



**HAL**  
open science

# Contribution à la reconfiguration des lignes de production : définition et démarche de choix de configurations alternatives.

Erica Capawa Fotsoh

## ► To cite this version:

Erica Capawa Fotsoh. Contribution à la reconfiguration des lignes de production : définition et démarche de choix de configurations alternatives.. Automatique / Robotique. Université de Nantes (UN), FRA., 2021. Français. NNT : . tel-03789836

**HAL Id: tel-03789836**

**<https://theses.hal.science/tel-03789836v1>**

Submitted on 27 Sep 2022

**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.

# THESE DE DOCTORAT DE

L'UNIVERSITE DE NANTES

ECOLE DOCTORALE N° 601

*Mathématiques et Sciences et Technologies  
de l'Information et de la Communication*

*Spécialité : Automatique, Productique et Robotique – Signal, Image,  
Vision – Télécommunications*

Par

**Erica CAPAWA FOTSOH**

**« Contribution à la reconfiguration des lignes de production :  
définition et démarche de choix de configurations alternatives »**

Thèse présentée et soutenue le 05 Octobre 2021 à L'IUT de Nantes site de Carquefou

Unité de recherche : LS2N, UMR 6004

Thèse N° :

## Rapporteurs avant soutenance :

Marija JANKOVIC  
Yves SALLEZ

Professeure, Centrale Supélec  
Professeur, Université Polytechnique Hauts de France

## Composition du Jury :

Président : Éric ZAMAI Professeur, INSA de Lyon

Examineurs : Joanna DAABOUL Maître de conférences, Université de Technologie de Compiègne  
Éric ZAMAI Professeur, INSA de Lyon

Pierre CASTAGNA Professeur émérite, Université de Nantes (Directeur de thèse)  
Pascal BERRUET Professeur, Université Bretagne Sud (Co-directeur de thèse)  
Nasser MEBARKI Professeur, Université de Nantes (Encadrant)

Invité : Francisco GAMBOA Ingénieur de recherche PhD, IRT Jules Verne (Réfèrent IRT JV)



## Remerciements

Très heureuse d’être arrivée au terme de cette belle et enrichissante expérience, je voudrais remercier toutes ces personnes qui m’ont accompagnées tout au long de cette aventure.

Tout d’abord, je remercie les professeurs Marija JANKOVIC et Yves SALLEZ, d’avoir accepté de rapporter sur ces travaux. Je remercie également le professeur Éric ZAMAI et Joanna DAABOUL, maître de conférences, d’être mes examinateurs.

Un grand merci à Pierre CASTAGNA, Pascal BERRUET, Nasser MEBARKI, mes encadrants et Francisco GAMBOA, mon référent. Merci pour votre disponibilité, vos conseils, la rigueur et surtout la confiance que vous m’avez témoignée tout au long de ces trois années. Merci aussi et surtout pour vos qualités humaines. Je suis très honorée d’avoir travaillé avec vous sur ce projet.

Je voudrais aussi témoigner ma gratitude à l’IRT (Institut de Recherche Technologique) Jules Verne pour l’opportunité du programme PERFORM. Merci à Vincent DESFONTAINE (Europe Technologies), Samuel FONTENIT (LivingPacket) et TER RENTAL d’avoir mis leurs systèmes de production à disposition comme cadre d’application pour mes travaux.

Je tiens également à remercier Olivier Cardin, Christine BOUTHET, Cécile BUCHOUD, ainsi que tous les doctorants et ingénieurs de recherche qui sont passés par « l’aquarium ». Merci d’avoir enrichi et embelli ces trois années.

A ma famille, mes amis, merci pour votre soutien infailible, votre patience et surtout votre compréhension à mon égard, dans ces moments où je me suis peut-être montrée « difficile ».

Je voudrais finir par dire toute ma reconnaissance à Celui qui fait bien au-delà de nos attentes. À lui soit la gloire !



## Table des matières

Remerciements .....	ii
Liste des tableaux .....	vii
Liste des figures .....	viii
Glossaire.....	x
<b>INTRODUCTION GENERALE.....</b>	<b>1</b>
I. Le contexte de la thèse .....	2
1. Le contexte industriel.....	2
2. Le contexte académique.....	3
II. Problématique et questions de recherche.....	4
III. Les objectifs de la thèse.....	6
IV. Méthodologie et hypothèses de recherche.....	7
1. La méthodologie DRM .....	7
2. Les hypothèses de recherche.....	9
V. Organisation du manuscrit.....	10
<b>CHAPITRE 1 : REVUE DE LA LITTERATURE ET IDENTIFICATION DES VERROUS A LEVER.....</b>	<b>12</b>
I. La place des RMS dans les systèmes de production industrielle .....	12
1. Evolution des systèmes de production industrielle.....	12
2. Agilité, flexibilité et reconfigurabilité : ressemblances et différences.....	15
II. Les caractéristiques des RMS .....	18
1. Les caractéristiques liées à la définition des objectifs des RMS .....	19
2. Les caractéristiques liées au fonctionnement des RMS .....	21
3. Les caractéristiques liées à la conception des RMS.....	23
4. Relations entre les caractéristiques des RMS .....	24
III. La définition d'une configuration dans la littérature .....	26
1. L'approche « physique » de la configuration.....	27
2. L'approche « commande » de la configuration .....	27
3. L'approche couplée de la configuration.....	28
IV. Méthodes et démarches de choix de configuration dans la littérature.....	28
V. Synthèse de l'état de l'art .....	30
VI. Contributions des travaux .....	32
<b>CHAPITRE 2 : PROPOSITION DE DEFINITION DE LA CONFIGURATION POUR LES RMS .....</b>	<b>33</b>
I. La modularité, une condition fondamentale des RMS .....	33
II. Le module, élément standard du RMS .....	34
1. Qu'est-ce qu'un module dans les RMS ?.....	35
2. Comment peut évoluer un module ? .....	38
III. Vison modulaire de la configuration pour les RMS .....	39
1. Définition et description de la configuration .....	39
2. La reconfiguration du RMS vue selon la modularité.....	43
3. Les caractéristiques de la configuration.....	44
IV. Exemple de configuration modulaire .....	46
V. Positionnement de la configuration .....	51

1.	La configuration par rapport à l'architecture .....	51
2.	La configuration par rapport à l'ordonnancement et au pilotage.....	52
VI.	L'agrégation de module : une difficulté de la modularité .....	53
	Conclusion.....	55
CHAPITRE 3 : VERS UN MODELE DE DONNEES DE REFERENCE POUR LES CONFIGURATIONS DES RMS.....		56
I.	Une base de données comme outil aidant à la gestion de connaissances.....	56
II.	Un modèle de données de référence .....	58
1.	Quelques prérequis du diagramme de classes.....	58
2.	Le <i>build-up</i> du modèle .....	60
3.	Le modèle de données de référence pour les configurations de RMS .....	66
III.	Du modèle de données de référence à une base de données de configurations.....	67
1.	Passage du modèle de données à la base de données.....	67
2.	Illustration avec le cas QLIO .....	68
3.	Test de la base de données et validation du modèle de référence.....	73
IV.	Utilisation de la base de données.....	76
	Conclusion.....	77
CHAPITRE 4 : UNE DEMARCHE DE CHOIX DE CONFIGURATION BASEE SUR LA CAPITALISATION DES DONNEES.....		78
I.	Les déclencheurs du processus de reconfiguration .....	78
1.	Les types de reconfiguration en industrie .....	78
2.	Les indicateurs de performance retardés et avancés .....	78
II.	Démarche d'aide au choix de configurations alternatives.....	80
1.	Etape 1 : Définition du besoin de reconfiguration et choix des critères de sélection ..	82
2.	Etape 2 : Recherche de solution(s).....	85
3.	Etape 3 : Etude de faisabilité .....	86
4.	Etape 4 : Implémentation .....	93
III.	Application au cas QLIO.....	93
1.	Description de la situation de reconfiguration .....	94
2.	Application de la démarche de choix.....	96
	Conclusion.....	100
CHAPITRE 5 : APPLICATION DES PROPOSITIONS AUX CAS D'ETUDE INDUSTRIELS .....		103
I.	Le cas Europe technologies-LivingPackets.....	103
1.	Contexte de l'étude .....	103
2.	Description de la situation de reconfiguration .....	105
3.	Une décomposition modulaire du système et construction de la base de données ....	106
4.	Application de la démarche de choix de configuration.....	109
5.	Conclusion du cas d'étude .....	114
II.	Le cas TER Rental .....	114
1.	Le contexte du cas d'étude.....	114
2.	Description du la situation de reconfiguration .....	115
3.	Une décomposition modulaire du système et construction de la base de données ....	117
4.	Application de la démarche de choix de configuration.....	119
5.	Conclusion du cas d'étude .....	124

Conclusion.....	124
CHAPITRE 6 : LE CAS PARTICULIER DES RMS HOLONIQUEMENT CONTROLES .....	126
I. Les systèmes de production holonique (HMS) .....	126
1. Vue d'ensemble du HMS.....	126
2. Caractéristiques du holon.....	128
3. La description de la structure interne du holon.....	130
4. Le rapprochement entre HMS et RMS et motivation de la proposition .....	132
II. Proposition d'enrichissement de la structure interne du holon.....	133
Un exemple illustratif.....	135
III. Les utilisations possibles du holon enrichi .....	136
1. Dans un contexte de reconfiguration .....	136
2. Dans un contexte d'aide au pilotage .....	137
IV. L'agrégation des données .....	138
Conclusion.....	138
CONCLUSION GENERALE .....	140
I. Rappel de la problématique.....	140
II. Discussions des propositions .....	140
1. Vision modulaire du système.....	140
2. Modèle de données de référence.....	141
3. Le démarche de choix basée sur la capitalisation .....	142
III. Les perspectives et futurs travaux .....	144
1. Vers une notion de bibliothèques de simulation .....	144
2. Vers une notion de système Expert.....	145
3. Vers la conception d'un configurateur.....	146
Liste des publications .....	148
Références .....	150

## Liste des tableaux

Tableau 1: comparaison des différents type de systèmes de production, adapté de (Bortolini, Galizia and Mora, 2018).....	14
Tableau 2: Exemple de décomposition modulaire .....	49
Tableau 3: Représentation des éléments de modélisations utilisés .....	59
Tableau 4: Une décomposition modulaire au niveau machine de Conf 7.....	71
Tableau 5: Exemple d'identification d'attributs de classe .....	72
Tableau 6: Exemples de requêtes et résultats de requêtes en utilisant la base de données .....	74
Tableau 7: Exemples de seuils à considérer pour l'évaluation .....	92
Tableau 8: Les classes et leurs valeurs.....	92
Tableau 9: Calcul des efforts de chaque action de reconfiguration .....	93
Tableau 10: Schématisation des configuration décrites dans la base de données .....	95
Tableau 11: Schématisation des configurations enrichies.....	98
Tableau 12: Schématisation des résultats de simulation des configurations enrichies .....	99
Tableau 13: Une décomposition modulaire du système.....	107
Tableau 14: Une décomposition modulaire de la ligne sur trois niveaux .....	118

## Liste des figures

Figure 1: Représentation schématique des objectifs de la thèse .....	7
Figure 2: Méthodologie de recherche DRM proposée par (Blessing and Chakrabarti, 2009).....	8
Figure 3: Méthodologie de recherche adaptée de (Blessing and Chakrabarti, 2009).....	10
Figure 4 : Plan du manuscrit .....	11
Figure 5 : Familles d'industrie en fonction de leur flexibilité.....	15
Figure 6 : Représentation de la frontière entre reconfigurabilité, flexibilité et agilité, inspiré de (Wiendahl et al., 2007) et (E Capawa Fotsch et al., 2020) .....	18
Figure 7: Classification des caractéristiques des RMS .....	19
Figure 8: Illustration des différentes stratégies de reconfiguration.....	22
Figure 9: Relation entre les différentes caractéristiques des RMS.....	25
Figure 10: (a) Digramme KIVIAT et (b) Exemples de représentation de configuration (E Capawa Fotsch et al., 2020).....	26
Figure 11: Représentation schématique d'un module et exemple de modules .....	39
Figure 12: Vision modulaire et fractale de la configuration pour les RMS .....	42
Figure 13: Différence entre deux configurations ayant les mêmes aspects physiques de modules .....	44
Figure 14: Deux configurations ayant exactement les même modules mais agrégés différemment .....	44
Figure 15: Description des éléments du produits .....	47
Figure 16: Exemple de vision modulaire d'un module du niveau machine et ses composants.....	48
Figure 17: Représentation de la ligne d'assemblage du Hall QLIO.....	49
Figure 18: Explication différence entre configuration et architecture pour un RMS.....	52
Figure 19: Diagramme de classes décrivant le module.....	62
Figure 20: Diagramme de classes décrivant la configuration comme agrégation de modules .....	63
Figure 21: Relation entre les ressources physique, les fonctions et les opérations .....	65
Figure 22: Diagramme de classes décrivant la configuration évoluant dans un contexte de production.....	65
Figure 23 : Modèle de données de référence décrivant une configuration .....	66
Figure 24 : Etapes de passage du modèle de données à la base de données .....	67
Figure 25: Une des configuration décrite dans la base de données (Conf 7) .....	69
Figure 26: Exemple de formalisme de codification des éléments.....	72
Figure 27: Schéma d'utilisation possible de la BD de configurations.....	77
Figure 28: SADT parent A-0 de la démarche de choix.....	81
Figure 29: SADT A0 décrivant la démarche.....	81
Figure 30 : Les configurations candidates, envisageables et le front de Pareto pour deux critères .....	84
Figure 31: SADT A2 décrivant l'étape de recherché de solution(s).....	86
Figure 32: SADT A3 décrivant l'étape d'étude de faisabilité.....	87
Figure 33: Exemple de représentation de l'effort de conversion suivant deux axes d'évaluation (dimension2).....	89
Figure 34: Les classes et seuils pour l'évaluation des efforts .....	91
Figure 35: Résultats de la requête relative au premier critère.....	97
Figure 36: Résultats de la requête relative au second critère .....	97

