant le concept holonique comme couche intermédiaire entre eux. Cette traçabilité est pertinente pour maintenir la cohérence entre l'architecture, la conception et la mise en œuvre des modèles du **SMR**. Les avantages sont une meilleure compréhension des pro-

Tableau 5.8 – Les critères proposés pour vérifier l’efficacité du cadre proposé

<b>Config</b>	Re/configuration Cas de test N°1	Re/configuration Cas de test N°i
<b>Critères</b>		
Productivité (rapport)	$P1 = \frac{sortie}{entrée}$	$Pi = \frac{sortie}{entrée}$
Capacité de production (%)	$C1 = \frac{sortie}{durée}$	$Ci = \frac{sortie}{durée}$
Utilisation de la ressource (%)	$Um1 = \frac{temps\ de\ production\ prévu}{temps\ total}$	$Umi = \frac{temps\ de\ production\ prévu}{temps\ total}$
Discontinuité (heures)	$D1$ = perte de disponibilité + pannes + configuration et ajustement	$Di$ = perte de disponibilité + pannes + configuration et ajustement

blèmes de conception clés, moins d’erreurs de conception et un développement plus rapide du système. Enfin, le système de modèle SMA est ré-implémenté dans le code Java.

## 5.11 Conclusion

Nous avons terminé dans ce chapitre la définition des trois sous-étapes de notre méthodologie de conception des SMRs. La première étapes était la modélisation conceptuelle. La contribution était l’intégration du concept de la reconfigurabilité durant le processus de définition du système et la génération des architectures conceptuelles orientées objet en ce basant sur un profil SysML de reconfigurabilité. Ce processus est composé par les deux processus suivants :

- le processus de définition des exigences système :
  - Processus de définition des besoins des parties prenantes.
  - Processus d’analyse des exigences.
- Le processus de conception de l’architecture :
  - Processus de conception logique (ou fonctionnelle).
  - Processus de conception physique.

Puis, nous avons présenté la modélisation opérationnelle qui est divisé sur deux processus. Le processus d’intégration qui est la deuxième étapes de notre méthodologie. Pendant cette étape, la contribution consistait à transformer les modèles SysML vers des modèles holonique intégrés et à générer une architecture orientée Holon.

Le processus de vérification et de validation est la troisième étape de notre méthodologie. La contribution dans cette étape était la génération d’une architecture orientée Agent afin de faire la simulation et d’évaluer les indicateurs de performance issus des architectures de reconfiguration générées.

Dans le chapitre suivant, nous appliquerons notre approche de conception sur un cas industriel pour valider notre méthodologie de conception.

# Chapitre 6 : Validation de l'approche proposée grâce à un système manufacturier reconfigurable de conversion d'acier

## Chapitre 6

# Validation de l'approche proposée grâce à un système manufacturier reconfigurable de conversion d'acier

*"C'est en forgeant qu'on devient  
forgeron."*

---

Expression Française

## 6.1 Introduction

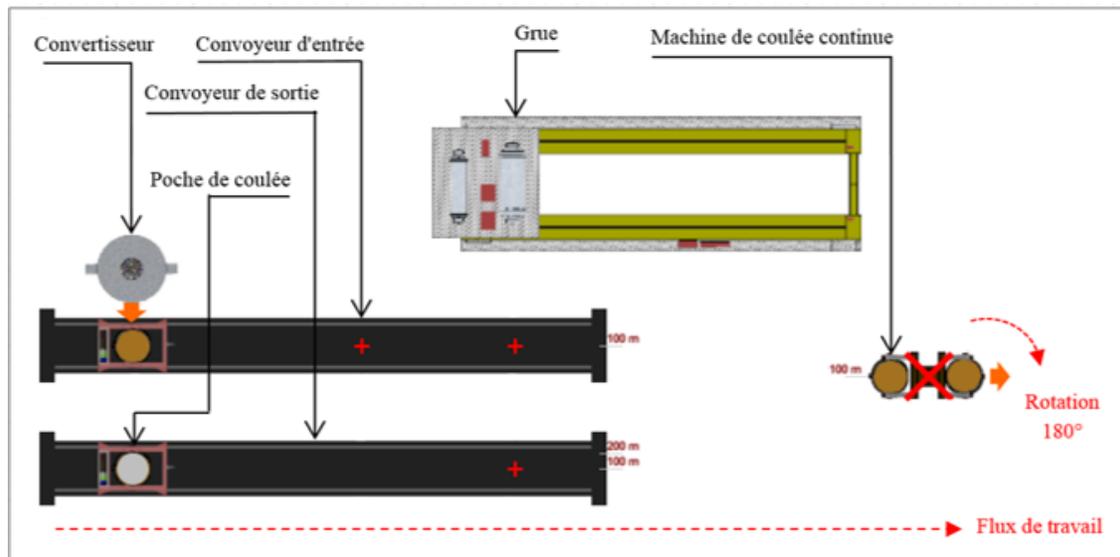


FIGURE 6.1 – Configuration du système de fabrication de conversion d'acier

De nos jours, l'augmentation de la productivité de la ligne de production est devenue une expression quotidienne dans la plupart des industries manufacturières. Dans cette thèse, nous présentons un exemple de système de fabrication industrielle qui exploite le concept de reconfigurabilité pour augmenter la productivité en suivant le cadre générique proposé. L'étude de cas considérée dans ce manuscrit est basée sur un processus de conversion de l'acier (figure 6.1). C'est un système de production manufacturier de ligne de flux dans lequel le flux de travail est une direction unique. L'inconvénient majeur de ce système de production en ligne est le manque de flexibilité pour la fabrication de produits pour lesquels ils ne sont pas conçus. Pour cette raison, le concept de système de fabrication reconfigurable permet une flexibilité non seulement dans la production d'une variété de produits, mais aussi dans le changement du système lui-même.

Par conséquent, l'accent a été mis dans ce manuscrit sur un système de fabrication de conversion d'acier pour étudier ses étapes de conception afin de mettre en œuvre une reconfigurabilité pour traiter les besoins variables des clients en se référant au cadre générique proposé. Sur la base des ordres planifiés, le processus de conversion de l'acier (figure 6.1) commence par le transport du fer fondu du haut fourneau vers le convertisseur. Le fer fondu est ajouté à la ferraille et à l'acier, ce qui abaisse la température. Les convertisseurs prennent en charge jusqu'à 350 tonnes et le convertissent en acier en 15 minutes environ. Une fois l'acier affiné et les échantillons prélevés pour vérifier la température et la composition, le convertisseur est incliné et l'acier est coulé dans une poche. Dans le processus, une poche d'acier est amenée à la machine de coulée continue par un pont roulant puis transportée par le convoyeur d'entrée. L'ensemble est soulevé par une grue sur une tourelle rotative. Cela rend la coulée de séquence possible. Avant l'opération de coulée, un tube réfractaire étanche aux gaz est monté à l'extérieur de la buse de poche. Ce dispositif empêche l'acier liquide d'absorber trop d'oxygène et d'azote de l'atmosphère. La buse de poche est ensuite ouverte,

permettant à l'acier de sortir de la poche dans le répartiteur, qui est un réservoir alimentant le moule en cuivre refroidi à l'eau de la machine de coulée à travers un autre tube étanche à un débit contrôlé. Avec seulement sa coque extérieure solidifiée, l'acier est ensuite tiré vers le bas à partir du fond du moule grâce à une disposition incurvée des rouleaux de support et des jets d'eau jusqu'à ce qu'elle émerge horizontalement comme une dalle d'acier solide de l'extrémité de refoulement de la machine. aux longueurs requises. En même temps que l'opération de coulée, la louche vide est chargée par la grue et déchargée dans le convoyeur de sortie.

Le principal défi de cette étude de cas est d'augmenter la productivité. Le [SMR](#) est reconnu aujourd'hui comme un outil nécessaire pour augmenter la productivité. L'objectif de cet exemple est de réduire les temps de cycle en minimisant les discontinuités des ressources de fabrication. Augmenter la capacité de production en tenant compte des exigences du client est un autre objectif. Pour cette raison, le concept de reconfigurabilité qui assure que ces objectifs doivent être inclus pendant le processus de conception. L'utilisation d'un modèle de simulation est un substitut à l'expérimentation d'un système de fabrication, souvent irréalisable ou peu rentable.

Par conséquent, les étapes décrites dans le cadre proposé constituent le guide pour vérifier et valider les modèles de simulation du système de fabrication du convertisseur d'acier.

## 6.2 Modélisation des systèmes de fabrication prenant en compte les principales caractéristiques d'un SMR

La modélisation conceptuelle du convertisseur d'acier consiste à décomposer et décrire les systèmes de fabrication en analysant quatre ensembles de points de vue (structurels, comportementaux, paramétriques et exigences) définis dans [SysML](#). Cette étude de cas est traitée et analysée en tenant compte les hypothèses suivantes :

- Le système de fabrication du convertisseur d'acier n'est pas encore conçu ni réalisé.
- Le client a demandé une quantité initiale de dalle d'acier (produit) et les spécifications initiales du produit.
- Le fabricant suivra notre cadre développé et le propose à son concepteur afin de simuler le processus du convertisseur d'acier.