Figure 37: Process Flow de la démarche de choix de configurations .....	102
Figure 38: Le produit "The Box" .....	104
Figure 39: Une image 360° de la ligne pilote.....	104
Figure 40: Une capture d'écran du modèle de simulation de la ligne pilote.....	109
Figure 41: (a) Toutes les configurations candidates (b) Configurations candidates avec les contraintes de conception .....	111
Figure 42: Résultats de la requête pour le second critère.....	112
Figure 43 exemple de modélisation du poste de travail et d'assemblage de postes de travail.....	112
Figure 44 : Exemple de modélisation d'un poste de travail et de son comportement.....	113
Figure 45: Exemple de conteneur industrie.....	115
Figure 46: Une capture d'écran du modèle de simulation de la ligne de traitement des conteneurs .....	116
Figure 47: Résultat de la requête pour le premier critère .....	120
Figure 48: Résultat de la requête pour le second critère .....	121
Figure 49: Capacité de production journalière par les opérateurs de chaque configuration .....	123
Figure 50 : Les principaux holons dans PROSA (Van Brussel et al., 1998) .....	127
Figure 51 : Les holons d'ADACOR (adapté de (Leitao and Restivo, 2003)).....	128
Figure 52 : Représentation du holon et de l'holarchie .....	129
Figure 53: Structure interne du holon telle que décrite par (Kruger and Basson, 2017) .....	130
Figure 54: Proposition de la structure interne du holon enrichi .....	134
Figure 55 : Exemple illustratif du holon enrichi (tiré de (Capawa Fotsloh et al., 2021)) .....	135
Figure 56: Illustration de l'agrégation avec les holons .....	139
Figure 57: Utilisation du Système Expert dans le choix de nouvelle configuration, inspiré de (Tan et al., 2016) et (Leo Kumar, 2019).....	146

## Glossaire

ADACOR: ADAPtive holonic Control aRchitecture

CAF: Clear A fraction

CMS: Changeable Manufacturing System

DMS: Dedicated Manufacturing System

DRM: Design Research Methodology

FCFS: First Come First Served first

FFMS: Focused Flexible Manufacturing System

FIFO: First In First Out

FMS: Flexible Manufacturing System

HMS: Holonic Manufacturing System

IDEF: Integration Definition for Function Modeling

KPI: Key Performance Indicator

OF : Ordre de Fabrication

PROSA: Product Resource Order Staff Architecture

RMS: Reconfigurable Manufacturing System

SADT: Structured Analysis and Design Technique

UML :Unified Modeling Language

## INTRODUCTION GENERALE

Le 16 Mars 2020, la décision d'un confinement au niveau national en France est annoncée et dès le lendemain, tout est fermé. Le pays fait face à un arrêt soudain d'activités, et plusieurs secteurs sont concernés. Ce qui était au départ une crise sanitaire, s'est retrouvé avoir des répercussions sur de nombreux secteurs d'activités, notamment l'industrie. Les responsables d'entreprises n'ont alors que très peu de temps pour décider de la stratégie à adopter pour survivre à cette menace inattendue et soudaine qu'est la COVID-19. Au cœur de la menace, on a vu des lignes d'assemblage automobiles se transformer en ligne de fabrication de respirateurs, des lignes de conditionnement de produits de beauté devenir des lignes de conditionnement de gels hydroalcooliques, ou encore des industries de textile transformer leurs lignes de production pour fabriquer des masques. Seulement, très peu d'industries ont pu suivre cette tendance de reconfiguration de leur système de production. Face à la baisse drastique de leurs activités, et par manque de moyens, de possibilité ou d'habileté à la reconfiguration, plusieurs ont dû déposer le bilan.

Les découvertes scientifiques ont permis d'élaborer un vaccin contre le virus. Ce vaccin nécessite un stockage bien particulier dans ce qu'on appelle de « super congélateurs ». En France, l'une des rares usines qui fabrique ces « supers congélateurs » s'est retrouvée submergée par l'assaut des commandes venant de France et d'Europe. A l'inverse du scénario précédent, l'entreprise doit faire face à l'augmentation drastique et inattendue de la demande. Leur système de production ne permet pas de couvrir cette demande sans cesse grandissante. Il faut alors trouver des solutions aux possibilités de reconfiguration du système de production.

Nous avons ici deux exemples récents qui illustrent et mettent la lumière sur des difficultés auxquelles font face les systèmes de production. Le challenge pour ces systèmes de production est de s'adapter à de nombreuses contraintes tout en restant compétitifs. Plus encore lorsque le système doit pouvoir faire face à des situations imprévisibles telles que la COVID-19. Bien qu'étant un triste épisode de notre existence, ceci nous interpelle *à nouveau* sur la nécessité et l'urgence d'adopter des systèmes de production capables de relever le défi de la reconfiguration. Cependant, il ne s'agit pas simplement d'avoir un système de production reconfigurable, il faut surtout *et c'est le plus important*, pouvoir le reconfigurer comme il le faut et au moment où il le faut afin de

surmonter d'éventuelles incertitudes du contexte de production et rester compétitifs. C'est ici même le cœur des travaux de cette thèse.

## I. Le contexte de la thèse

Cette thèse s'inscrit dans le cadre du programme PERFORM<sup>1</sup> de l'IRT JV<sup>2</sup>, en collaboration avec les laboratoires LS2N (Laboratoire de Sciences et du Numériques de Nantes) et Lab-STICC (Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Information, de la Communication et de la Connaissance).

### 1. Le contexte industriel

L'IRT JV est un centre de recherche industriel mutualisé dédié au manufacturing. L'une de ses missions est de faciliter le transfert technologique vers les usines, au travers de la recherche collaborative entre les acteurs industriels et les laboratoires académiques de recherches entre autres. Ses thématiques de recherches concernent : les procédés de formage et de préformage, les technologies d'assemblage et de soudage, les procédés de fabrication additive, la mobilité dans l'espace industriel, et la flexibilité de la production. Quatre (04) filières industrielles stratégiques sont concernées par l'activité de l'IRT JV. Il s'agit de l'aéronautique, l'automobile, les énergie marine renouvelable et la filière navale. De plus, l'IRT JV est en étroite collaboration avec les fabricants de moyens de production et les intégrateurs.

Afin de proposer des solutions de pointes à ses membres, l'IRT JV focalise sa recherche sur des sujets appelant à des débouchés et proposant des innovations de ruptures. Pour cela, il s'appuie entre autre sur la recherche fondamentale (avec les académiques) en lien avec ses thématiques de recherche. C'est dans ce cadre que le programme de thèse PERFORM a vu le jour. Il s'agit d'un programme de thèses visant à développer la recherche amont dans le domaine du manufacturing. Les sujets des thèses sont co-définis par l'IRT et ses partenaires académiques et industriels. Ces sujets naissent à la fois des besoins exprimés par les industriels, et des verrous scientifiques

---

<sup>1</sup> PERFORM : ProgrammE de Recherche FONdamentale et de Ressourcement sur le Manufacturing

<sup>2</sup> IRT JV : Institut de Recherche Technologique Jules Verne

identifiés par les académiques. Les thèses du programme PERFROM se situent donc à mi-chemin entre la recherche académique (fondamentale) et la recherche industrielle.

Cette thèse concerne la thématique de la flexibilité de la production. Elle fait suite aux travaux développés au sein du projet STAR<sup>3</sup> de l'IRT JV par Khaled LAMECHE (Lameche 2018), qui a permis de développer un nouveau concept de système logistique et une méthodologie de reconfiguration d'un atelier de production.

## 2. Le contexte académique

Les partenaires académiques impliqués sur cette thèse sont le LS2N et le Lab-STICC.

Du côté LS2N, la thèse est rattachée à l'équipe PSI (pilotage de système industriel). L'objectif de l'équipe est de pouvoir proposer des outils d'organisation qui permettent de garantir un pilotage adapté aux contraintes du système et aux objectifs à atteindre. L'un des outils très utilisé par l'équipe est la simulation des flux de l'échelle du poste de travail à la chaîne logistique. L'objectif étant de pouvoir fournir des résultats novateurs sur le plan technologique et de faire progresser les outils théoriques.

Du côté Lab-STICC, la thèse est rattachée à l'équipe FHOOX (Facteur humains, organisationnels et automatique dans les systèmes complexes). Cette équipe pluridisciplinaire à la coopération homme – système. Elle intègre notamment des recherches en SED reconfigurables, pilotage de système de production reconfigurable et du contrôle/commande. Les objectifs des travaux de l'équipe portent sur la productivité et l'efficacité de la conception en s'appuyant sur des méthodes de modélisation, d'estimation, d'optimisation, de transformation et de prise de décision. Les plateformes cibles sont entre autres les systèmes de production reconfigurables, les défis étant l'adaptation à des environnements incertains.

---

<sup>3</sup> <https://www.irt-jules-verne.fr/projets/systeme-transitique-agile-robotise/>

## II. Problématique et questions de recherche

L'évolution du marché et des besoins clients introduisent des variations dans les systèmes de production. Il peut s'agir de procédés de fabrication, de la matière première, de l'évolution de l'outillage, ou encore l'évolution des compétences de la main d'œuvre. De plus le cadre législatif dans lequel se situe le système peut lui aussi évoluer, entraînant des répercussions sur le système de production. Avec le BREXIT<sup>4</sup> par exemple de nombreux contrats notamment industriels ont été renégociés, entraînant des perturbations dans les systèmes de production : changement de fournisseurs ou de sous-traitants, baisse voire annulation de certaines commandes. Dans un contexte où la concurrence est de plus en plus accrue, les systèmes de production doivent pouvoir s'adapter à ces évolutions, afin de produire ce qu'il faut au moment où il le faut, tout en étant rentables et compétitifs. De nombreuses solutions existent pour pallier à ce problème, parmi lesquelles les systèmes de production reconfigurables, objets de cette thèse.

La reconfiguration consiste à passer d'une *configuration* à une autre à un moment donné pour répondre aux besoins ou nouvelles contraintes qui se présentent. Cela nécessite une connaissance approfondie du système et une définition claire de la notion de *configuration*. Plus le système est complexe, plus il est difficile de couvrir cette tâche, en raison des nombreux paramètres : l'aspect physique du système doit être pris en compte, ainsi que l'aspect logique de contrôle (Koren et al. 1999) et les performances (date d'échéance, coût, critères environnementaux, etc.). Ces différentes considérations sont nécessaires dans la description de la *configuration* car elles donnent des informations utiles à une prise de décision sur le système. Elles doivent être prises en compte simultanément, c'est-à-dire que la définition et la description de la *configuration* doit impliquer formellement et simultanément les éléments mentionnés précédemment (physiques, logiques, performances, etc.). Il est donc fondamental d'avoir une définition formelle et globale de la configuration incluant à la fois la description physique, logique et des performances (KPIs) associés, ce qui n'est pas toujours le cas. On a par exemple (Mohammad Reza Abdi and Labib 2003), (Saxena and Jain 2012) qui considèrent la *configuration* selon son aspect physique

---

<sup>4</sup> Le Brexit fait référence au retrait du Royaume-Uni de l'Union européenne et de la Communauté européenne de l'énergie atomique <https://brexit.gouv.fr/sites/brexit/>

uniquement ou encore (Kanso, Berruet, and Philippe 2010) qui mettent principalement l'accent sur la logique de contrôle.

De plus, les échanges avec les industriels impliqués sur cette thèse ont révélé que, les considérations accordées à la *configuration* changent non seulement d'une personne à l'autre, mais aussi d'une entreprise à l'autre, ou encore d'un secteur d'activité à l'autre. Puisque chacun a une idée particulière de la *configuration* de son système, le processus de reconfiguration devient singulier et difficilement reproductible. Il est certes vrai que dans le milieu industriel, les systèmes de production varient d'une compagnie à une autre, et chacun des systèmes a ses spécificités. Toutefois, les RMS (Reconfigurable Manufacturing System) partagent une particularité commune : ils sont conçus dès le départ avec la capacité de pouvoir être adaptés en fonction des variations dans l'environnement et la demande (Koren et al. 1999). Ainsi, il nous paraît important, au-delà des spécificités de chaque entreprise, d'identifier des principes, des définitions, des méthodes, voir des outils communs à tous les RMS.

Très souvent lorsque se pose une situation de reconfiguration, le système a peu de temps pour réagir. Le manque de formalisme concernant la notion de *configuration*, amène l'acteur de reconfiguration (par exemple le responsable de la ligne) à la voir sous un certain angle et à conduire la reconfiguration selon une perspective subjective. Si l'acteur de reconfiguration change (changement du responsable de la ligne par exemple), la considération donnée à la *configuration* elle aussi change, ce qui a une influence sur les méthodes de choix de *configurations*. La durée de vie d'un RMS est souvent de plusieurs années. Les acteurs humains autour de ce RMS peuvent changer au cours de cette vie, entraînant la perte d'une partie de l'expertise ayant conduit à la mise en place de ce RMS.

Or, une organisation efficace voudrait que les connaissances et les données soient capitalisées et gérées de manière à être réutilisées. L'entreprise veut pouvoir, devant une situation de reconfiguration, réutiliser les données et les méthodes qui ont autrefois servi. Pour cela, il est important que celles-ci soient stockées et conservées. Dans le cas de la reconfiguration, il s'agit par exemple d'avoir un historique des *configurations* du système, ou encore une sauvegarde des avis des experts. De manière générale, il s'agit de pouvoir capitaliser sur les données du système. Pour cela, il est nécessaire d'avoir une base commune sur ce qu'on entend par *configuration* pour

les RMS. La notion doit pouvoir être clairement définie et décrite, et les paramètres qui la caractérisent et permettant son évolution, identifiés.

Ainsi, les questions de recherche que cette thèse cherche à résoudre sont les suivantes : comment définir et caractériser la configuration pour les systèmes de production reconfigurables ? Devant un changement du contexte de production, comment choisir la configuration la plus adaptée, en capitalisant sur les données du système ?

### III. Les objectifs de la thèse

Afin de choisir une *configuration* qui convient le mieux à une situation donnée, il est primordial de savoir d'une part ce qu'est une *configuration* et d'autre part les paramètres qui permettent de la faire évoluer pour une reconfiguration. Ne possédant pas de formalisme pour décrire et caractériser une configuration, définir une démarche de reconfiguration peut être difficile à mettre sur pied. Cette thèse vise donc un double objectif.

- (i) D'abord, il s'agit, de définir formellement une *configuration* pour les systèmes de production reconfigurables. Ceci induit entre autres de pouvoir caractériser une *configuration*, de la décrire fidèlement, et déterminer les paramètres qui permettent de la faire évoluer.
- (ii) En nous appuyant sur le premier point, il s'agira ensuite de proposer une démarche de choix de *configuration* qui permette de capitaliser sur les données du système, afin d'alléger le processus de choix de *configuration* qui convient à un nouveau contexte de production. Ceci dans le but de s'assurer de la réutilisation des données (de la connaissance) du système et d'assurer un suivi et une répétabilité du processus de reconfiguration.