Dans ces circonstances, le concepteur développe les modèles [SysML](#) en tenant compte du fait que les modèles seront la fondation des modèles basés sur l'agent. Dans ce cas, les modèles [SysML](#) seront développés en tenant compte du cas de la variabilité des besoins du client. Par conséquent, les résultats de la simulation doivent satisfaire les besoins du client, qui consistent à améliorer la quantité de produit. Pour expliquer, l'objectif est de simuler la productivité en mesurant les capacités de production et le temps de cycle du système de fabrication. De manière significative, les systèmes de fabrication devraient être reconfigurables afin de satisfaire le besoin d'augmentation de la productivité.

Dans cette étape de conception, certains diagrammes sont présentés pour montrer quels sont les artefacts générés. La "figure 6.2" représente le contexte du système de fabrication de convertisseurs d'acier. Ce diagramme comprend l'interconnexion entre les ressources physiques liées à l'actionnaire approprié. "Figure 6.3" montre la structure interne du [CCM](#) avec la connexion d'écoulement correspondante entre chaque partie. La "Figure 6.4" donne les

liens de dépendance entre chaque ressource physique et les exigences initiales du système de fabrication en utilisant les relations "Satisfaire" et "Dérivée". "Figure 6.5" représente le diagramme de machine d'état du CCM. Il donne la description du comportement en définissant les états et les transitions correspondants.

SysML convient mieux pour définir les relations de haut niveau qui existent entre les exigences, la structure et le comportement. Par conséquent, cette phase permet au concepteur de suivre les décisions prises en fonction des besoins définis dans SysML.

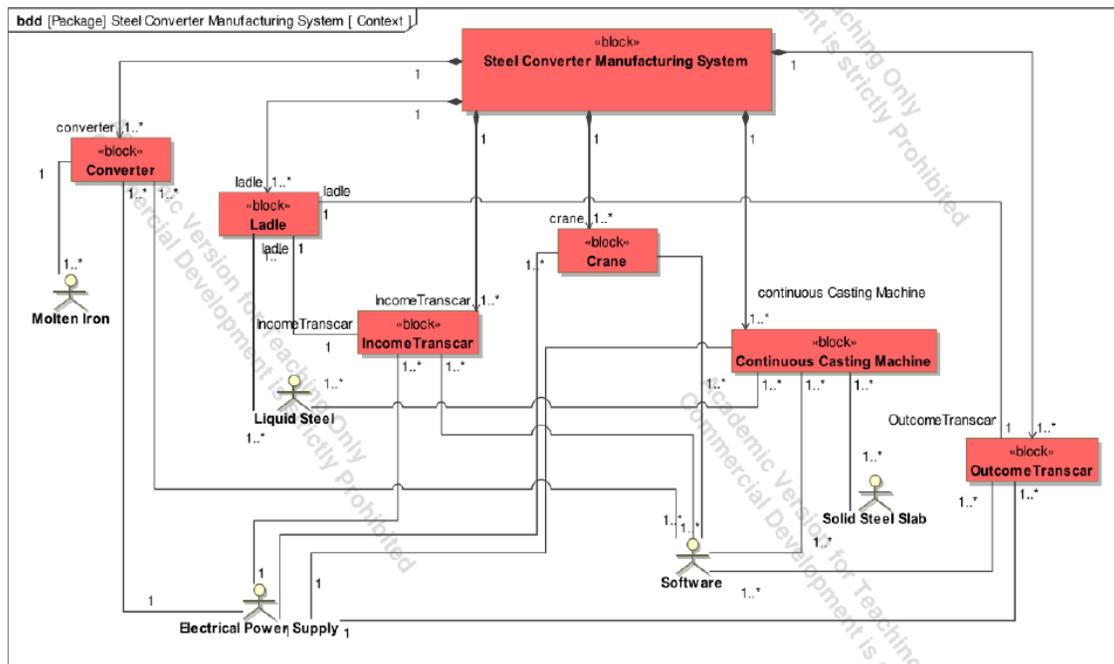


FIGURE 6.2 – Schéma du contexte du système de fabrication de conversion d'acier

### 6.3 Intégration avec l'utilisation du paradigme holonique

Guidée par le cadre proposé, la transformation entre processus de modélisation et processus de simulation constitue un guide important pour réduire la complexité technique et faciliter une spécification plus abstraite des logiciels basés sur SysML.

Par conséquent, les tables proposées pour effectuer cette transformation sont un outil essentiel pour construire les passages entre la spécification SysML et le concept holonique.

Les artefacts générés sont des diagrammes de méta-modèles SysML holoniques (figure 6.6) qui décrivent la solution de l'architecture holonique. Le but de cette phase est d'augmenter l'abstraction des modèles en considérant le profil holonique suggéré (figure 5.5). Ensuite, il permet d'ajouter des spécifications holoniques utiles pour aider le concepteur à effectuer la simulation en considérant la reconfigurabilité des systèmes de fabrication. De plus, cette phase permet au modélisateur de simplifier l'organisation et d'assurer la cohérence lors de l'application de la reconfigurabilité entre différents points de vue d'objets de systèmes de fabrication. "Figure 6.6" représente la structure holonique du système de conversion d'acier.

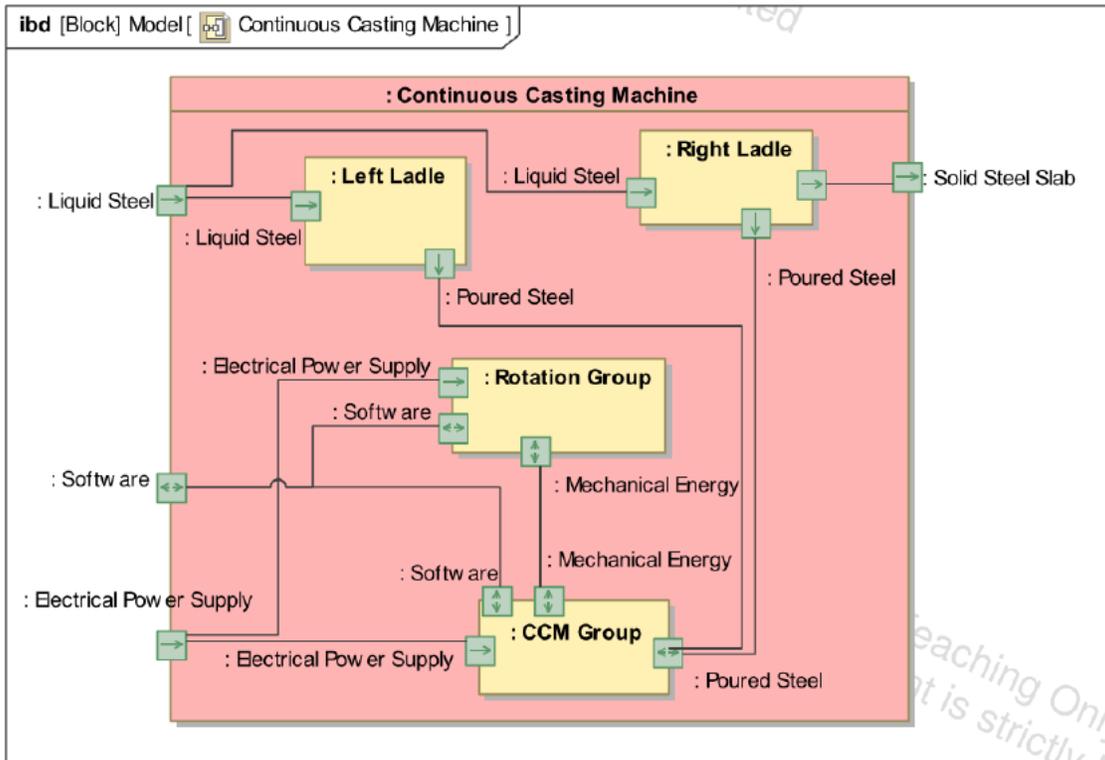


FIGURE 6.3 – Bloc de définition interne du CCM

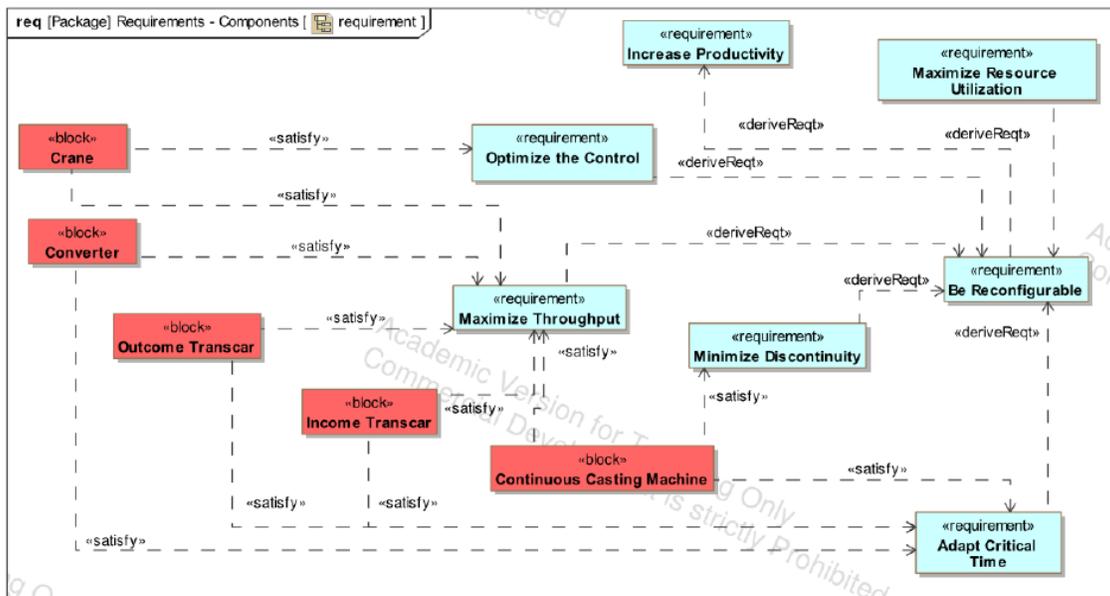


FIGURE 6.4 – Exigences pour la traçabilité des ressources physiques

## 6.4 Implémentation de l'architecture holonique dans une plate-forme basée sur les agents

Dans cette phase, une transformation d'un holon à un agent est effectuée, car le concepteur a déjà organisé et administré les informations de conception dans la phase précédente.

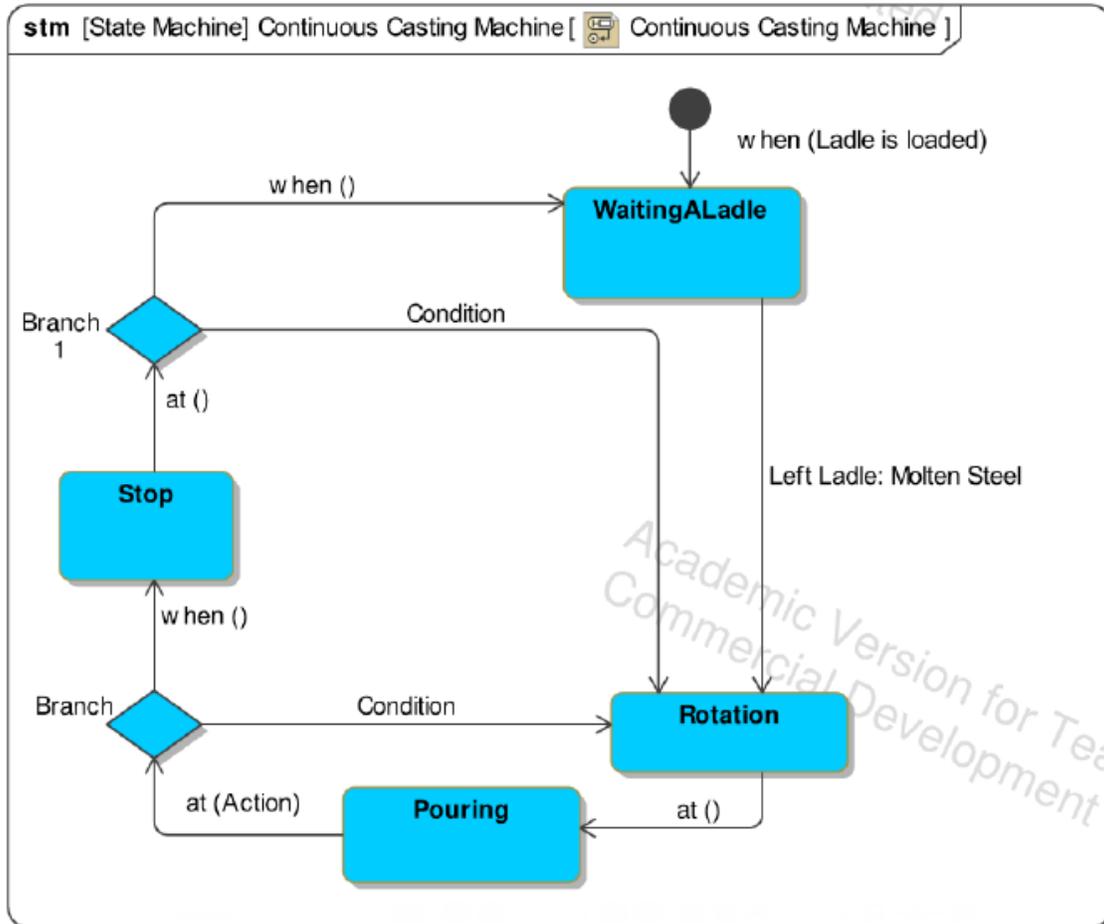


FIGURE 6.5 – États de comportement du CCM

Par conséquent, le concepteur fait référence à des diagrammes de méta-modèles SysML qui peuvent être spécialisés pour des besoins spécifiques en fonction des paramètres de reconfiguration de fabrication. Les paramètres correspondants qui sont représentés dans les tables 6.1 à 6.9 sont les entrées de chaque agent comme indiqué dans la "Figure 6.7" afin de développer un modèle basé sur un agent exécutable.

De cette façon, le concepteur intègre les méta-modèles holoniques dans l’outil de simulation choisi AnyLogic, qui est un environnement basé sur les agents. Après, le concepteur teste la cohérence de la proposition de conception sur des cas de test d’application spécifiques.

Par conséquent, les rapports de traçabilité générés sont utilisés pour analyser les lacunes de traçabilité et évaluer comment la conception du système satisfait aux exigences du système et à la reconfigurabilité des systèmes de fabrication.

## 6.5 Résultats et discussion

Le cycle de conception initiale du système de conversion d’acier est développé en utilisant le cadre proposé. Les premiers résultats de simulation présentés dans la «Figure 6.8» prouvent

Tableau 6.1 – Les paramètres de l'agent "ContCastingMachine" (CCM)

Parameter Name	Variable Name	Fonction Name
MaxHorizontalSpeed	contCastingMachine	makeFirstMove
MaxVerticalSpeed	horizontalFstCoord	setTaskParams
MaxWeight	horizontalSndCoord	
UpDownSpeed	incomeTranscar	
	Ladle	
	LoadStart	
	LoadTimeOut	
	OutcomeTranscar	
	TaskCode	
	UnloadStart	
	UnloadTimeOut	
	verticalFstCoord	
	verticalSndCoord	

Tableau 6.2 – Les paramètres de l'agent "Crane" (Grue)

Parameter Name	Variable Name	Fonction Name
MaxHorizontalSpeed	contCastingMachine	makeFirstMove
MaxVerticalSpeed	horizontalFstCoord	setTaskParams
MaxWeight	horizontalSndCoord	
UpDownSpeed	incomeTranscar	
	Ladle	
	LoadStart	
	LoadTimeOut	
	OutcomeTranscar	
	TaskCode	
	UnloadStart	
	UnloadTimeOut	
	verticalFstCoord	
	verticalSndCoord	

Tableau 6.3 – Les paramètres de l'agent "CraneController"

Parameter Name	Variable Name	Fonction Name	Collection Name
		addTask	busyCranes
		releaseCrane	freeCranes
		runTaskDistributer	tasks

Tableau 6.4 – Les paramètres de l'agent "IncomeTranscar" (Convoyeur d'entrée continue)

Parameter Name	Variable Name	Fonction Name
LinePosition	canPourout	getSteelRadius
MaxHorizontalSpeed	ladle	
GenerationTime	pouringStart	
LadleOwnWeight	pouringTime	
LadleMaxSteelWeight		
PouroutSpeed		

Tableau 6.5 – Ladle

Parameter Name	Variable Name	Fonction Name
Crane		
full		
maxSteelWeight		
ownWeight		

Tableau 6.6 – Les paramètres de l'agent "OutcomeTranscar" (Convoyeur de sortie)

Parameter Name	Variable Name	Fonction Name
LinePosition	Ladel	
MaxHorizontalSpeed	Seized	
MaxWeight		

Tableau 6.7 – Les paramètres de l'agent "Mover"

Parameter Name	Variable Name	Fonction Name
AfterMove		

Tableau 6.8 – Les paramètres de l'agent "Task"

Parameter Name	Variable Name	Fonction Name
Ladle		
Number		
Position		
TaskCode		

Tableau 6.9 – Les paramètres de l'agent "Main"

Parameter Name	Variable Name	Fonction Name
CraneSectionLength	GEOMETRIC SCALE	
IPMPosition	show3D	
IPMProcessSpeed	SPACE BETWEEN CRANES	
TranscarSectionLength	steelProduced	