Plus concrètement, les travaux de cette thèse visent à proposer un modèle de données de référence permettant de décrire et caractériser les *configurations* d'un système de production reconfigurable. La base de données issue de ce modèle servira à stocker les données relatives aux différentes *configurations* du système. Cette base de données dite de configurations sera par la suite utilisée

dans le processus de reconfiguration, comme outils d'aide au choix de configurations (voir Figure 1).

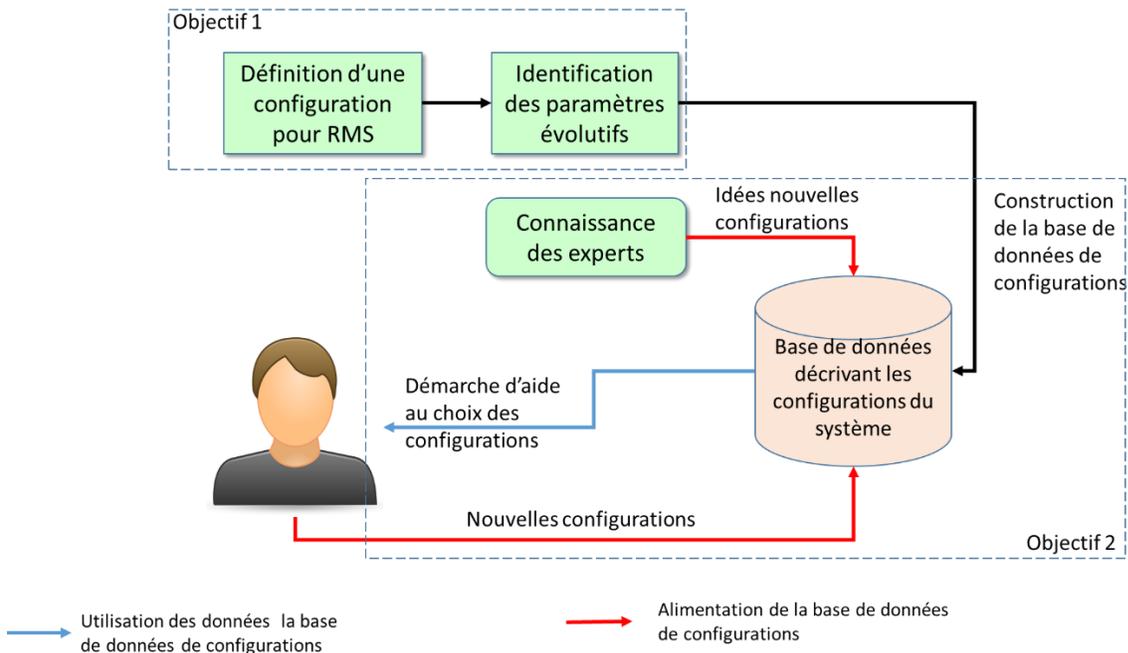


Figure 1: Représentation schématique des objectifs de la thèse

## IV. Méthodologie et hypothèses de recherche

### 1. La méthodologie DRM

Pour mener à bien les travaux de cette thèse, nous allons nous aider de la méthodologie de recherche proposée par (Blessing and Chakrabarti 2009). Dans cette méthodologie, Blessing et Chakrabarti proposent quatre étapes à suivre pour conduire un projet de recherche (Figure 2).

- Clarification de la recherche (*Research clarification RC*). Cette étape consiste à analyser la situation courante, et à définir les objectifs à atteindre pour l'améliorer. C'est à dire identifier les raisons d'être du projet, ainsi que les objectifs de celui-ci.

- Etude descriptive I (*descriptive study DS I*). Il s'agit ici d'analyser la situation courante, et de déterminer les facteurs sur lesquels agir pour la faire évoluer. On peut soit s'appuyer sur sa connaissance du domaine, soit une analyse de littérature, soit des questionnaires, ou tout autre outil. L'objectif est d'identifier des leviers qui vont conduire à des propositions afin de répondre aux besoins du projet.
- Etude prescriptive (*Prescriptive study PS*). L'étude prescriptive consiste à développer des propositions visant à répondre aux objectifs identifiés. Les chercheurs font varier les facteurs identifiés et retiennent le meilleur scénario c'est-à-dire la proposition qui sied le plus aux problèmes identifiés. Ces propositions sont faites sous réserve des hypothèses préalablement énoncées.
- Etude descriptive II (*descriptive study DS II*). Cette deuxième étude descriptive consiste à analyser l'impact des propositions faites, soit par des cas d'études, soit des questionnaires, ou tout autre moyen permettant d'effectuer cette analyse. Cette étude peut amener à reconsidérer les hypothèses, améliorer les propositions ou encore changer les facteurs sur lesquels agir. C'est l'étape d'évaluation, où les objectifs réellement atteints sont comparés avec ceux fixés.

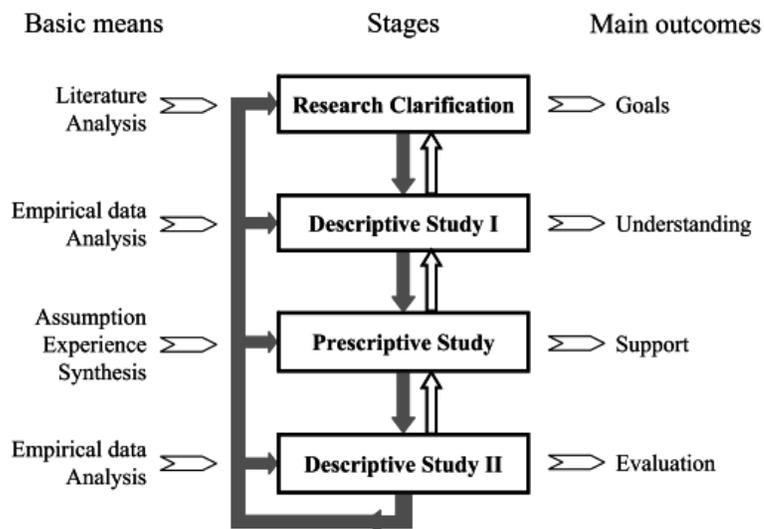


Figure 2: Méthodologie de recherche DRM proposée par (Blessing and Chakrabarti 2009)

La problématique ainsi que les objectifs des travaux de cette thèse qui constituent la clarification de la recherche sont donnés dans les sections précédentes. Dans la suite, une analyse de la bibliographie sera conduite, dans le but d'identifier les facteurs qui influencent la définition de la configuration. L'un des objectifs étant de parvenir à un formalisme de définition de la configuration, nous allons baser nos réflexions sur les nombreux travaux déjà existants. Pour ce qui est de la capitalisation des données, nous proposons d'utiliser une base de données, issue du modèle de référence que nous proposons. Ce modèle s'appuiera sur le formalisme de la configuration issue de la réponse au premier objectif. L'utilisation de la base de données, permettra ainsi de stocker de manière structurée les données pour assurer leur réutilisation et donc leur capitalisation. L'intérêt étant de pouvoir compléter le capital de connaissance de l'entreprise et participer ainsi à la gestion de la connaissance (knowledge management) en entreprise (Dieng-Kuntz et al. 2020).

Ces propositions sont déployées et testées sur un cas d'étude illustratif puis avec deux cas d'étude industriel. Nous sommes ici au cœur de l'étude descriptive II. L'idée étant d'étudier la faisabilité et évaluer la mise en œuvre des propositions dans des contextes réels, avec de véritables contraintes industrielles. Des pistes d'amélioration ainsi que des ouvertures possibles ont ainsi pu être identifiées.

La déclinaison de cette méthodologie dans le cadre de cette thèse peut être représentée par la Figure 3. Pour chaque étape, nous avons représenté les grandes lignes correspondantes. Ces grandes lignes constituent l'ossature des réflexions, et seront déroulées pas à pas dans la suite du manuscrit.

## 2. Les hypothèses de recherche

Les hypothèses que nous allons admettre sont les suivantes :

**Hypothèse 1 : Le système modulaire.** La modularité du système est au centre des propositions faites dans le cadre de ces travaux. Pour cela, les systèmes de production reconfigurables sujets de notre étude sont essentiellement modulaires.

**Hypothèse 2 : La reconfiguration se fait hors ligne (arrêt du système).** Dans la littérature, il existe plusieurs types de reconfiguration, qui peuvent être conduites soit dynamiquement (sans

arrêt du système), soit avec arrêt du système (Kanso and Berruet 2010). Dans le cadre de cette thèse, nous nous situons dans le second cas. La reconfiguration dont il est question dans nos travaux concernent celles qui se font hors ligne, avec un arrêt complet ou partiel du système.

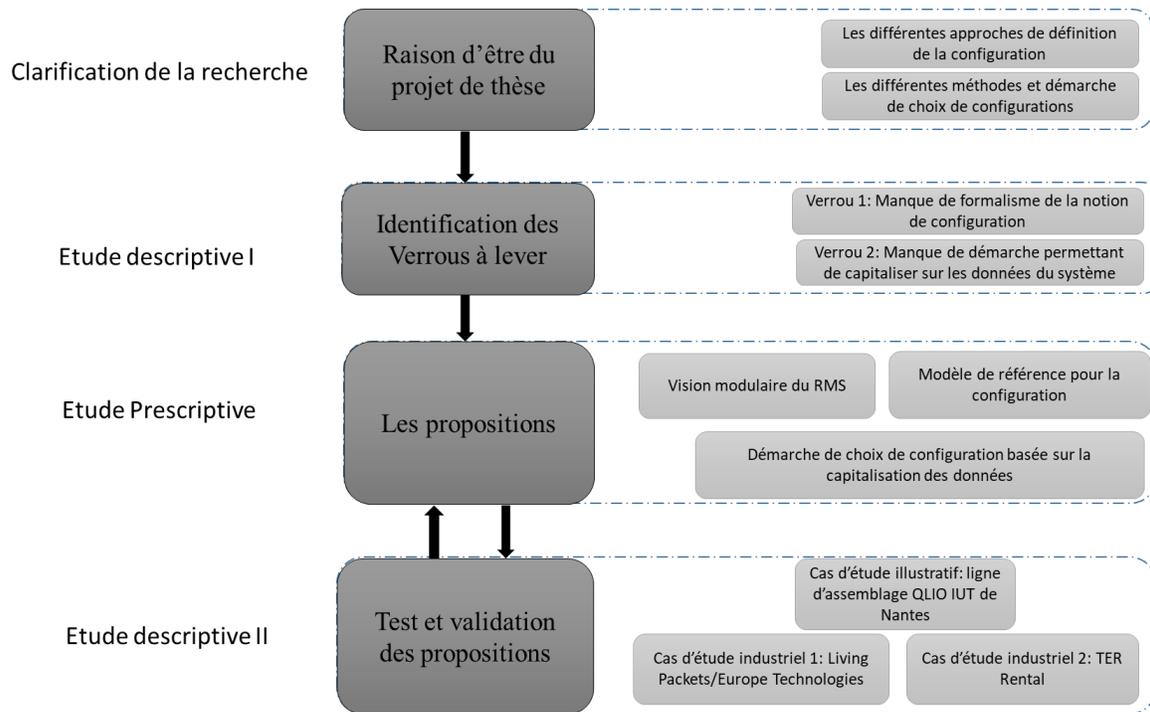


Figure 3: Méthodologie de recherche adaptée de (Blessing and Chakrabarti 2009)

## V. Organisation du manuscrit

Ce manuscrit comporte 6 chapitres et une conclusion générale, organisés comme suit (Figure 4) :

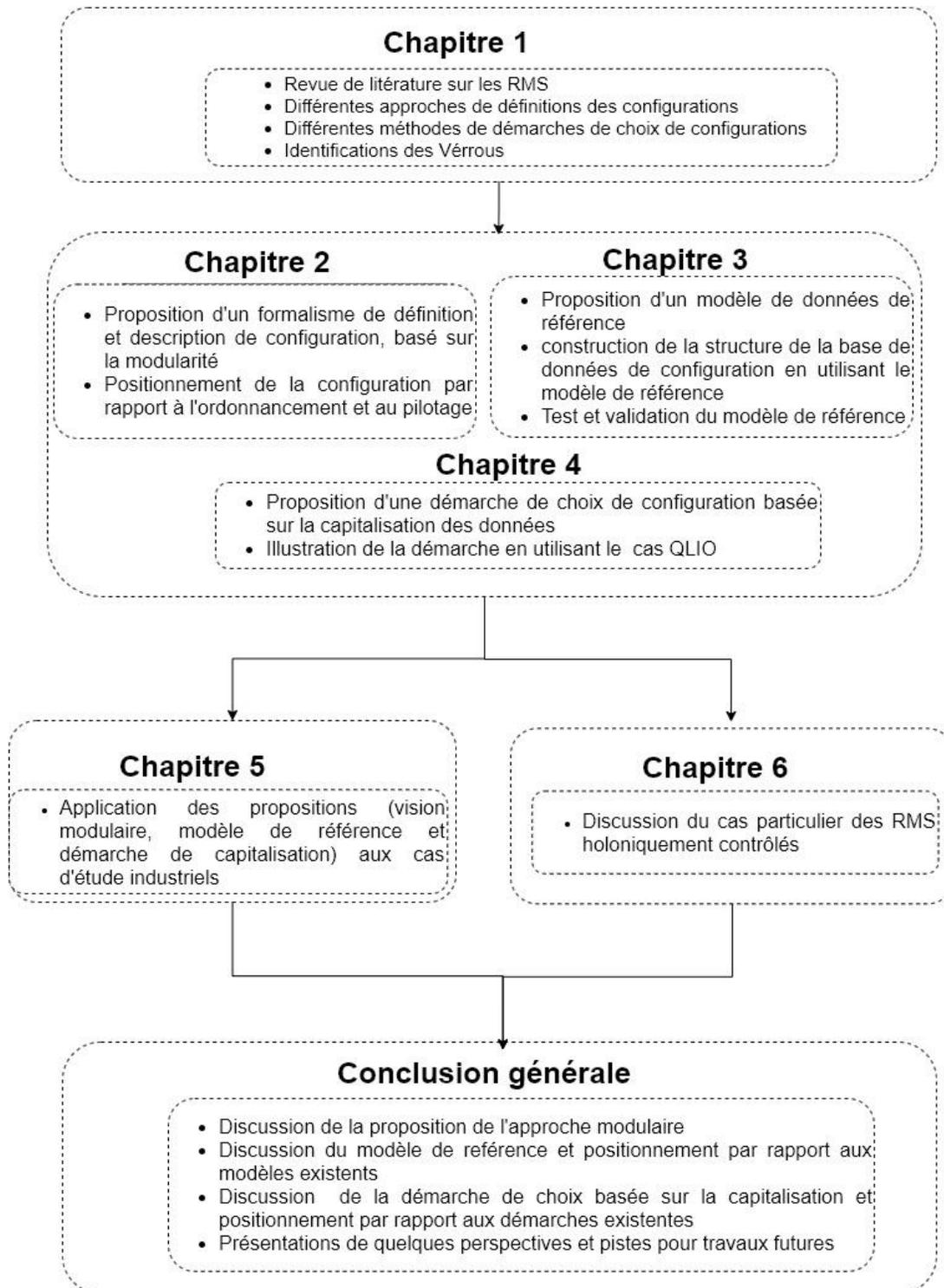


Figure 4 : Plan du manuscrit

# CHAPITRE 1 : REVUE DE LA LITTÉRATURE ET IDENTIFICATION DES VERROUS A LEVER

## I. La place des RMS dans les systèmes de production industrielle

### 1. Evolution des systèmes de production industrielle

Les systèmes de production ont connu une forte évolution induite entre autres par la variation des besoins sur le marché : répondre aux conditions changeantes de production, mettre rapidement un (nouveau) produit sur le marché avec un coût acceptable, ou encore être réactif aux besoins clients (Maganha, Silva, and Ferreira 2018), (Eguía, Villa, and Lozano 2017), (Koren and Shpitalni 2010), (W. Wang and Koren 2013).

Dès le début de l'industrialisation, les systèmes de production doivent « produire le plus possible en moins de temps ». Il s'agit d'une forte production de masse. C'est dans ce contexte que les systèmes dédiés (Dedicated manufacturing systems\_DMS) ont vu le jour. Les DMS sont reconnus pour répondre à la problématique de la forte demande. Ils ont une cadence élevée, et sont destinés à la production d'un seul type de produit, ou d'une famille de produits très peu diversifiée. Dans ces systèmes, les machines effectuent quelques opérations relativement simples et sont agencées les unes à la suite des autres. On retrouve dans ces systèmes le principe de production à la chaîne. Les DMS sont dit figés, car le produit et le volume de production sont pas ou très peu variables (Koren et al. 1999). Tant que la demande du même produit est importante, ce système demeure rentable.

Dès la fin du xx<sup>e</sup> siècle, la tendance de consommation va passer de la production de masse à la customisation de masse. Le principe du produit unique va changer pour laisser place à des produits pouvant répondre aux désirs des clients, ce qui induit une grande variété de produits. Les DMS ne parviennent plus à satisfaire la nouvelle demande. Il faut, pour une customisation de masse, un système capable de produire une grande variété de produits. C'est à cet effet que vont naître les systèmes dit flexibles, les FMS (Flexibles manufacturing systems). L'objectif de ces systèmes est de « produire la plus grande variété possible de produits ». Pour cela les FMS sont dotés de machines sophistiquées qui leur permettent de facilement customiser les produits, et donc fournir une large gamme de produits différents (Sethi and Sethi 1990). L'avènement de la commande

numérique a ainsi permis de rendre le comportement d'une machine de production programmable. On a vu apparaître des centres d'usinage flexibles et des langages de programmation permettant d'usiner automatiquement n'importe quel produit. Bien que pouvant supporter une grande variété de produits, le volume de production reste relativement faible. En plus, ces systèmes sont assez coûteux. Les machines offrent généralement plus de fonctionnalités que nécessaires et les produits obtenus sont plus chers car le client doit payer pour le surplus de flexibilité de la machine (El Maraghy 2006).

En outre, les systèmes de productions font face à une forte concurrence, à des consommateurs de plus en plus avisés, et à une évolution rapide des technologies. Le système se doit de répondre à ce nouvel environnement de production de manière rapide et rentable. D'une part, les DMS figés à un type de produit ne peuvent y répondre, d'autre part les FMS assez coûteux et à faible volume de production non plus. Il faut de ce fait trouver un compromis entre ces deux types de systèmes. C'est-à-dire, un système proposant à la fois une variété de produits, de grands volumes et à des coûts relativement bas. C'est alors que vont naître entre autres les Systèmes de productions reconfigurables.

Formalisés par Koren (Koren et al. 1999), ces systèmes sont capables de fabriquer un nombre important de produits variés à des coûts relativement bas. Les RMS se présentent alors comme étant un compromis entre les systèmes figés, et les systèmes « trop » flexibles. L'un des objectifs de ces systèmes de production est de « produire ce qu'il faut au moment où il faut » (Mehrabi, Ulsoy, and Koren 2000). D'autres systèmes tels que les systèmes de production variables (changeables manufacturing systems – CMS) (Wiendahl et al. 2007), et les systèmes de production à flexibilité ajustée (focused flexibility for manufacturing system) (Tulio Tolio 2009) ont aussi été introduits pour répondre aux besoins de variétés de produit et de volume de production.

Les CMS caractérisés par leur agilité, ont pour objectif de réaliser rapidement et efficacement tous les ajustements nécessaires pour passer d'une production à une autre. Les FFMS visent à rendre un système flexible pour répondre à une exigence particulière, le but étant de réduire les coûts d'investissements liés au déploiement des FMS. Ce qui diffère ces systèmes des RMS, c'est le coût d'investissement, qui est plus élevé pour les CMS et les FFMS (T. Tolio et al. 2010). Le Tableau 1 présente une comparaison de ces systèmes de production, et est une adaptation de (Bortolini,

Galizia, and Mora 2018). Les FFMS et CMS sont rarement repris dans la littérature, pour cette raison, dans la suite nous nous limiterons aux DMS, FMS et RMS.

Tableau 1: comparaison des différents type de systèmes de production, adapté de (Bortolini, Galizia, and Mora 2018)

	<b>DMS</b>	<b>FMS</b>	<b>FFMS</b>	<b>CMS</b>	<b>RMS</b>
<b>Coût par produit</b>	faible	élevé	élevé	moyen	moyen
<b>Demande</b>	Stable/peu variable	Très variable	Très variable	variable	variable
<b>flexibilité</b>	Aucune	Générale	Controlée	Générale	Controlée
<b>Volume de production</b>	Très élevé	Faible	Moyen	Moyen à Elevé	Elévé
<b>Structure du système</b>	Figé/fixe	Changeable	Changeable	Fixe	Changeable
<b>Variété produit</b>	Aucune	Très large	Très large	Large	Large

Nous pouvons ainsi voir que les systèmes de production ont évolué au cours du temps pour s'aligner sur les exigences de l'environnement et de la demande. Il est cependant important de noter que la naissance des RMS ne rend pas caduc l'utilisation des autres types de système. En effet, l'utilisation de l'un ou l'autre de ces systèmes va dépendre du contexte de production de chaque industrie (type de produit, type de client, etc...). Dans (E Capawa Fotsloh et al. 2020) nous avons d'ailleurs identifié trois types de familles d'industrie de production selon leur degré de flexibilité,

correspondant chacune à un type de système de production (Figure 5): F1 systèmes dédiés, F2 systèmes flexibles, F3 systèmes reconfigurables.

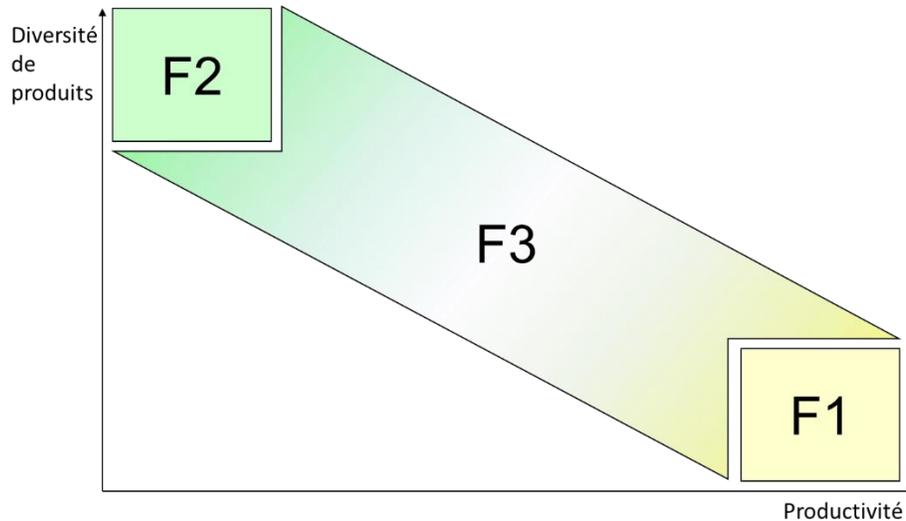


Figure 5 : Familles d'industrie en fonction de leur flexibilité

Toutefois, l'évolution de ces systèmes soutenue par des avancées technologiques permet de doter les entreprises de moyens évolutifs pour pouvoir absorber les fluctuations de l'environnement de production. Les systèmes objets de nos travaux de thèse sont les systèmes de production reconfigurables, caractérisés par leur reconfigurabilité. Dans la littérature de même que dans le milieu industriel, il est difficile de distinguer la reconfigurabilité de la flexibilité. Ces deux termes portent très souvent à confusion, ce qui sème la confusion entre les RMS et les FMS. Afin préciser les choses, nous proposons dans la section suivante de situer la reconfigurabilité par rapport à la flexibilité. Ceci permettra de rendre fluide la lecture de ce document.

## 2. Agilité, flexibilité et reconfigurabilité : ressemblances et différences

La flexibilité est considérée comme un concept complexe et les définitions de ce terme varient selon le contexte et les auteurs. Dans le domaine manufacturier, la norme (AFNOR 1991) définit la flexibilité comme étant l'aptitude d'un système de production à s'adapter, dans un temps déterminé, à une diversité de produits ou de tâches, sa capacité d'adaptation à un large éventail d'environnement qu'il peut rencontrer. Autrement dit, la flexibilité est la capacité qu'a le système

de production de pouvoir s'adapter aux circonstances variables ou aux instabilités (Beskese et al., 2004). (El Maraghy 2006) présente la flexibilité comme la capacité à changer et à assumer des états différents pour répondre aux exigences changeantes sans trop pénaliser le temps, les efforts, les coûts ou les performances. Ces états différents concernent un certain nombre de point énumérés dans la littérature par (Browne et al. 1984), (Browne et al. 1984), (Berruet 1998) et (El Maraghy 2006). Il s'agit de:

- Flexibilité machine ou au niveau ressource : capacité qu'à une machine (ou une ressource) à effectuer plusieurs type d'opérations, et pouvoir passer d'une opération à l'autre sans effort prohibitif.
- Flexibilité de manutention, du système de transport ou de routage qui assure le déplacement efficace des produits de machine à machine.
- Flexibilité des opérations qui fait référence à la possibilité de fabriquer un produit de différentes manières au sein du même système.
- Flexibilité de production qui concerne à la facilité avec laquelle un nouveau produit (ou nouvelle famille de produit) peut être ajouté au système. Cette flexibilité réside principalement dans le fait de fabriquer des produits de famille différente, c'est-à-dire, des produits dont les caractéristiques sont assez différentes. Contrairement aux produits d'une même famille dont les caractéristiques se rapprochent les unes des autres.
- Flexibilité volume qui renvoie à la capacité du système à être exploité de manière rentable à différents niveaux de production. Elle permet de s'adapter à la flexibilité de la demande client. Elle permet à l'usine d'ajuster la production à la hausse ou à la baisse dans de grandes limites possibles en tenant compte de la vitesse de réponse et de la plage de variation.

Ainsi dans la flexibilité, le système de production est perçu comme une boîte noire qui a en entrée la demande du client et en sortie la satisfaction de cette demande avec des contraintes de délais, coûts, et performances.

La reconfigurabilité est définie par (Mehrabi, Ulsoy, and Koren 2000) comme étant la capacité du système à disposer ou remplacer des modules du systèmes de manière à répondre aux changements du marché. (M Reza Abdi 2005), (Maganha, Silva, and Ferreira 2018) et (Napoleone, Pozzetti, and Macchi 2018) considèrent la reconfigurabilité comme la capacité à ajouter, retirer ou réarranger les

éléments du système de production de manière rentable, dans le but de s'aligner avec la grande variations de la demande du marché. Dans cette définition de la reconfigurabilité, l'accent est mis sur « comment » le système de production parvient à s'adapter aux variations du marché. Contrairement à la flexibilité où l'objectif est l'adaptation du système à des coûts et délais réduits, la reconfigurabilité cible entre plusieurs options la manière avec laquelle le système peut arriver à cette adaptation. Ainsi, dans la reconfigurabilité, la boîte noire représentant le système de production est ouverte. Et à l'intérieur se trouve des éléments à réarranger pour atteindre la satisfaction du client, bien sûr en respectant les contraintes de performances, coûts et délais.

La reconfigurabilité est donc un moyen pour atteindre la flexibilité (E Capawa Fotsoh et al. 2020). L'aptitude à pouvoir réarranger les éléments du système peut permettre entre autre de modifier le volume de production (flexibilité de volume), de fabriquer un produit différemment (flexibilités des opérations), etc. Cette flexibilité reste toutefois limitée à une famille de produit (Koren et al. 1999), contrairement à la flexibilité qui va au-delà d'une famille de produit. C'est pour cette raison que la reconfigurabilité est parfois appelée flexibilité réduite ou limitée (Eguía, Villa, and Lozano 2017).

Par ailleurs, dans un contexte de globalisation, où les entreprises recherchent un positionnement mondial, la tendance est à l'agilité. L'agilité est définie comme la capacité à s'adapter aux variations. C'est-à-dire l'aptitude à pouvoir passer d'un type de marché à un autre (Wiendahl et al. 2007). Il s'agit en effet d'une vision d'ensemble et stratégique, ce qui requiert des efforts considérables (Mehrabi, Ulsoy, and Koren 2000). Cependant, aidé de la reconfigurabilité, ces efforts peuvent être réduits. En effet, selon (Koren, Arbor, and Ulsoy 2002) la reconfigurabilité est un facteur conduisant à l'agilité, de même que la flexibilité (Wiendahl et al. 2007). Cette vision des choses conduit à définir les termes « Agilité », « Flexibilité » et « Reconfigurabilité » par rapport à l'entendue considérée du système et la variété des produits. Ainsi, l'agilité engloberait la flexibilité qui, elle-même engloberait la reconfigurabilité. Ce positionnement de la reconfigurabilité par rapport à la flexibilité et l'agilité est montré sur la Figure 6.