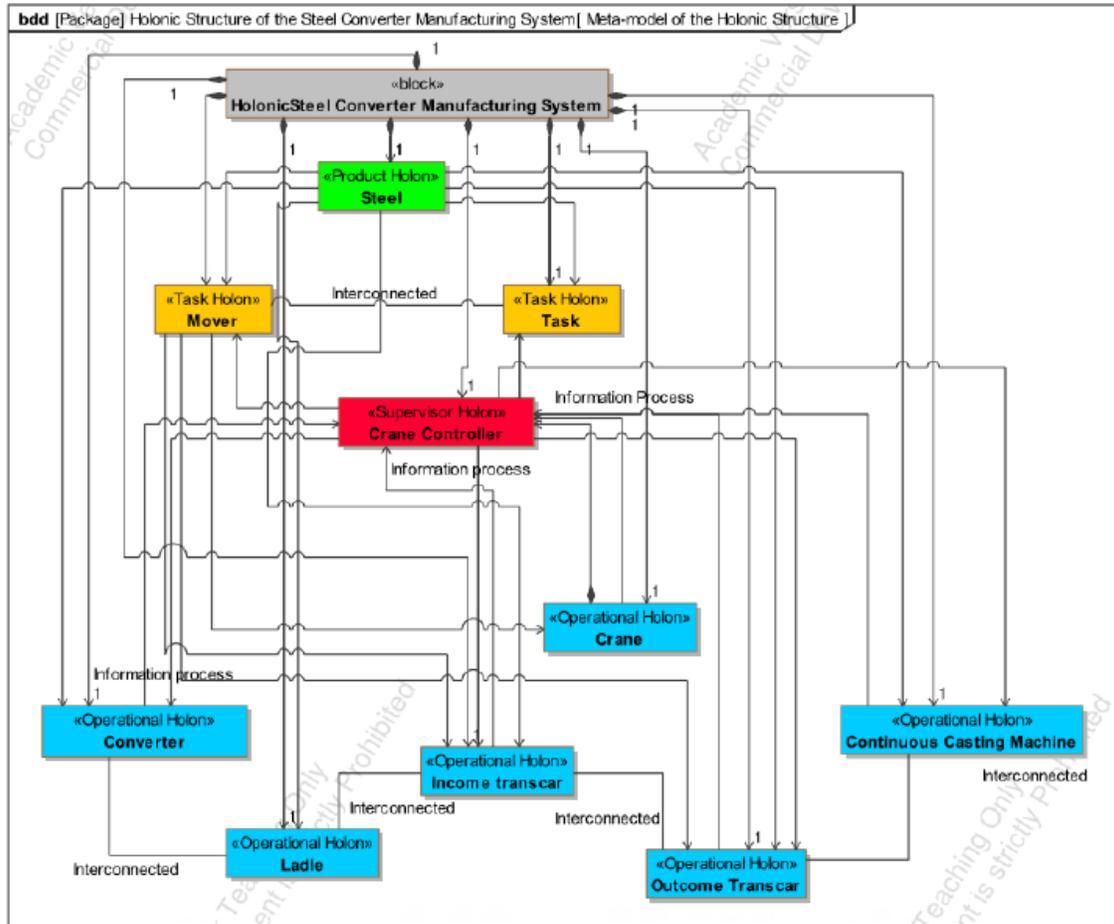


FIGURE 6.6 – Méta-modèle de la structure holonique : système de fabrication de conversion d’acier

la faisabilité des étapes proposées pour effectuer la simulation.

En ce qui concerne le concept de reconfigurabilité, le modèle basé sur les agents est utilisé pour modifier la structure du système de fabrication de l’acier et modifier les paramètres de la ressource. Le processus de vérification est basé sur l’indicateur de productivité tout en effectuant la traçabilité entre les modèles. De cette manière, le taux de discontinuité de fonctionnement de chaque ressource physique est vérifié. En outre, nous suggérons d’ajouter une ressource physique et de comparer son impact sur la productivité.

Enfin, en fonction des besoins du client, nous adaptons la structure, le comportement et la fonction du modèle de simulation en suivant les caractéristiques clés de la reconfigurabilité.

## 6.6 Conclusion

Dans le contexte d’assurer la productivité des systèmes de fabrication, un cadre efficace qui assure une approche continue et cohérente entre le processus de niveau de modélisation conceptuel et le processus de niveau de simulation du SMR est présenté.

Le cadre présenté intègre plusieurs vues qui contiennent des informations différentes,

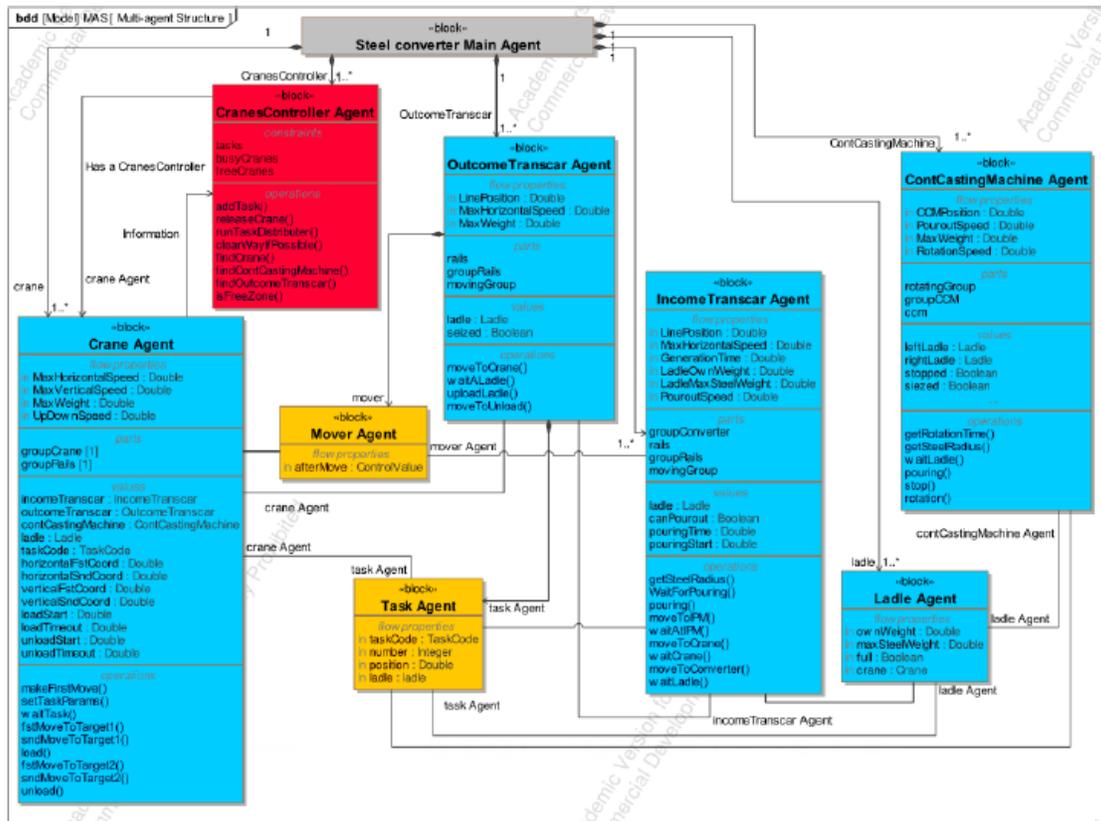


FIGURE 6.7 – La structure multi-agent du modèle exécutable

tirant ainsi parti des capacités des différents langages et domaines impliqués. Grâce à la modélisation multi-vue SysML, le concepteur est capable de générer une architecture de solution SMR. Tout aussi important, nous avons présenté la procédure de transformation pour traduire un modèle SysML conceptuel en un modèle basé sur les agents exécutables, établissant ainsi des liens de traçabilité entre les holons correspondants des modèles SysML de l'architecture SMH.

Cette transformation aide le concepteur à spécifier les méta-modèles holoniques tout en appliquant le profil holonique. Ainsi, le concepteur est capable d'intégrer les méta-modèles holoniques à un environnement basé sur un agent afin de tester l'utilisabilité de la proposition de conception basée sur des scénarios d'application reconfigurables.

Le cycle de conception initial du processus de conversion de l'acier est développé en utilisant le cadre proposé. Les résultats de la première simulation, illustrés aux figures 6.8 et 6.10, prouvent la faisabilité des étapes proposées pour effectuer la simulation. En ce qui concerne le concept de reconfigurabilité, le modèle à base d'agents est utilisé afin de modifier la structure du système de fabrication de l'acier et de modifier les paramètres de ressource. Le processus de vérification est basé sur le ratio de productivité, la capacité de production, le taux d'utilisation de la machine et le temps de discontinuité lors de la traçabilité entre les modèles. De cette manière, le taux de discontinuité des opérations de chaque ressource physique est vérifié. De plus, nous suggérons d'ajouter des ressources physiques et de comparer leur impact sur le ratio de productivité de la grue. Enfin, en fonction des besoins du client,