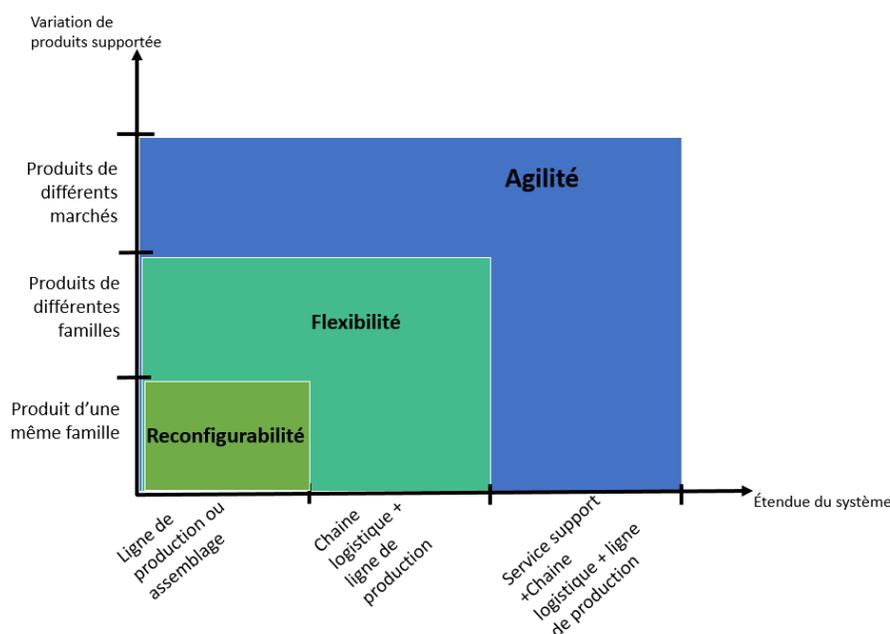


Figure 6 : Représentation de la frontière entre reconfigurabilité, flexibilité et agilité, inspiré de (Wiendahl et al. 2007) et (E Capawa Fotsch et al. 2020)

## II. Les caractéristiques des RMS

Les systèmes de production reconfigurables (RMS) sont définis comme étant des systèmes dont les structures physiques et logiques à tous les niveaux de composition du système peuvent être changées rapidement et à moindre coût afin d'ajuster la capacité de production et la fonctionnalité autour d'une famille de produits en réponse à des changements soudains du marché (Koren et al. 1999). Le changement de structure physique et/ou logique se fait dans le but de satisfaire les variations de la demande et de l'environnement. Pour y parvenir, les RMS sont dotés dès leur conception, des caractéristiques permettant de les reconfigurer.

De nombreux auteurs ont cherché à définir et à préciser la reconfigurabilité, proposant un grand nombre de caractéristiques. Nous en retiendrons huit (08) plus particulièrement citées dans la littérature. Il s'agit de la modularité, l'évolutivité, la convertibilité, la personnalisation, la diagnosticabilité, l'intégrabilité, la mobilité et l'adaptabilité (Koren et al. 1999), (Mehrabi, Ulsoy, and Koren 2000), (Maganha, Silva, and Ferreira 2018), (Lameche 2018). Chacune de ces

caractéristiques a un rôle dans la capacité des RMS à être flexible au juste nécessaire, productif et rentable. Ces caractéristiques sont des facilitateurs de reconfigurabilité et interviennent à un niveau différent de la reconfigurabilité. Certaines facilitent la détection du besoin de reconfiguration, d'autres permettent une reconfiguration rapide et efficace. Dans (E Capawa Fotsoh et al. 2020) nous avons proposé une classification des caractéristiques selon qu'elles interviennent dans la définition de l'objectif du RMS, sa conception ou encore son fonctionnement (Figure 7).

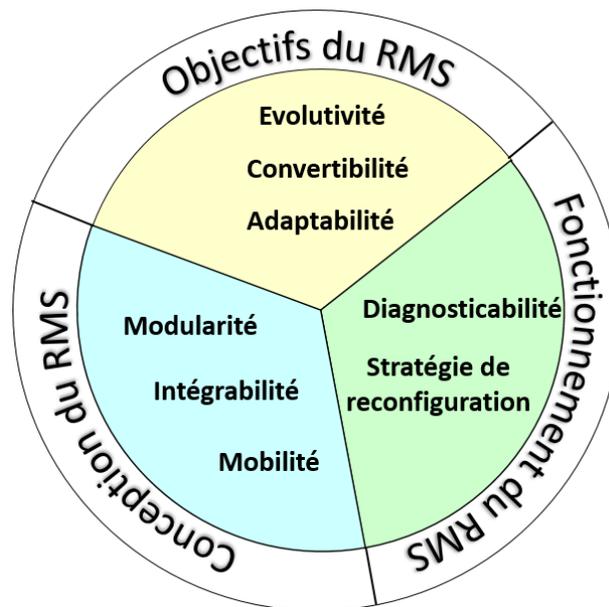


Figure 7: Classification des caractéristiques des RMS

### 1. Les caractéristiques liées à la définition des objectifs des RMS

Ces caractéristiques permettent d'identifier à quelles fins le système doit être reconfiguré. Dans la plupart des cas, un besoin de reconfiguration intervient lorsque le système doit s'adapter aux variations de la demande et/ou de l'environnement. Cette adaptation peut concerner soit le changement de la fonction d'une machine, soit l'ajout d'un nouveau produit, soit la modification d'un produit ou alors l'ajustement du volume de production. Les caractéristiques des RMS qui permettent de décrire cela sont : la convertibilité, l'évolutivité, l'adaptabilité et la personnalisation.

La convertibilité est la capacité de transformer les fonctionnalités des systèmes et des machines existants pour répondre aux nouvelles exigences de production (Maganha, Silva, and Ferreira 2018). Cela correspond par exemple au changement d'axes d'usinage, ou changement d'outil, ou encore un changement de fixation. Cette caractéristique permet de donner à la machine de nouvelles fonctions. C'est-à-dire la capacité de réaliser de nouveaux produits. Tout comme les variations du produits, les fonctionnalités possibles sont limitées à une plage correspondant au nombre de différents produits que peut fabriquer le système. En d'autres termes, la convertibilité est limitée à une famille de produits, étant donné que les RMS sont conçus autour d'une famille de produits (Koren and Shpitalni 2010), (Lafou et al. 2014).

La personnalisation renvoie à la capacité qu'a le système de produire un type de produit pour satisfaire les exigences d'un client en particulier. C'est la capacité qu'a le système de production de satisfaire « individuellement » chaque client. La personnalisation peut être considérée comme un élément de la variation de la demande plus précisément de la variation des caractéristiques produit. Cette variation est bien sûr limitée par une famille de produits (Koren and Shpitalni 2010). Plus un produit est personnalisé, plus il requiert de fonctions, et donc induit des coûts supplémentaires. Si pour chaque nouvelle demande il faut reconfigurer, le système ne sera pas rentable. D'où la nécessité de limiter les variations possibles à une famille de produits, ou alors opter pour une customisation de masse (Daaboul et al. 2014). On peut cependant imaginer que certains postes du système de production sont capables de personnaliser une partie du produit. (*Exemple : un poste de marquage LASER pour placer le logo du client sur un produit*). La reconfiguration pourrait dans ce cas concerner la mise en place d'une nouvelle possibilité de customisation pour le client.

L'évolutivité est la caractéristique du système qui lui permet d'ajuster son volume de production pour répondre à la demande (W. Wang and Koren 2013). Ceci peut passer par l'ajout ou le retrait des moyens de production, entre autre les machines (poste de travail) ou même des opérateurs. Ici il convient de déterminer le nombre de moyens de production à ajouter ou retrancher au système de manière à équilibrer les charges de chaque poste. On inclut aussi la notion de transport. En effet, les systèmes de transport des systèmes de production jouent un rôle important. En optimisant les chemins entre deux ressources, on peut aussi agir sur les délais de production. Un système évolutif

peut être caractérisé par le nombre de moyens de production qui lui sont ajoutées/retirées, le temps nécessaire pour effectuer ce changement, ou encore le gain en termes de temps pour transporter un produit dans le système.

L'adaptabilité mesure la réponse du système concernant à la fois les changements de volume de production et de caractéristiques de produits (Maganha, Silva, and Ferreira 2018). L'adaptabilité n'est donc pas une « nouvelle » caractéristique des RMS, mais une combinaison de l'évolutivité et de la convertibilité. Un système est dit adaptable lorsqu'il répond favorablement aux changements fonctionnels et de capacité imposés par le marché. Il y a dans la notion d'adaptabilité, les notions de volume de production et de caractéristiques du produit.

## 2. Les caractéristiques liées au fonctionnement des RMS

Il s'agit des caractéristiques qui permettent d'évaluer le RMS par rapport au besoin de production. L'intérêt de ces caractéristiques est de pouvoir détecter au plus vite les besoins de reconfiguration et de définir une stratégie appropriée pour les traiter. Il s'agit de répondre en cas de situation de reconfiguration : où et comment agir ? C'est-à-dire de faire un diagnostic du système et d'adopter une stratégie qui correspond. En plus de la diagnosticabilité déjà évoquée dans la littérature, nous proposons dans (E Capawa Fotsoh et al. 2020) d'ajouter une nouvelle caractéristique, la stratégie de reconfiguration.

La diagnosticabilité est la caractéristique des RMS qui permet cette prise de décision. (Koren and Shpitalni 2010) définissent la diagnosticabilité comme étant la capacité à lire automatiquement l'état du système pour en détecter les causes de dysfonctionnement de manière à les corriger rapidement . Elle permet aussi de répertorier et d'évaluer les possibilités d'action pour une prise de décision de reconfiguration. La décision peut être prise en évaluant les efforts de reconfiguration, C'est-à-dire le coût et ou le délai nécessaire pour reconfigurer le système (Huang et al., 2018). La diagnosticabilité est donc la caractéristique conduisant au déclenchement de la reconfiguration. En effet, elle permet de connaître à chaque instant l'état du système, afin de définir les besoins et stratégies de reconfiguration à adopter.

La stratégie de reconfiguration correspond à la réponse qui sera adoptée pour pallier aux éléments relevés par le diagnostic. Elle va fortement dépendre de la conception de base du système et du

niveau de reconfiguration. C'est-à-dire la profondeur jusqu'à laquelle le système va être reconfiguré, ce que (Ketfi 2005) et (Kanso 2010) appellent catégorie de reconfiguration. Cette reconfiguration peut se faire en ligne (sans arrêt du système) ou hors ligne (arrêt de production-reconfiguration-puis relance de production). (Maier-Sperdelozzi and Hu 2002) par exemple parle d'une stratégie par incréments successifs. (Huang, Wang, and Yan 2018) parle d'une stratégie dite retardée. La stratégie adaptée est corrélée au degré de modularité du système (une caractéristique de conception) et doit permettre d'atteindre l'objectif dans un temps donné. Par exemple plus le système est modulaire plus il y a de chance d'adopter une stratégie par incréments. Toutefois, la valeur de l'incrément doit être correctement dimensionné, pour réduire au maximum l'écart entre ce qu'offre le système et l'objectif fixée. La Figure 8 donne une représentation des stratégies qui peuvent être adoptées pour reconfigurer le système hors ligne (avec arrêt complet ou partiel du système). Elle illustre les idées développées par (Maier-Sperdelozzi and Hu 2002), (Huang, Wang, and Yan 2018) et (E Capawa Fotsoh et al. 2020).

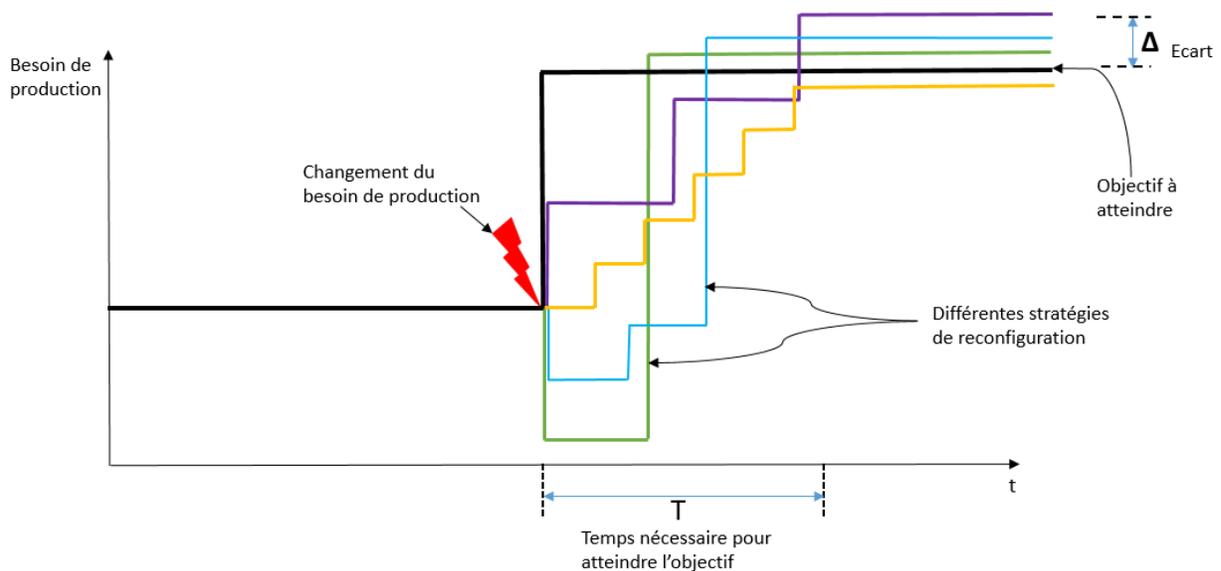


Figure 8: Illustration des différentes stratégies de reconfiguration

### 3. Les caractéristiques liées à la conception des RMS

Il s'agit des caractéristiques qui permettent aux RMS de changer de configuration de manière à répondre à un besoin diagnostiqué. Ces caractéristiques permettent le déploiement de la stratégie de configuration choisie à l'issue du diagnostic. Ce sont : la modularité, l'intégrabilité et la mobilité.