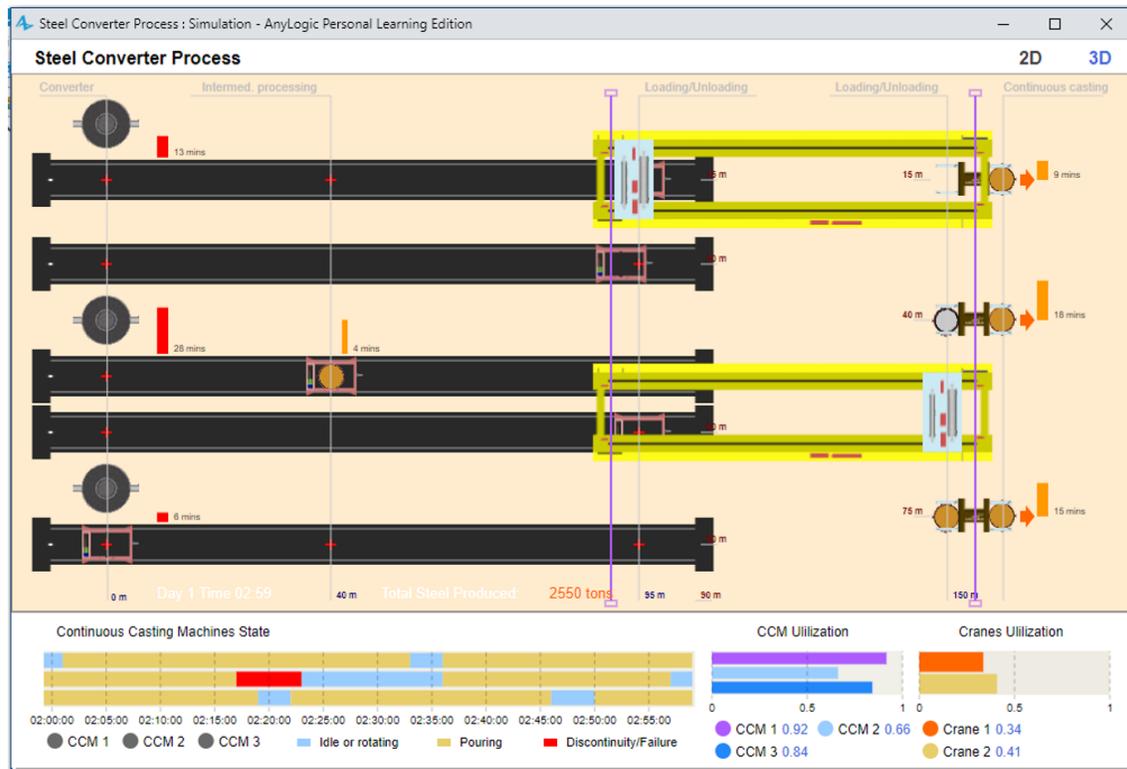


FIGURE 6.8 – Résultats de la simulation du processus de conversion d’acier

nous adaptons la structure, le comportement et la fonction du modèle de simulation en respectant les caractéristiques clés de la reconfigurabilité. Sur la base du cadre proposé, nous pouvons appliquer deux types de perturbations pouvant survenir dans le système de fabrication, à la fois externes (évolutions du marché) et intrinsèques (défaillance des ressources). Pour l’exemple d’une perturbation externe, les résultats de la simulation montrent comment le cadre proposé peut augmenter l’efficacité de la simulation du SMR après l’apparition d’une modification externe. Des cas de test d’application ont été fournis pour montrer les avantages du cadre proposé en ce qui concerne l’efficacité des phases de modélisation et de simulation. L’ingénieur système peut prendre une décision en fonction de son expertise et des résultats de la simulation obtenus pour sélectionner la configuration appropriée dotée des meilleurs indicateurs. Différents modèles peuvent être adressés à chaque cas de test de re/configuration, l’avantage dans notre cadre est qu’une simple modification du modèle d’exécution basé sur les systèmes multi-agents est effectuée, puis une mise à jour des modèles SysML sera réalisée pour l’architecture appropriée qui a les indicateurs les plus appropriés.

Alors, le cadre proposé a été appliqué avec succès pour cette étude de cas afin de fournir un cadre intégré pour la modélisation et la simulation du SMR à l’aide de différents critères proposés. L’ingénieur système peut déployer la deuxième configuration de scénario de test (6.10) car elle présente les résultats les plus appropriés en termes de taux de productivité, de capacité de production, de taux d’utilisation de la machine et de temps minimal de discontinuité.

Nous avons expliqué que le cadre générique proposé pourrait être utile pour augmenter la productivité grâce à la simulation de la reconfigurabilité. L’étude de cas du processus

Tableau 6.10 – Les résultats de la simulation des cas de test de la re/configuration

Le cas d'une perturbation externe dans le système de fabrication de la grue			
Cas de test	Re/configuration Cas de test N°1	Re/configuration Cas de test N°2	Re/configuration Cas de test N°3
Config Critères	Nombre de grue =1	Nombre de grue =2	Nombre de grue =3
Productivité (rapport)	$P1 = \frac{17580}{30000}$ = 0.586	$P2 = \frac{26070}{30000}$ = 0.869	$P3 = \frac{25140}{30000}$ = 0.838
Capacité de production (%)	$CP1 = \frac{17580}{1440}$ = 12.2	$CP2 = \frac{26070}{1440}$ = 18.1	$CP3 = \frac{25140}{1440}$ = 17.45
Utilisation de la ressource (%)	$UM1 = \frac{7}{24}$ = 0.29	$UM2 = \frac{13.7}{24}$ = 0.57	$UM3 = \frac{9}{24}$ = 0.37
Discontinuité (heures)	$D1=17$	$D2=10.3$	$D3=15$

de conversion d'acier a prouvé que ce cadre est utile pour résoudre ses problèmes majeurs comme la discontinuité de la tâche de coulée dans les CCMs.

# Conclusion générale

*“Success is not final, failure is not fatal : it is the courage to continue that counts.”*

---

Winston Churchill

Les travaux de recherche présentés dans ce manuscrit servent à contribuer à la formalisation d'une approche basée sur l'ingénierie système pour la conception d'un système manufacturier reconfigurable. Le concept de la reconfigurabilité qui représente la capacité d'un système manufacturier à changer de configuration en fonction des aléas internes et externes. De ce fait, il existe un besoin à développer des approches qui prennent en compte le concept de la reconfigurabilité des systèmes manufacturiers dans le processus de modélisation afin d'arriver à faire la simulation pour vérifier ces caractéristiques clés comme l'évolutivité.

Nous avons abordé dans ce travail de recherche trois problèmes liés à la conception des **SMRs** :

1. La modélisation d'un **SMR** pour aider le concepteur-modélisateur à intégrer la reconfigurabilité, où nous avons pu développé une approche l'ingénierie système qui génère dans une première phase des artefacts conceptuels et architecturaux en se basant sur la norme **ISO 15 288** de la démarche de l'ingénierie système et sur le langage de modélisation **SysML**. Un profil de reconfigurabilité a été conçu pour être utilisé dans la modélisation du processus de définition des besoins des parties prenantes, le processus d'analyse des exigences et le processus de conception de l'architecture. Ces sous-étapes pourront aider le concepteur-modélisateur à développer la deuxième étape du cadre méthodologique de l'approche mécatronique proposée.
2. L'intégration des modèles tout en assurant la continuité et la cohérence pendant la modélisation opérationnelle pour faire face à un changement dans un **SMR** suite à l'occurrence d'un aléa interne ou externe, où tous les modèles développés pendant la première phase de l'approche mécatronique sont intégrés et organisés en se référant au concept holonique **ADACOR**. Un profile **UML** holonique des **SMRs** à été développé pour assurer la cohérence entre les modèles **SysML** et ces éléments qui décrivent le processus opérationnel.
3. La génération des résultats par la simulation afin d'évaluer les architectures développées des **SMRs**, où nous sommes passés de la modélisation graphique en utilisant **SysML** vers une implémentation orientée-agents, en passant par la transformation des modèles **SysML** vers des modèles basés sur la technologie des **SMA**s pour établir des cas de test virtuels. Dans cette dernière étape de l'approche basée sur l'ingénierie système proposée, le concepteur peut évaluer les indicateurs de performance en utilisant son expertise pour choisir la meilleure configuration qui satisfait le maximum de caractéristiques clés de reconfigurabilité et les meilleures valeurs d'indicateurs de performances pour passer à la réalisation des **SMRs**.

Cette approche mécatronique a été validée par un exemple de système manufacturier de conversion d'acier, démontrant le concept de la reconfigurabilité et son applicabilité en suivant les différentes étapes.

Ce travail de recherche nous a permis de dégager plusieurs axes de recherches futures. Afin de rendre la prise de décision automatique aux niveaux du choix de configurations, nous envisageons d'adapter notre approche pour qu'elle intègre un mécanisme de prises de décision en créant une base de données qui contient des architectures de conception. Un autre axe de recherche consiste à inclure la conception détaillée dans l'approche proposée. Enfin, nous souhaitons approfondir la démarche de conceptions **SMR** en utilisant une formalisa-

tion mathématique qui permette d'étendre notre approche non seulement dans le domaine manufacturier, mais aussi dans d'autres domaines comme la santé.

## Bibliographie

- Aamodt, A. et E. Plaza. 1994, «Case-based reasoning : Foundational issues, methodological variations, and system approaches», *AI communications*, vol. 7, n° 1, p. 39–59.
- Abdoos, M., N. Mozayani et A. L. Bazzan. 2013, «Holonc multi-agent system for traffic signals control», *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 26, n° 5-6, p. 1575–1587.
- Abid, A., M. Barkallah, M. Hammadi, J.-Y. Choley, J. Louati, A. Rivière et M. Haddar. 2015, «Conceptual design of an intelligent welding cell using sysml and holonic paradigm», dans *Design and Modeling of Mechanical Systems-II*, Springer, p. 3–10.
- Abid, A., M. Hammadi, M. Barkallah, J.-Y. Choley, J. Louati, A. Rivière et M. Haddar. 2018, «Generic framework for holonic modelling and multi-agent based verification of reconfigurable manufacturing systems», *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, vol. 19, n° 12, p. 1793–1809.
- AFIS. 2012, «(association française d'ingénierie système)», . URL <http://www.afis.fr>.
- Aken, J. E., J. J. Berends et J. D. Bij. 2012, *Problem solving in organizations : A methodological handbook for business and management students*, Cambridge University Press.
- Alsafi, Y. et V. Vyatkin. 2010, «Ontology-based reconfiguration agent for intelligent mechatronic systems in flexible manufacturing», *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 26, n° 4, p. 381–391.
- Antonova, I. et I. Batchkova. 2008, «Development of multi-agent control systems using uml/sysml», dans *Intelligent Systems, 2008. IS'08. 4th International IEEE Conference*, vol. 1, IEEE, p. 6–26.
- Babiceanu, R. F., F. F. Chen et R. H. Sturges. 2005, «Real-time holonic scheduling of material handling operations in a dynamic manufacturing environment», *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 21, n° 4-5, p. 328–337.
- Bi, Z., S. Y. Lang, M. Verner et P. Orban. 2008, «Development of reconfigurable machines», *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 39, n° 11-12, p. 1227–1251.
- Bongaerts, L., L. Monostori, D. McFarlane et B. Kádár. 2000, «Hierarchy in distributed shop floor control», *Computers in Industry*, vol. 43, n° 2, p. 123–137.
- Booch, G. 2006, *Object oriented analysis & design with application*, Pearson Education India.
- Bousbia, S. B. H. 2006, *Proposition d'une architecture logique d'un système de pilotage hétéroarchitectural évolutif par apprentissage*, thèse de doctorat, Valenciennes.