La modularité décrit l'utilisation d'unités standards et interchangeable pour satisfaire une variété de fonctions (Lameche et al., 2017). Elle traduit le fait d'avoir des composants totalement séparés et découplés du système afin que l'ajout, le remplacement et/ou la modification d'un module (composant) soit possible (Haddou Benderbal 2018). Plus les modules sont volumineux, plus ils sont difficiles à manipuler. A l'inverse, plus ils sont petits, plus il y a d'interfaces de contact, ce qui peut rendre complexe le « re » montage de l'ensemble. Il faut donc un juste milieu. Outre cela, la modularité joue un rôle important dans la capacité du système à être diagnostiqué, de même elle permet de définir et adopter une meilleure stratégie de reconfiguration. En somme, cette caractéristique est un facilitateur de reconfigurabilité, et se présente, selon notre approche, comme la caractéristique fondamentale des RMS. La modularité concerne aussi bien le système physique que le système logique de pilotage (Koren et al. 1999).

L'intégrabilité est la capacité de pouvoir interfacier deux modules. Ceci est possible grâce aux interfaces communes aux deux parties (Koren et al. 1999). Cette intégration peut être soit physique soit logique et les interfaces soit mécaniques, informationnelles ou encore de contrôles, afin de faciliter la communication entre les différents éléments (Lameche 2018). L'intérêt est d'avoir des interfaces standards pour faciliter l'interchangeabilité des modules et réduire le temps et coûts de « re » configuration.

La mobilité quant à elle est la caractéristique qui permet dans le système l'acheminement des produits d'un poste de travail à un autre (Singh and Jha 2018). Elle se base sur l'utilisation des ressources de transports (Convoyeurs, robots, AGV, etc.). (Lameche 2018) définit la mobilité comme la capacité de déplacement des produits dans le système. Elle désigne le chemin qu'empruntent les produits pour passer d'un point du système à un autre. Dans une configuration, le parcours des produits est défini de manière à gagner en temps, ou encore pour ajuster (ajouter

ou retirer) les opérations à la fabrication du produit. Cette définition de parcours peut se faire en utilisant les éléments déjà présents dans le système, ou par ajout de nouveaux moyens de transport. Dans le cas où des moyens de transports programmables sont utilisés (AGV, robots par exemple), il est nécessaire d'avoir une intégrabilité logique entre les éléments déjà présents dans le système et ceux qu'on rajoute.

#### 4. Relations entre les caractéristiques des RMS

Les différentes caractéristiques des RMS interagissent entre elles. En effet pour répondre à un nouveau contexte de production, le système doit être analysé pour déterminer où et comment agir. Cette réaction va elle aussi dépendre de la conception initiale du système. De fait que ce soit les caractéristiques de fonctionnement, de conception ou d'objectifs des RMS, il existe des relations entre elles. Concrètement (i) Un bon diagnostic du système, conduira à un bon choix de stratégie de reconfiguration, ce qui permettra de réduire les coûts et temps de reconfiguration. (ii) Plus on aura de modules indépendants, plus il sera possible de définir de nouvelles fonctions pour le système, et par conséquent, un large choix de produits à fabriquer (plus grande famille de produits).

Aussi, les modules conçus pour remplir des fonctions précises, peuvent être utilisés pour ajouter ou retrancher des fonctionnalités au système de production. Il s'agit ici de la convertibilité. La présence de différentes fonctions dans le système de production permet de répondre à des besoins de production de plus en plus propres à chaque client, c'est la personnalisation. (Deif and Elmaraghy 2007) va d'ailleurs souligner que la structure modulaire des composants du système est responsable de l'évolutivité physique tandis que les techniques modernes de contrôle de l'architecture ouverte sont le principal outil d'évolutivité logique ou logicielle. La modularité à son tour est facilitée par la présence d'interfaces standardisées, c'est à dire l'intégrabilité qu'elle soit physique ou logique/logicielle. Un schéma d'interaction est présenté en Figure 9.

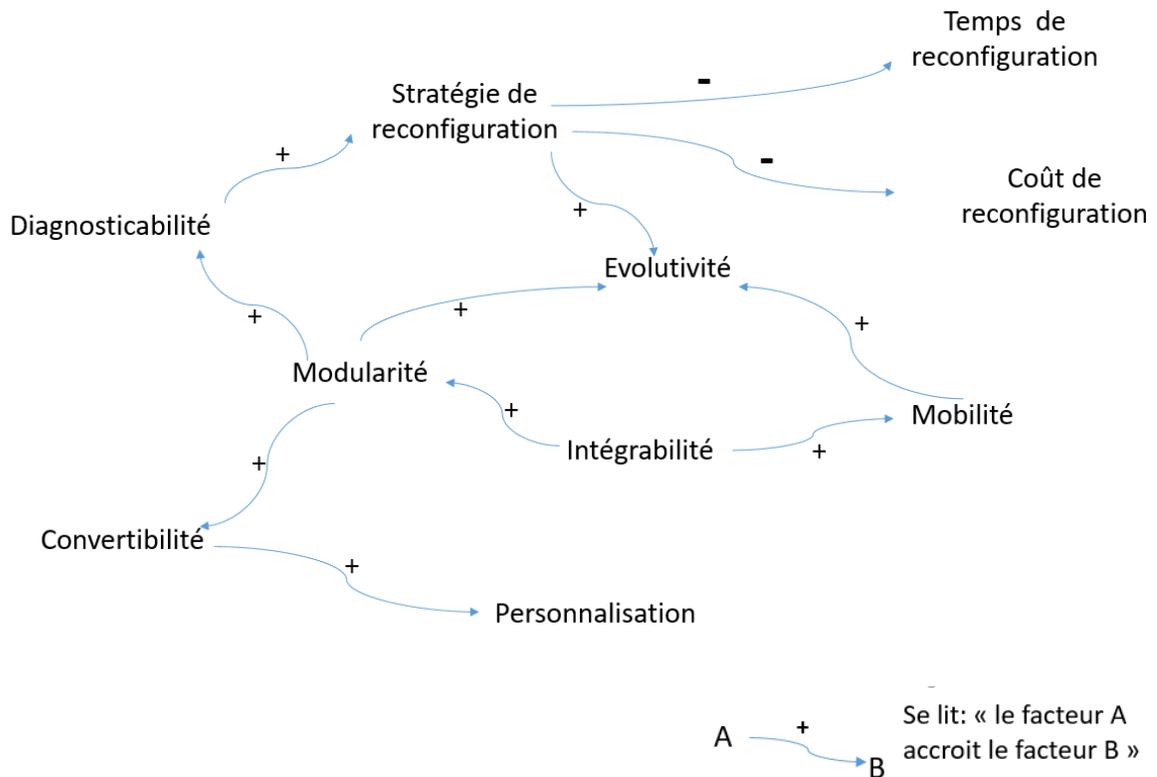


Figure 9: Relation entre les différentes caractéristiques des RMS

Ces caractéristiques sont aussi souvent utilisées pour évaluer le système. Plusieurs métriques ont à cet effet été proposées dans la littérature. Par exemple, (Rösiö et al. 2019) propose un critère d'évaluation afin de mesurer la reconfigurabilité par rapport à la préparation aux changements qui peuvent survenir dans le système. Aussi, (G. X. Wang et al. 2017) propose pour chaque *configuration* de l'évaluer en mesurant chacune de ses caractéristiques, afin de parvenir à une comparaison des différentes *configurations* du système. Dans la même optique, nous avons proposé dans (E Capawa Fotsoh et al. 2020) un diagramme KIVIAT permettant d'évaluer les *configurations* d'un RMS, chacun des axes ce diagramme représentant les caractéristiques des RMS (voir Figure 10).

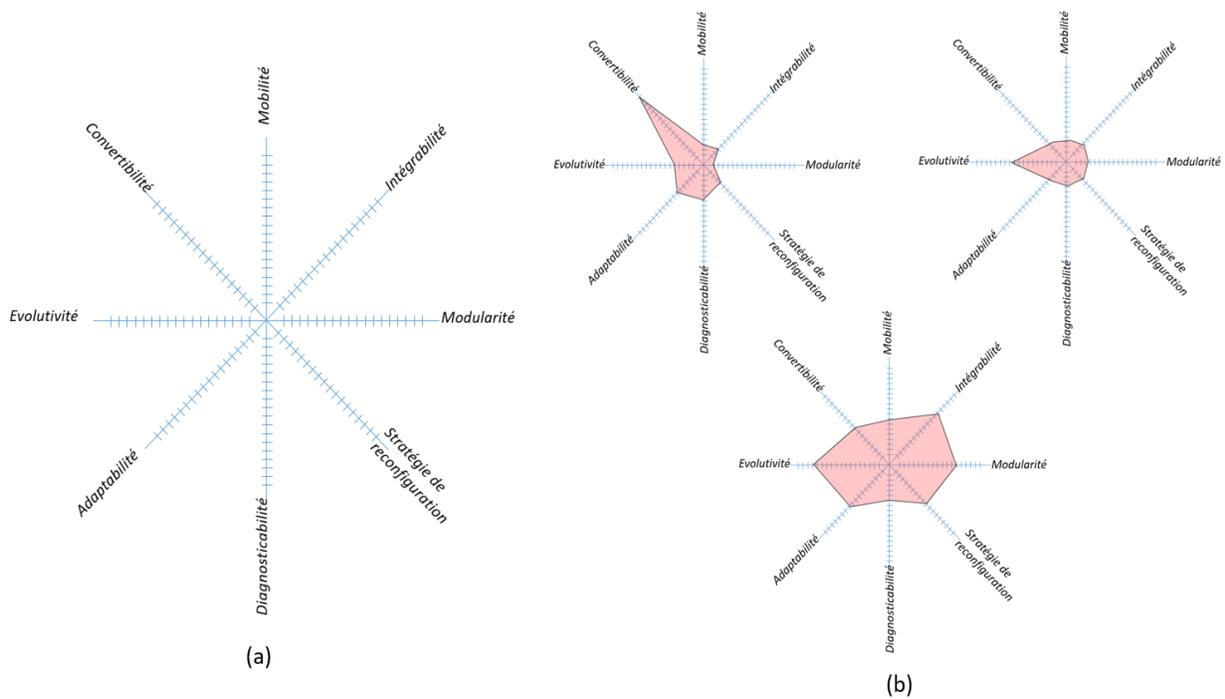


Figure 10: (a) Digramme KIVIAT et (b) Exemples de représentation de configuration (E Capawa Fotsoh et al. 2020)

Ces évaluations du système sont bien sûr tributaires de la *configuration* choisie pour le système. Il faudrait donc en plus des « bonnes notes » de cette évaluation, que le système permette de répondre au besoin de production qui se pose. La *configuration* adoptée pour le système doit donc être en mesure à la fois de remplir les critères de reconfigurabilité, et de répondre aux exigences de production. La question qui se pose ici est celle de savoir concrètement ce que représente la *configuration* pour les RMS.

### III. La définition d'une configuration dans la littérature

Une des particularités des RMS, est qu'il existe beaucoup de travaux de recherche qui s'y intéressent comme le montre par exemple les revues de (Bortolini, Galizia, and Mora 2018). Cette abondance de travaux est aussi à l'origine des nombreux points de vue qui ne sont pas toujours convergents, notamment pour ce qui est de la définition de la notion de *configuration* pour les RMS.

## 1. L'approche « physique » de la configuration

Nombreux sont les auteurs qui définissent la configuration d'un RMS selon son aspect physique. Pour (M Reza Abdi 2005) et (Goyal, Jain, and Jain 2013a), les RMS étant conçus autour d'une famille de produits, la configuration du système de production est définie par les machines à intégrer dans ce système en vue fabriquer la famille de produit. Pour les auteurs tels que (Mohammad Reza Abdi and Labib 2003), (Koren and Shpitalni 2010), (Saxena and Jain 2012), (Al-Zaher, Elmaraghy, and Pasek 2013), (Lameche et al. 2017), (Andersen et al. 2017) ou encore (Haddou Benderbal 2018), la configuration en plus du choix des machines, réfère aussi disposition de celle-ci dans le système (le Layout). Pour ces auteurs, la *configuration* qui va permettre au système de s'adapter aux variations, est celle où les machines peuvent être changées et le layout peut évoluer. Les travaux de (Deif and ElMaraghy 2006), (Youssef and ElMaraghy 2007), (Abdi, 2009), (Lateef-Ur-rehman 2013), (W. Wang and Koren 2012), (Tang et al. 2016) suivent cette même logique. (W. Wang and Koren 2013) assimile d'ailleurs la conception d'une configuration au choix de celles-ci pour répondre à un besoin de production. (Spicer et al. 2002) va y associer l'interconnexion entre les machines. Selon lui, il ne suffit pas de choisir les machines et leur disposition, mais il est aussi important dans la définition de la configuration, de choisir comment ces machines seront physiquement connectées entre elles. Ici, l'objectif est de permettre à la configuration d'effectuer la succession d'opérations nécessaire à la fabrication des produits avec des performances satisfaisantes. Dans l'approche physique de la configuration, l'accent est mis sur le choix des machines et leur implantation (layout).

## 2. L'approche « commande » de la configuration

L'approche commande quant à elle stipule que la configuration d'un système renvoie au choix de la logique de contrôle appliqué dans ce système pour répondre au besoin de production (El Maraghy 2006). Dans cette approche, le système est vue selon la logique de contre, et la reconfiguration du système donc consiste à passer d'une logique de contrôle à une autre capable de s'adapter aux variations qui surviennent dans le système (Kanso, Berruet, and Philippe 2010). On parle ici de la reconfiguration de la commande du système (Berruet 2007). Le choix de cette commande peut se faire à l'arrêt du système, ou pendant que celui-ci fonctionne. Dans le second cas, les éléments du système se reconfigure dynamiquement, parfois sans l'intervention humaine. Ceci se rapproche

plus du domaine des systèmes multi-agents, des systèmes holoniques ou encore du cas particulier des RMS dont l'aspect logique de contrôle est implémenté par les holons (voir chapitre 6). Cette reconfiguration dynamique repose entre autres sur des algorithmes décisionnels qui permettent au système de prendre des décisions en fonction de la situation qui se présente. Ici le comportement du système est soit prédictif, soit réactif (la réaction restreinte à des possibilités préconçues) ou alors fonctionne par apprentissage (Jimenez Gordillo 2017). Cette approche « commande » de la configuration ne nécessite pas toujours des changements dans la structure physique du système de production. Ceci explique pourquoi les auteurs partageant cette vision se limitent à considérer la configuration du système selon la logique de contrôle (la commande) qui y est appliqué, sans toutefois s'appesantir sur l'aspect physique de celui-ci.

### 3. L'approche couplée de la configuration

Cette approche de la configuration, est celle qui cadre le mieux avec la définition du RMS. En effet, les RMS de par leur définition sont dotés d'une dualité physique et logique (Koren et al. 1999). Le concept de configuration a donc une dimension physique, mais aussi une dimension logique de contrôle. Il s'agit ici de prendre en compte à la fois les machines, leur implantation ainsi que les logiques de contrôle lors de la définition de la configuration. Ils existent peu de travaux qui allient les deux aspects dans la même étude. Dans certains travaux, les deux aspects sont considérés, cependant les auteurs peuvent choisir de mettre l'accent sur l'un ou l'autre pour mener leur étude (exemple (Deif and Elmaraghy 2007), (De Lamotte, Berruet, and Philippe 2007)). Certains auteurs tels que (Azab et al. 2013) ajoutent à l'aspect physique, un aspect performance (exemple : consommation énergétique) pour définir une configuration.

## IV. Méthodes et démarches de choix de configuration dans la littérature

L'une des questions qui gravite autour des RMS est celle du choix de la *configuration* quand survient une situation de reconfiguration. Depuis l'introduction des RMS, de nombreuses méthodes de choix de configurations ont été proposées, pour la plupart basée sur des méthodes de choix multicritères. On a par exemple (M Reza Abdi 2005) qui propose un modèle AHP (*analytic hierachy process*) pour le choix de configuration (layout). Après avoir groupé les produits en familles, chaque famille est assignée à la configuration correspondante selon des critères de

reconfigurabilité, coût, qualité et de fiabilité. L'auteur enrichi ensuite sa méthode en proposant de jumeler l'AHP à la logique FUZZY (encore appelées méthode floue) pour pallier aux problèmes d'incertitude de données liées à la prise de décision (M Reza Abdi 2009). (Lateef-Ur-rehman 2013) identifie pour un système les différentes configurations possibles (les machines à inclure dans le système) et propose ensuite une méthode multicritères basée sur PROMOTHEE pour le choix de la configuration. L'approche de (Benderbal, Dahane, and Benyoucef 2017) est basée sur AMOSA (*Archived Multi-Objective Simulated Annealing*) pour la sélection des machines (la configuration) à intégrer dans le système, (Youssef and ElMaraghy 2007) quant –à eux utilisent une méthode basée sur un algorithme génétique. Ces méthodes intègrent essentiellement les choix de configuration par rapport à son approche « physique »

Or, les RMS ayant une dualité physique et logique, il faut en plus du choix des machines et de leur layout, déterminer la logique de contrôle à appliquer, car c'est l'association de ces deux qui donne lieu à des performances qui seront par la suite comparées aux objectifs attendus. Allant dans ce sens, (Alsafi and Vyatkin 2010) et (Michalos et al. 2016) ont proposé des approches qui prennent en compte l'aspect logique de contrôle et intègrent aussi l'aspect physique du système. Cependant ces approches se servent uniquement de la capacité actuelle du système, c'est à dire ont pour données d'entrée le système courant. Or très souvent en l'industrie, face à une situation de reconfiguration, l'option la plus courante est de chercher dans les archives pour trouver un cas similaire. En effet, l'idée ici part du principe qu'une configuration qui répond aux besoins de production pourrait s'inspirer de ce qui a été fait dans le passé. (Rösiö et al. 2019) va d'ailleurs le mentionner quand il dira que la mise en œuvre de systèmes de production reconfigurables nécessite une analyse du système actuel, des situations antérieures, ainsi qu'une évaluation de la capacité à reconfigurer le système. Les données relatives aux configurations passées du système doivent ainsi pouvoir être stockées et consultées au moment opportun.

C'est dans cette perspective que (Monticolo et al. 2015) a proposé une approche KCM (knowledge configuration model). L'objectif du KCM est de permettre l'acquisition, la traçabilité et la réutilisation des connaissances utilisées dans une configuration, afin de les partager dans un contexte de conception collaborative. Cette approche est liée à la conception du produit, toutefois, elle pourrait être étendue à celle du système. Dans la même lancée, (Mabkhot, Al-Samhan, and

Darmoul 2016) propose un modèle informationnel qui permet de décrire les performances d'une configuration, son layout et les situations dans lesquelles cette configuration est utilisée. Ce modèle vise à fournir une structuration des données pouvant exister du système, dans le but d'assurer leur réutilisation au moment opportun. Dans la même logique (Qasim et al. 2019) propose une démarche de choix de nouvelles configurations basée sur les données issues de l'analyse du système dans sa phase d'utilisation. Ces travaux viennent en complément aux méthodes de choix multicritères, en permettant d'élargir le champ de recherche des configurations. Le système courant est pris en compte de même que son historique. Ce qui aide à la réactivité du système face à une situation de reconfiguration.

## V. Synthèse de l'état de l'art

Le nombre important de travaux autour des RMS amène les auteurs à avoir des points de vue différents au sujet de la considération de la notion de configuration. Comme expliqué précédemment, d'une part, il y a ceux qui considèrent la configuration du système par son aspect physique et d'autre part ceux qui la considèrent par son aspect logique de contrôle. Très peu de travaux allient ces deux visions. Cependant, le choix d'une configuration ne saurait se faire à l'égard de son seul aspect physique ou logique, mais en comparant ses performances avec l'objectif de production voulu et ces performances (KPIs) résultent de l'association de l'aspect physique et de la logique de contrôle appliquée au système. Le manque de formalisme de cette notion de configuration pousse chaque auteur à lui donner des considérations différentes en fonction de l'étude menée, et c'est selon ces considérations que sont proposées les méthodes de choix de configuration.

Certaines méthodes de choix de configurations sont axées sur son aspect physique uniquement (exemple (Campos Sabioni, Daaboul, and Le Duigou 2021)). D'autres allient les deux aspects (physique et logique), en utilisant des démarches de choix basées sur les données du système courant. Dans ces conditions, la recherche de nouvelles configurations peut ne pas être optimale, du fait que le champ de recherche est réduit. Pour y faire face, des approches telles que celles de (Monticolo et al. 2015), (Mabkhot, Al-Samhan, and Darmoul 2016) et (Qasim et al. 2019) ont exploré l'idée de capitaliser sur les données issues de l'historique du système. Selon eux, le fait de disposer d'un stockage structuré des données des configurations précédentes du système pourrait

aider à la sélection de nouvelles configurations. Cette approche permettrait au processus de reconfiguration d'être plus réactif.

Cette idée de capitaliser sur les données du système (données précédemment utilisées dans le système, et/ou données du système courant) a jusqu'ici été très peu explorée dans la littérature, comme l'a souligné (Bortolini, Galizia, and Mora 2018). Par ailleurs, la croissance de l'industrie 4.0 impose aux systèmes de production bien plus que la réactivité. Pour rester compétitifs ces systèmes de production doivent pouvoir les anticiper au mieux sur le potentiel futur et se préparer à y faire face, ils doivent être proactifs. L'évolution technologique à travers les outils de modélisation permet d'anticiper sur un nouveau contexte de production en testant et en évaluant de nouvelles configuration, grâce à un modèle de simulation par exemple (Cardin and Castagna 2011), (Lateef-Ur-rehman 2013) (Petroodi et al. 2019). Ainsi, devant une situation de reconfiguration, au-delà de la réactivité, le système pourra adopter une configuration ayant été anticipée et ainsi s'aligner aux exigences de proactivité.

Les méthodes de choix de reconfigurations à ce jour manque de proactivité : que ce soit les méthodes multimètres ou les ontologies. Contrairement à (Singh and Jha 2018) qui pointe un manque de données pertinentes pour analyser les problèmes de développement du RMS, nous estimons que le problème qui se pose n'est pas celui du manque de données, mais plutôt un manque de formalisme autour de la notion de configuration, ainsi qu'un manque d'organisation et de structuration des données liées à la configuration. Bien que les travaux de (Monticolo et al. 2015) et (Mabkhot, Al-Samhan, and Darmoul 2016) constituent une bonne base de réflexion, à notre connaissance il n'existe pas dans la littérature d'approche de choix de configurations qui intègre à la fois les aspects physique et logique de la configuration, tout en permettant de capitaliser sur les données à la fois passées, présentes et potentiellement à venir du système. Pouvoir assurer une réutilisation (la capitalisation) des données (passées, présentes ou potentiellement futures) des configurations, il faut déjà pourvoir stocker de manière structurées les données la décrivant.

Nous identifions ainsi deux verrous à lever dans le cadre des travaux de cette thèse :

**Verrou 1 : Manque de formalisme de la notion de configuration : sa définition et l'identification des paramètres évolutifs.**

**Verrou 2 : Manque de structuration des données (passées, courantes et potentiellement futures) liées aux configurations du système, de manière à pouvoir construire une démarche de choix de configuration qui se base sur la capitalisation de ces données, et prenant en compte tous les aspects liés à la configuration.**

## VI. Contributions des travaux

Afin de lever les verrous identifiés, nous allons nous axer nos réflexions autour de la modularité du RMS. Partant d'une vision modulaire du système de production, nous allons proposer pour la configuration, une définition qui intègre non seulement les aspects physique et logique de contrôle, mais aussi les aspects performances et modèle. Cette définition vise à intégrer dans la même vision, les différentes approches de la configuration, tout en prenant en compte les exigences de proactivité en industrie.

C'est autour de cette même modularité, que nous proposons un modèle de données décrivant les configurations d'un système selon ses aspects physique, logique, performance et même modèle. Ce modèle de référence utilisé pour construire une base de données de configurations au système, représente ainsi le socle de la démarche de choix de configurations basée sur la capitalisation que nous proposons. La base de données de configurations, en plus d'aider à la capitalisation des données du système, représente dans un sens plus large un outil pouvant aider à la gestion des connaissances de l'entreprise.

## CHAPITRE 2 : PROPOSITION DE DEFINITION DE LA CONFIGURATION POUR LES RMS

L'objectif de ce chapitre est de répondre au premier verrou identifié. C'est-à-dire proposer un formalisme permettant de décrire et caractériser la configuration d'un RMS. Nous proposons également un positionnement de la configuration du RMS, par rapport à son pilotage, et son ordonnancement. Ce chapitre pose les principes sur lesquels s'appuieront les chapitres suivants. Le formalisme proposé ici sera illustré au travers de l'exemple d'un système réel.

### I. La modularité, une condition fondamentale des RMS

La modularité naît du besoin des entreprises de vouloir améliorer la conception de leurs produits pour alléger le processus de conception de fabrication d'une part et pour satisfaire un large éventail de clients d'autre part. On trouve les premières applications de cette modularité produit dans les secteurs de l'informatique, de l'aéronautique et de l'automobile. Selon cette approche, un produit modulaire représente un produit complexe dont les différents éléments sont conçus indépendamment, mais fonctionnent ensemble comme un tout homogène. Très vite cette idée de modularité du produit va être transposée à l'organisation. La modularité technique du produit conduit ainsi à la modularité de l'organisation qui conçoit ce produit (Cohendet, Diani, and Lerch 2005) ainsi qu'au système qui le fabrique. L'idée consiste à gérer la complexité du produit en répartissant sa conception et sa fabrication de manière à regrouper les éléments dans un nombre réduit de sous-systèmes (Frigant and Jullien 2014). Ainsi, pour répondre à la diversité des clients, et fabriquer des produits de plus en plus complexes, le système devient lui aussi modulaire. C'est l'idée mise en avant notamment dans le domaine de l'automobile (Frigant 2018).

Le système modulaire se présente ainsi comme une solution permettant d'absorber les diverses demandes des clients et les incertitudes de l'environnement. Pour illustrer cela (Cohendet, Diani, and Lerch 2005) reprend cette parabole de (Simon 1962) qui à notre sens présente bien l'intérêt de la modularité :

*Tempus et Hora fabriquent et assemblent tous deux des montres. Ces montres complexes, sont constituées d'un grand nombre d'éléments. Il arrive très souvent qu'ils soient dérangés dans leur travail (incertitude de l'environnement). Tempus ne conçoit pas ses montres comme des systèmes modulaires et pour cette raison, chaque fois qu'il est dérangé, l'ensemble retombe en pièces. A l'inverse, Hora conçoit ses montres comme des systèmes modulaires (décomposables), de sorte que lorsqu'il est dérangé, seul le dernier sous ensemble qu'il était en train d'assembler retombe en pièce. Les autres déjà achevés restent intacts. De cette manière, Hora peut survivre dans un environnement risqué.*

Cette parabole montre l'importance de la modularité pour des systèmes visant à évoluer dans un contexte incertain, et les systèmes de production reconfigurables en font partie. Le système est conçu en « petits blocs », ayant la capacité d'être rapidement changé pour faire face à un changement du produit (cf. **caractéristiques liées à la conception du chapitre 1**). L'ADN des RMS étant d'être rapidement modifiable, la modularité se présente alors comme la caractéristique indispensable à la satisfaction de cette contrainte. Aussi, la philosophie des RMS veut que cette modularité ne soit pas seulement au niveau physique mais aussi au niveau de la logique de contrôle. De ce fait, que ce soit dans le processus de conception (où le système est reparti sur des modules séparés pour la conception), ou dans l'utilisation (où l'utilisateur peut combiner les modules pour un objectif précis de production), la modularité est une condition fondamentale pour les RMS. Elle est une caractéristique clé et même essentielle (Koren and Shpitalni 2010).

Pour cette raison, dans nos travaux nous avons émis l'hypothèse selon laquelle les systèmes de production reconfigurables dont nous parlons sont modulaires. Et c'est sur cette base de modularité que nous allons structurer toute la suite de nos propositions.