- Bradley, D. R. 1987, «Cognitive contours and perceptual organization», dans *The perception of illusory contours*, Springer, p. 201–212.
- Bray, T., J. Paoli, C. M. Sperberg-McQueen, E. Maler et F. Yergeau. 2008, «Extensible markup language (xml) 1.0», .
- Brennan, R. W. et D. H. Norrie. 2001, «Agents, holons and function blocks : distributed intelligent control in manufacturing», *Journal of Applied Systems Studies*, vol. 2, n° 1, p. 1–19.
- Bussmann, S. 1998, «An agent-oriented architecture for holonic manufacturing control», dans *Proceedings of first international workshop on IMS, Lausanne, Switzerland*, p. 1–12.
- Bussmann, S. et D. C. McFarlane. 1999, «Rationales for holonic manufacturing control», dans *Proc. of Second Int. Workshop on Intelligent Manufacturing Systems*, p. 177–184.
- Camelo, D. M. et E. Mulet. 2010, «A multi-relational and interactive model for supporting the design process in the conceptual phase», *Automation in Construction*, vol. 19, n° 7, p. 964–974.
- Cardin, O., D. Trentesaux, A. Thomas, P. Castagna, T. Berger et H. B. El-Haouzi. 2017, «Coupling predictive scheduling and reactive control in manufacturing hybrid control architectures : state of the art and future challenges», *Journal of Intelligent Manufacturing*, vol. 28, n° 7, p. 1503–1517.
- Chalfoun, I., K. Kouiss, N. Bouton et P. Ray. 2014, «Specification of a reconfigurable and agile manufacturing system (rams)», *Int. J. Mech. Eng. Autom.*, vol. 1, n° 6, p. 387–394.
- Chalfoun, I., K. Kouiss, A.-L. Huyet, N. Bouton et P. Ray. 2013, «Proposal for a generic model dedicated to reconfigurable and agile manufacturing systems (rams)», *Procedia CIRP*, vol. 7, p. 485–490.
- Chami, M. et J.-M. Bruel. 2015, «Towards an integrated conceptual design evaluation of mechatronic systems : The sysdice approach», *Procedia Computer Science*, vol. 51, p. 650–659.
- Chen, B. et Y.-B. Xie. 2017, «A computer-assisted automatic conceptual design system for the distributed multi-disciplinary resource environment», *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C : Journal of Mechanical Engineering Science*, vol. 231, n° 6, p. 1094–1112.
- Christensen, J. H. 1994, «Holonic manufacturing systems : initial architecture and standards directions», *Proc 1st Euro Wkshp on Holonic Manufacturing Systems*.
- Chryssolouris, G. 2013, *Manufacturing systems : theory and practice*, Springer Science & Business Media.

- Cochran, D. S., G. Reinhart, J. Linck et M. Mauderer. 2000, «Decision support for manufacturing system design—combining a decomposition methodology with procedural manufacturing system design», dans *The Third world congress on intelligent manufacturing processes and systems-Cambridge, MA—June 28*, vol. 30, p. 2000.
- Comerford, R. 1994, «Mecha... what?[mechatronics]», *IEEE Spectrum*, vol. 31, n° 8, p. 46–49.
- Cutkosky, M. R., P. S. Fussell et R. Milligan Jr. 1984, «The design of a flexible machining cell for small batch production», *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 3, n° 1, p. 39–59.
- Demazeau, Y. et A. R. Costa. 1996, «Populations and organizations in open multi-agent systems», dans *Proceedings of the 1st National Symposium on Parallel and Distributed AI*, p. 1–13.
- Devalan, P. 2010, «Introduction à la mécatronique», *Techniques de l'ingénieur*.
- Dorigo, M., V. Maniezzo, A. Colorni et V. Maniezzo. 1991, «Positive feedback as a search strategy», .
- Drogoul, A. 2008, «Keynote speech : A review of the ontological status, computational foundations and methodological processes of agent-based modeling and simulation approaches : Open challenges and research perspectives», dans *Pacific Rim International Conference on Multi-Agents*, Springer, p. 1–1.
- Durfee, E. H. et V. R. Lesser. 1998, «Negotiating task decomposition and allocation using partial global planning», dans *Distributed artificial intelligence*, Elsevier, p. 229–243.
- ElMaraghy, H. A. 2005, «Flexible and reconfigurable manufacturing systems paradigms», *International journal of flexible manufacturing systems*, vol. 17, n° 4, p. 261–276.
- Estefan, J. A. et al.. 2007, «Survey of model-based systems engineering (mbse) methodologies», *IncoSE MBSE Focus Group*, vol. 25, n° 8, p. 1–12.
- Eynard, B. 1999, *Modélisation du produit et des activités de conception : contribution à la conduite et à la traçabilité du processus d'ingénierie*, thèse de doctorat, Bordeaux 1.
- Ferber, J. 1999, *Multi-agent systems : an introduction to distributed artificial intelligence*, vol. 1, Addison-Wesley Reading.
- Ferber, J., O. Gutknecht et F. Michel. 2003, «From agents to organizations : an organizational view of multi-agent systems», dans *International Workshop on Agent-Oriented Software Engineering*, Springer, p. 214–230.
- Garcia-Herreros E., P. J., Christensen J. et T. S. 1994, «Ims - holonic manufacturing systems : System components of autonomous modules and their distributed control», .
- Gero, J. S. 1990, «Design prototypes : a knowledge representation schema for design», *AI magazine*, vol. 11, n° 4, p. 26.

- Gero, J. S. et U. Kannengiesser. 2004, «The situated function–behaviour–structure framework», *Design studies*, vol. 25, n° 4, p. 373–391.
- Giret, A. et V. Botti. 2004, «Holons and agents», *Journal of Intelligent Manufacturing*, vol. 15, n° 5, doi :10.1023/B:JIMS.0000037714.56201.a3, p. 645–659, ISSN 1572-8145. URL <https://doi.org/10.1023/B:JIMS.0000037714.56201.a3>.
- Giret, A., V. Botti et S. Valero. 2005, «Mas methodology for hms», dans *International Conference on Industrial Applications of Holonic and Multi-Agent Systems*, Springer, p. 39–49.
- Gola, A. et W. Konczal. 2013, «Rms–system of the future or new trend in science?», *Advances in Science and Technology Research Journal*, vol. 7, n° 20.
- Gruber, F. E. 2013, «Industry 4.0 : a best practice project of the automotive industry», dans *Digital Product and Process Development Systems*, Springer, p. 36–40.
- Haskins, C., K. Forsberg, M. Krueger, D. Walden et D. Hamelin. 2006, «Systems engineering handbook», dans *INCOSE*.
- Holt, J. 2004, *UML for Systems Engineering : watching the wheels*, vol. 4, IET.
- Hsu, W. et I. M. Woon. 1998, «Current research in the conceptual design of mechanical products», *Computer-Aided Design*, vol. 30, n° 5, p. 377–389.
- Indriago, C., O. Cardin, O. Bellenguez-Morineau, N. Rakoto et P. Castagna. 2015, «Performance evaluation of holonic-based online scheduling for a switch arrival system», *IFAC-PapersOnLine*, vol. 48, n° 3, p. 1105–1110.
- ISO/IEC-15288, S. e. 2005, «system life cycles processes», .
- Jacques, F. 1995, «Les systèmes multi-agents, vers une intelligence collective», *InterEditions, Paris*, vol. 322.
- Jiao, J., L. Zhang et S. Pokharel. 2007, «Process platform planning for variety coordination from design to production in mass customization manufacturing», *IEEE Transactions on Engineering Management*, vol. 54, n° 1, p. 112–129.
- Kagermann, H., J. Helbig, A. Hellinger et W. Wahlster. 2013, *Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0 : Securing the future of German manufacturing industry ; final report of the Industrie 4.0 Working Group*, Forschungsunion.
- Kettner, H., J. Schmidt, H.-R. Greim et al.. 1984, *Leitfaden der systematischen Fabrikplanung*, Hanser München.
- Koestler, A. 1967, «The ghost in the machine, hutchinson & co», *Publishers) Ltd., London*.
- Koren, Y. 2005, «Reconfigurable manufacturing and beyond», dans *the summary of keynote Speech of CIRP05 3rd International Conference on Reconfigurable Manufacturing*, Ann Arbor, Michigan, USA.

- Koren, Y. 2006, «General rms characteristics. comparison with dedicated and flexible systems», dans *Reconfigurable manufacturing systems and transformable factories*, Springer, p. 27–45.
- Koren, Y. 2010, *The global manufacturing revolution : product-process-business integration and reconfigurable systems*, vol. 80, John Wiley & Sons.
- Koren, Y., U. Heisel, F. Jovane, T. Moriwaki, G. Pritschow, G. Ulsoy et H. Van Brussel. 1999, «Reconfigurable manufacturing systems», *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, vol. 48, n° 2, p. 527–540.
- Koren, Y. et M. Shpitalni. 2010, «Design of reconfigurable manufacturing systems», *Journal of manufacturing systems*, vol. 29, n° 4, p. 130–141.
- Kyura, N. et H. Oho. 1996, «Mechatronics-an industrial perspective», *IEEE/ASME transactions on mechatronics*, vol. 1, n° 1, p. 10–15.
- Le Moigne, J.-L. 1994, *La théorie du système général : théorie de la modélisation*, jeanlouis le moigne-ae mcx.
- Leitão, P. 2009, «Agent-based distributed manufacturing control : A state-of-the-art survey», *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 22, n° 7, p. 979–991.
- Leitão, P. et F. Restivo. 2003, «Towards autonomy, self-organisation and learning in holonic manufacturing», dans *International Central and Eastern European Conference on Multi-Agent Systems*, Springer, p. 544–553.
- Leitão, P. et F. Restivo. 2006, «Adacor : A holonic architecture for agile and adaptive manufacturing control», *Computers in industry*, vol. 57, n° 2, p. 121–130.
- Leitao, P. et F. J. d. p. h. . u. s. d. r. Restivo. 2008, «Implementation of a holonic control system in a flexible manufacturing system», *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, vol. 38, n° 5, p. 699–709. ADACOR, JADE, Hollonic Manufacturing, intelligent manufacturing control, Multi-agetn systems, reconfigurable automation.
- Luzeaux, D. et J.-R. Ruault. 2013, *L'ingénierie système*, Afnor.
- March, S. T. et G. F. Smith. 1995, «Design and natural science research on information technology», *Decision support systems*, vol. 15, n° 4, p. 251–266.
- Marik, V., D. McFarlane et P. Valckenaers. 2003, «Holonic and multi-agent systems for manufacturing», dans *First International Conference on Industrial Applications of Holonic and Multi-Agent Systems*, Springer.
- Mathews, J. 1995, «Organizational foundations of intelligent manufacturing systems—the holonic viewpoint», *Computer Integrated Manufacturing Systems*, vol. 8, n° 4, p. 237–243.

- Matson, J. et D. McFarlane. 1998, «Tools for assessing the responsiveness of existing production operations», .
- Maturana, F., W. Shen et D. H. Norrie. 1999, «Metamorph : an adaptive agent-based architecture for intelligent manufacturing», *International Journal of Production Research*, vol. 37, n° 10, p. 2159–2173.
- McFarlane, D. C. et S. Bussmann. 2003, «Holonc manufacturing control : rationales, developments and open issues», dans *Agent-based manufacturing*, Springer, p. 303–326.
- McGinnis, L. et V. Ustun. 2009, «A simple example of sysml-driven simulation», dans *Winter Simulation Conference*, Winter Simulation Conference, p. 1703–1710.
- Mejjaoui, S. et R. F. Babiceanu. 2014, «Holonc condition monitoring and fault-recovery system for sustainable manufacturing enterprises», dans *Service orientation in holonic and multi-agent manufacturing and robotics*, Springer, p. 31–46.
- Mhenni, F., J.-Y. Choley, O. Penas, R. Plateaux et M. Hammadi. 2014, «A sysml-based methodology for mechatronic systems architectural design», *Advanced Engineering Informatics*, vol. 28, n° 3, p. 218–231.
- Minsky, H. P. et al.. 1974, «The modeling of financial instability : An introduction», .
- Montoya-Torres, J. R. 2007, «Modélisation conceptuelle d´ une unité de fabrication micro-électronique», *Revista EIA*, , n° 7, p. 9–24.
- Morel, G., H. Panetto, M. Zaremba et F. Mayer. 2003, «Manufacturing enterprise control and management system engineering : paradigms and open issues», *Annual reviews in Control*, vol. 27, n° 2, p. 199–209.
- Normalisation, A. F. D. 1991, *Organisation et gestion de la production industrielle Concepts fondamentaux de la gestion de production vocabulaire NF X 50-310*, AFNOR, 1 vol. (69 p.) p..
- Okino, N. 1993, «Bionic manufacturing systems», dans *Conference on Flexible Manufacturing Systems, Past, Present-Future (Ed : J. Peklenik)*, Ljubljana : Faculty of Mechanical Engineering, p. 73–95.
- OMG. «Systems modeling language (omg sysml tm)», . URL <http://omg.sysml.org/>.
- OMG, O. 2012, «Systems modeling language (omg sysml)», .
- Onori, M. et J. Barata. 2009, «Evolvable production systems : mechatronic production equipment with process-based distributed control», *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 42, n° 16, p. 80–85.
- Pach, C., G. Zambrano, E. Adam, T. Berger et D. Trentesaux. 2011, «Roles-based mas applied to the control of intelligent products in fms», dans *International Conference on Industrial Applications of Holonic and Multi-Agent Systems*, Springer, p. 185–194.

- Pahl, G. et W. Beitz. 2013, *Engineering design : a systematic approach*, Springer Science & Business Media.
- Parunak, H. V. D. 1987, «Manufacturing experience with the contract net», dans *Distributed Artificial Intelligence, Volume I*, Elsevier, p. 285–310.
- Qin, J., Y. Liu et R. Grosvenor. 2016, «A categorical framework of manufacturing for industry 4.0 and beyond», *Procedia Cirp*, vol. 52, p. 173–178.
- Quintanilla, F. G., O. Cardin et P. Castagna. 2014, «Product specification for flexible workflow orchestrations in service oriented holonic manufacturing systems», dans *Service Orientation in Holonic and Multi-Agent Manufacturing and Robotics*, Springer, p. 177–193.
- R., B. et N. D. 1998, «Holonic concepts : the 'janus effect' in manufacturing», *8th Holonic Manufacturing Systems International Consortium Meeting*.
- Roos, F. 2007, *Towards a methodology for integrated design of mechatronic servo systems*, thèse de doctorat, KTH.
- Russell, M. S. 2004, «7.1. 1 assessing the impact of requirements volatility on the se process using bayesian analysis», dans *INCOSE International Symposium*, vol. 14, Wiley Online Library, p. 1385–1400.
- Russell, S., P. Norvig et A. Intelligence. 1995, «A modern approach», *Artificial Intelligence. Prentice-Hall, Egnlewood Cliffs*, vol. 25, n° 27, p. 79–80.
- Rzevski, G. 2003, «On conceptual design of intelligent mechatronic systems», *Mechatronics*, vol. 13, n° 10, p. 1029–1044.
- Saad, A., K. Kawamura et G. Biswas. 1997, «Performance evaluation of contract net-based heterarchical scheduling for flexible manufacturing systems», *Intelligent Automation & Soft Computing*, vol. 3, n° 3, p. 229–247.
- Schäfer, W. et H. Wehrheim. 2010, «Model-driven development with mechatronic uml», dans *Graph transformations and model-driven engineering*, Springer, p. 533–554.
- Shishko, R. et R. Aster. 1995, «Nasa systems engineering handbook», *NASA Special Publication*, vol. 6105.
- Simão, J. M., P. C. Stadzisz et G. Morel. 2006, «Manufacturing execution systems for customized production», *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 179, n° 1-3, p. 268–275.
- Stecke, K. E. 1983, «Formulation and solution of nonlinear integer production planning problems for flexible manufacturing systems», *Management Science*, vol. 29, n° 3, p. 273–288.
- Suda, H. 1989, «Future factory system formulated in japan», *Japanese Journal of Advanced Automation Technology*, vol. 1, n° 1, p. 15–25.

- Suh, N. P. 1995, «Designing-in of quality through axiomatic design», *IEEE Transactions on Reliability*, vol. 44, n° 2, p. 256–264.
- Suh, N. P. 1998, «Axiomatic design theory for systems», *Research in engineering design*, vol. 10, n° 4, p. 189–209.
- Suh, N. P. 2001, «Axiomatic design : Advances and applications (the oxford series on advanced manufacturing)», .
- Toën, B. 2005, «Vers une axiomatisation de la théorie des catégories supérieures», *K-theory*, vol. 34, n° 3, p. 233–263.
- Tolio, T., A. Matta et F. Jovane. 1998, «A method for performance evaluation of automated flow lines», *CIRP Annals*, vol. 47, n° 1, p. 373–376.
- Trentesaux, D., P. Pesin et C. Tahon. 2000, «Distributed artificial intelligence for fms scheduling, control and design support», *Journal of Intelligent Manufacturing*, vol. 11, n° 6, p. 573–589.
- Unsal, C. et P. K. Khosla. 2000, «Mechatronic design of a modular self-reconfiguring robotic system», dans *Robotics and Automation, 2000. Proceedings. ICRA'00. IEEE International Conference on*, vol. 2, IEEE, p. 1742–1747.
- Valckenaers, P., H. Van Brussel, J. Wyns, L. Bongaerts et P. Peeters. 1998, «Designing holonic manufacturing systems», *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 14, n° 5-6, p. 455–464.
- Van Brussel, H., J. Wyns, P. Valckenaers, L. Bongaerts et P. Peeters. 1998, «Reference architecture for holonic manufacturing systems : Prosa», *Computers in industry*, vol. 37, n° 3, p. 255–274.
- Van Oudheusden, D. 1998, *INTEGRATION OF SCHEDULING AND CONTROL IN HOLO-NIC MANUFACTURING SYSTEMS*, thèse de doctorat, KATHOLIEKE UNIVERSITEIT LEUVEN.
- Varvara, G. 2014, «On the team-based goal-oriented development for holonic manufacturing systems», dans *Service Orientation in Holonic and Multi-Agent Manufacturing and Robotics*, Springer, p. 111–126.
- Vernadat, F. 1999, «Techniques de modélisation en entreprise, applications aux processus opérationnels», .
- Wang, K. et S. Choi. 2014, «A holonic approach to flexible flow shop scheduling under stochastic processing times», *Computers & Operations Research*, vol. 43, p. 157–168.
- Weiss, G. 1999, *Multiagent systems : a modern approach to distributed artificial intelligence*, MIT press.

- Wiendahl, H.-P. et C. Heger. 2004, «Justifying changeability. a methodical approach to achieving cost effectiveness», *Journal for Manufacturing Science and Production*, vol. 6, n° 1-2, p. 33–40.
- Wiendahl, H.-P. et P. Scholtissek. 1994, «Management and control of complexity in manufacturing», *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, vol. 43, n° 2, p. 533–540.
- Wooldridge, M. 2009, *An introduction to multiagent systems*, John Wiley & Sons.
- Wu, B. 2012, *Manufacturing systems design and analysis*, Springer Science & Business Media.
- Xing, B., N. S. Tlale et G. Bright. 2009, «The application of mechatronic design approach in a reconfigurable manufacturing environment», *International journal of intelligent systems technologies and applications*, vol. 8, n° 1-4, p. 330–347.
- Xue, D., J. Sun et D. H. Norrie. 2001, «An intelligent optimal production scheduling approach using constraint-based search and agent-based collaboration», *Computers in Industry*, vol. 46, n° 2, p. 209–231.
- Youssef, A. M. et H. A. ElMaraghy. 2007, «Optimal configuration selection for reconfigurable manufacturing systems», *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, vol. 19, n° 2, p. 67–106.
- Zambrano, G., C. Pach, E. Adam, T. Berger et D. Trentesaux. 2011, «Myopic behaviour in heterarchical control of fms», dans *International Conference on Industrial Engineering and Systems Management IESM*.
- Zimmer, L. et P. Zablitz. 2001, «" global aircraft" pre-design based on constraint propagation and interval analysis», *DGLR BERICHT*, , n° 5, p. 77–86.

# Acronymes

## A

**ACH** Architecture de Contrôle Hybride

**ActD** Activity Diagram - Diagramme d'activité

**AD** Axiome de conception (Axiomatic Design)

**ADACOR** ADaptive holonic COntrol aRchitecture for distributed manufacturing systems

**ADACOR<sup>2</sup>** Version évoluée d'ADACOR

**AFIS** Association Française d'Ingénierie Système

**AFNOR** Association Française de NORmalisation

**ANSI** American National Standards Institute

## B

**BDD** Block Definition Diagram - Diagramme de définition de blocs

**BDI** Belief Desire Intention

## C

**CBR** Case-Based Reasoning

**CCM** Machine de coulée continue - Contininuous Casting Machine

**Convoyeur de sortie** OutcomeTranscar

**Convoyeur d'entrée continue** IncomeTranscar

## E

**EIA 635** Process for Engineering a System

**ERP** Entreprise Resource Planning

## F

**FIPA** Foundation for Intelligent Physical Agents

## G

**Grue** Crane

## H

**HO** Holon-Opérationnel

**HP** Holon-Produit

**HS** Holon-Superviseur

**HT** Holon-Tâche

## **I**

**IA** Intelligence Artificielle

**IBD** Internal Block Diagram - Diagramme de bloc interne

**IEEE 1 220** Standard for Application and Management of the Systems Engineering Process

**IHM** Interface Homme Machine

**INCOSE** International Council on Systems Engineering

**IngS** Ingénieur Système

**IS** Ingénierie Système

**ISO** International Organization for Standardization

**ISO 15 288** Systems engineering - System life cycle processes

## **L**

**LAN** Local Area Network

**LTD** Ligne Transfert Dédicée (Dedicated Line)

## **M**

**MBSE** Model-Based Systems Engineering

**MES** Manufacturing Execution System

**MILP** Mixed Integer Linear Programming

**MOR** Machine Outil Reconfigurable (Reconfigurable Machine Tool (RMT))

## **O**

**OMG** Object Management Group

## **P**

**ParD** Parametric Diagram - Diagramme Paramétrique

**PC** Personal Computer

**PLC** Programmable Logic Controller

**Poche de coulée** Ladle

**PqD** Package Diagram - Diagramme de packages

**PROSA** Product-Resource-Order-Staff-Architecture

## **R**

**RAMS** Reconfigurable and Agile Manufacturing Systems

**RdP** Réseaux de Petri

**ReqD** Requirement Diagram - Diagramme d'exigences

## **S**

**SADT** Structure Analysis and Design Technics

**SART** Structured Analysis with Real Time extensions

**SD** Sequence Diagram - Diagramme de séquence

**SDL** Specification and Description Language

**SMA** Système Multi-Agent

**SMD** Système Manufacturier Dédié

**SMF** Système Manufacturier Flexible (Flexible Manufacturing System (FMS))

**SMH** Système Manufacturier Holonique

**SMR** Système Manufacturier Reconfigurable

**SOA** simulation orientée agent - Agent Oriented Simulation

**SPB** Systèmes de Production Bioniques

**StmD** State Machine Diagram - Diagramme d'états

**SysML** Systems Modeling Language - Langage de modélisation des systèmes

## **U**

**UCD** Use Case Diagram - Diagramme de cas d'utilisation

**UML** Unified Modeling Language - Langage de Modélisation Unifié

## **W**

**WIP** Work In Progress

## **X**

**XML** Extensible Markup Language

**Titre :** Approche basée sur l'Ingénierie Système pour la Conception Intégrée des Systèmes Manufacturiers Reconfigurables

**Mots clés :** Systèmes manufacturiers, Reconfiguration, Ingénierie système, perturbation, Pilotage holonique

**Résumé :** Aujourd'hui, les industriels cherchent de nouvelles approches qui permettent aux concepteurs d'adapter efficacement les systèmes de fabrication face à un environnement incertain et perturbant. Le concept de la reconfiguration des systèmes de fabrication est proposé afin de trouver des solutions face à l'occurrence d'aléas au sein d'un système manufacturier complexe. Dans la littérature, l'intégration de la reconfiguration dès la phase de conception dans le cadre de l'ingénierie système en suivant une approche basée sur des normes et paradigmes commence à faire appel à plusieurs nouveaux travaux de recherche. Nous proposons une nouvelle approche basée sur l'ingénierie système pour concevoir les systèmes de production manufacturiers pour qu'ils soient reconfigurables du point de vue partie opérative et commande, en assurant la cohérence entre les modèles et en respectant les exigences de l'industrie nouvelle. Cette approche vise à guider le concepteur pour modéliser les systèmes manufacturiers en intégrant le concept de la reconfiguration dans le cadre de l'ingénierie système.

Ensuite, les modèles développés des différents points de vue sont transformés suivant des règles prédéfinies vers des modèles d'architectures holoniques qui permettent de combler l'écart entre le processus de modélisation conceptuelle et le processus de simulation. Ces modèles holoniques sont exécutable par la technologie des systèmes multi-agents afin de faciliter leurs implémentations. Après, le concepteur sera capable de vérifier et valider par simulation les critères et les caractéristiques clés de la reconfiguration dans le but d'atteindre les indicateurs demandés. Les résultats obtenus montrent une réactivité efficace aux aléas internes et externes avec la configuration la plus adéquate. Nous avons choisi un système manufacturier reconfigurable qui est le système de conversion d'acier afin d'illustrer l'utilité et la fiabilité de l'approche proposée dans différents scénarios.

**Title:** Approach based on System Engineering for Integrated Design of Reconfigurable Manufacturing Systems

**Keywords:** Manufacturing Systems, Reconfiguration, System Engineering, Disturbance, Holonic control

**Abstract:** Today, manufacturers are seeking new approaches that allow designers to effectively adapt manufacturing systems to an uncertain and disruptive environment. The concept of the reconfiguration of manufacturing systems is proposed in order to find solutions to the occurrence of disturbances within a complex manufacturing system. In the literature, integrating reconfiguration early in the design phase into system engineering by following an approach based on standards and paradigms is beginning to call for several new research studies. We propose a new approach based on system engineering to design manufacturing production systems so that they are reconfigurable from the point of view of operative and control part, ensuring coherence between models and meeting the requirements of the new industry. This approach is intended to guide the designer in modeling the manufacturing systems by integrating the concept of reconfiguration into system engineering.

Then, developed models of different viewpoint are transformed according to predefined rules into holonic architecture models that bridge the gap between the conceptual modeling process and the simulation process. These holonic models are executable by the technology of multi-agent systems to facilitate their implementations. Afterwards, the designer will be able to verify and validate by simulation the criteria and key features of the reconfiguration in order to achieve the requested indicators. The obtained results show an effective reactivity to the internal and external disturbances with the most adequate configuration. We chose a reconfigurable manufacturing system which is the steel converter system to illustrate the utility and reliability of the proposed approach in different scenarios.