## II. Le module, élément standard du RMS

De manière générale, le système de production est fait d'un ensemble de moyens de production, de stockage, de transports, d'opérateurs. Définir une configuration pour de tels systèmes revient à identifier les moyens utilisés, leur organisation et leur pilotage. Ce qui suit la logique de (De Lamotte, Berruet, and Philippe 2007) qui définit une configuration comme un ensemble de

ressources connectés avec une logique de contrôle. Cette définition permet d'avoir une idée assez générale sur ce qu'est une configuration pour un système de production quelconque. Cependant, pour le cas particulier des RMS, la configuration évolue dans le temps (reconfiguration) et est constitué d'un ensemble d'éléments modulaires. Il est donc nécessaire pour de tels systèmes d'avoir une vision de la configuration qui intègre cette notion d'évolution et de modularité. Par ailleurs, les RMS de par leur modularité sont très souvent considérés sur plusieurs niveaux : système, ligne, machine, composants, etc. (Huang, Wang, and Yan 2018). Cette vision nous amène à devoir considérer la configuration selon ces différents niveaux car l'évolution du RMS pourrait concerner soit un ou plusieurs de ces niveaux. De plus, différents aspects sont à prendre en compte lors de la reconfiguration, comme l'aspect physique ou logique de contrôle, entre autres. Une définition telle que celle énoncée plus haut est certes générale mais ne permet pas de prendre en compte tous les aspects des systèmes reconfigurables.

Afin d'intégrer toutes les contraintes précédemment énoncées dans la définition et la description de la configuration, nous proposons d'utiliser la notion de modularité. Pour cela, nous proposons avant tout de poser les bases en identifiant ce que représente un module pour un RMS.

### 1. Qu'est-ce qu'un module dans les RMS ?

Le fait d'utiliser des unités standards permet de créer des variantes du système de production, dans le but d'adopter des solutions du type « plug and produce » (brancher et produire) en cas de changements soudains de l'environnement de production. Pour ce faire, ces unités standards appelés modules doivent assumer des tâches spécifiques. Ils sont considérés comme des parties distinctes d'un système plus large pouvant fonctionner correctement dans un ensemble (Padayachee and Bright 2012). (Frigant 2018) leur donne les caractéristiques suivantes :

- Fonctionner de manière autonome les uns des autres
- Réaliser une fonction
- Avoir des interfaces découplées c'est-à-dire définies ex ante, et stables dans le temps.

Ainsi, pour définir un module dans un système, on doit s'assurer qu'il réponde aux critères précédents. Pour le cas particulier des RMS, la condition d'autonomie de l'entité doit aussi bien être vérifiée sur le système physique seul qu'avec la logique de contrôle lui étant associée.

La reconfiguration du RMS induit un diagnostic qui se fait généralement au travers de l'analyse des performances réalisées par le système en comparaison des performances attendues. Ces performances peuvent concerner différents niveaux du système. Plus le système est volumineux et complexe, plus on a intérêt à multiplier le nombre de niveaux, une analyse fractale étant alors privilégiée. Et pour cela, chaque entité doit pouvoir être analysée seule (mais considérée dans l'ensemble). On retrouve ici la notion d'autonomie de la modularité, cette fois au niveau des performances du système. Il est donc judicieux de prendre en compte ce paramètre dans la description du module, étant donné son importance dans la reconfiguration.

Ces trois premiers aspects (physique, logique et performance) permettent de représenter, décrire et d'évaluer chaque module du RMS à la condition que ce dernier soit réellement existant et utilisé dans le système. C'est-à-dire dans les cas où l'aspect physique est tangible dans le système, sa logique de contrôle déjà opérationnelle et qu'il est possible de tester son fonctionnement et pour en évaluer ses KPIs.

Cependant, il n'est pas toujours possible de tester un module dans le système réel du fait des coûts et du temps supplémentaire que cela engendre. Parfois, le module qui veut être testé peut ne pas exister de manière tangible, soit parce qu'il est encore en conception, soit parce qu'il n'est pas encore livré. Or pour être rentable et assurer une reconfiguration efficace, l'évaluation d'un module doit être indépendante de son « existence » physique. La réactivité et la proactivité du système dépendent de sa capacité à anticiper au mieux sur des situations de changement du contexte de production. Attendre la disponibilité physique d'un module avant de prendre des décisions de reconfiguration rend caduc cette aspiration à la proactivité.

Fort de ce constat, nous proposons d'ajouter un aspect modèle au module. Cet aspect est utilisé pour prévisualiser et anticiper sur le comportement du module et ainsi permettre de guider les décisions de reconfiguration. Nous décrivons alors le module dans notre approche, comme un

élément fractal du système qui possède quatre aspects : physique, logique de contrôle, performance (KPI) et un aspect modèle.

- L'aspect physique représente les ressources physiques du système. Il s'agit des moyens de production ayant une réalité physique tangible : poste de travail, opérateur, système de transport, système de stockage etc. Tout module existant en possède au moins un.
- L'aspect logique de contrôle représente l'intelligence de la partie physique. C'est le lieu où les décisions sont prises pour satisfaire les objectifs de production, tout en respectant les contraintes. L'aspect logique de contrôle gère/manager l'aspect physique. *Nota : dans la suite les termes « aspect logique », « logique de contrôle », font référence à l'aspect logique de contrôle.*
- L'aspect performance. Il s'agit des KPIs relatifs à l'utilisation du module. Ces KPIs permettent de comparer les performances attendues du module avec celles réellement obtenues. Ils sont utiles dans la détection d'écarts, et donc permettent d'analyser le module seul, et aussi dans l'ensemble. Cet aspect joue un rôle très important dans le diagnostic du système du RMS en ce sens où il permet de l'évaluer et de guider les décisions de reconfiguration.
- L'aspect modèle. C'est une représentation du module qui le décrit fidèlement et permet de l'évaluer comme s'il était en situation réelle. Les modèles représentent l'aspect physique du module, permettent de décrire son comportement et d'obtenir les performances (KPI) lui étant associées. Les performances étudiées lors de la reconfiguration peuvent être très variées. Elles peuvent concerner le comportement du module, sa consommation énergétique, son empreinte carbone ou encore des aspects économiques. Il faudra donc faire appel à différents modèles utilisant des techniques de modélisation pouvant être différents comme entre-autres la modélisation mathématique, les réseaux de Pétri, les Bond Graphes, la simulation de flux. Le modèle utilisé ainsi que le type de modélisation choisis vont fortement dépendre du contexte de production et de l'objectif visé par ce modèle. Le comportement du module est très souvent important dans l'étude d'une reconfiguration. Aussi, nous nous sommes limité dans cette thèse à un modèle basé sur la simulation de flux. La construction d'un modèle de simulation, quel que soit le langage utilisé, est souvent chronophage et complexe. Nous proposons, pour résoudre ce problème, d'avoir une

construction modulaire du modèle de simulation. Ce principe est largement appliqué depuis quelques décennies déjà (Hibino et al. 2002). Cet aspect permet aussi d'intégrer la virtualisation/digitalisation dans la description du système, suivant ainsi les standards de l'industrie du futur (Contreras, Garcia, and Díaz Pastrana 2017). D'autre part, l'expansion de l'industrie du futur incite à l'utilisation des modèles de simulation du système comme des outils d'aide à la décision ou aide au pilotage (Adolphs et al. 2015; Cardin and Castagna 2011). Nous proposons donc que chaque module soit décrit par un modèle de simulation. L'agrégation de ces modèles permettra alors une évaluation globale du système.

En somme, le module élément standard du RMS est défini selon ses aspects physique, logique de contrôle, KPIs et modèle. Sachant que le modèle privilégié dans le cas particulier de cette thèse est le modèle de simulation de flux.

## 2. Comment peut évoluer un module ?

Le fait de dissocier les 4 aspects (physique, logique de contrôle, KPI et modèle) dans le module donne une certaine liberté quant à l'évolution de celui-ci. En effet, pour un aspect physique (une ressource physique) on peut avoir plusieurs aspects logiques à lui associer. On obtient ainsi des modules différents, mais issus de la même ressource. Pour illustrer ce propos, considérons un poste de travail P1 pouvant fonctionner selon deux logiques de contrôle différentes : *FIFO*<sup>5</sup> représenté par C1 et *Clear-A-fraction*<sup>6</sup> représenté en C2. Lorsque P1 est contrôlé suivant C1, on a des performances KPI1 et lorsqu'il est contrôlé suivant C2 on a des performances KPI2. Un modèle de simulation SIM1 est utilisé pour décrire P1 selon qu'il fonctionne suivant C1, ou SIM2 lorsqu'il fonctionne selon C2. D'après l'explication donnée précédemment, le module {P1, C1, KPI1, SIM1} est différent de {P1, C2, KPI2, SIM2}. Bien que ce soit la même ressource utilisée, les performances ne seront pas toujours les mêmes, et le modèle de simulation change d'un module à l'autre. De même, une autre ressource du système P2, peut aussi être contrôlée suivant la logique C1. Un autre modèle de simulation sera alors utilisé pour la représenter, et éventuellement, les KPI

---

<sup>5</sup> *FIFO* : *First In First Out*, logique selon laquelle le premier entré est le premier à sortir (à être traité)

<sup>6</sup> *Clear-a-fraction* : logique selon laquelle les éléments de même type sont traités en priorité

obtenus seront différents. On aura ici un module qui partage le même aspect logique de contrôle que {P1, C1, KPI1, SIM1}, mais dont les aspects physique, KPI et modèle sont différents, aboutissant à deux modules distincts. Voir Figure 11b. Suivant cette explication, notons aussi que les aspects modèle et KPIs sont des dérivés des aspects physique et logiques. La modification de l'aspect physique et ou logique du module implique la modification du modèle de simulation le représentant, et potentiellement des KPIs le décrivant.

Ainsi donc, faire évoluer un module revient à modifier l'un ou plusieurs de ses aspects. Nous reviendrons dans la suite du chapitre, plus en détail sur cet élément quand nous parlerons de la vision modulaire de la configuration.

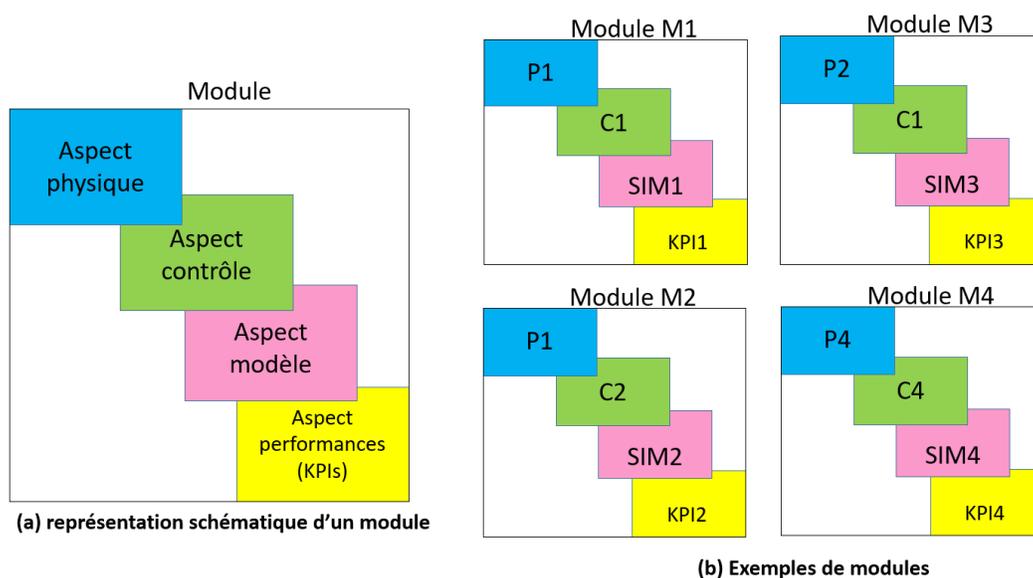


Figure 11: Représentation schématique d'un module et exemple de modules

### III. Vison modulaire de la configuration pour les RMS

#### 1. Définition et description de la configuration

Le module, élément standard du RMS, peut représenter un moyen de production, de stockage, de transport, etc. Selon la définition de (De Lamotte, Berruet, and Philippe 2007), la configuration est faite de cet ensemble de moyens interconnectés. Du point de vue modulaire, cela revient à dire que

la configuration du système est faite d'un ensemble de modules interconnectés. Le module ayant la particularité d'être lui-même modulaire, il peut être constitué d'autres modules, ou faire partie d'un module plus grand. On parle ici de vision fractale (Kanso, Berruet, and Philippe 2010). La configuration serait donc une vision macro modulaire et fractale du système.

Partant de cette approche, nous proposons pour la configuration des RMS la définition suivante :

**Une configuration est une agrégation de modules pris à différents niveaux du système de production selon le degré de précision voulue, chaque module ayant quatre aspects (physique, logique de contrôle, modèle et KPIs).**

L'agrégation est le rassemblement, la réunion d'éléments juxtaposés, généralement hétérogènes, présentant entre eux une certaine cohésion et formant un tout<sup>7</sup>. Dans la vision modulaire de configuration d'un RMS, on retrouve bien ce que décrit cette définition. En effet, le système est constitué d'un ensemble de modules. Chacun de ces modules décrit particulièrement un moyen utilisé pour la production. C'est la cohésion de tous ces moyens donc des modules les décrivant qui forme le système.

Or un module peut aussi bien décrire un robot, qu'une machine de production (avec ses outillages), ou même un ilot ou une ligne de production. Ici, entre en jeu la notion de niveau de description du module encore appelée granulométrie (Kanso, Berruet, and Philippe 2010). Compte tenu des différents contextes industriels, la précision de la description modulaire va fortement dépendre de la taille de l'entreprise, son secteur d'activité et de ses besoins. Certains mettront plus l'accent sur le module qui représente l'ensemble tandis que d'autres voudront un module qui représente ce qui se passe à des niveaux plus bas. Par exemple, pour une industrie ayant une seule ligne de production, le niveau système renvoie à la ligne, le niveau machine aux différents postes de travail, le niveau composant aux différents composants de ce poste de travail (convoyeur, station de travail, etc.), et le niveau sous composants aux différents constituants des composants (capteurs, moteurs,

---

<sup>7</sup> Définition inspirée de celle donnée par le dictionnaire Larousse en ligne <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/agr%C3%A9gat/1752>

etc.). On retrouve ici quatre niveaux de décomposition modulaire de la configuration pour cette industrie. Pour une autre industrie possédant une usine à plusieurs lignes de production, le niveau système qui décrit l'ensemble va correspondre à l'usine de production. Un niveau intermédiaire décrivant chaque ligne de production sera considéré, de même qu'un niveau machine, décrivant les différents postes de travail pour chaque ligne, un niveau composant pour les constituants de la machine. Ici, la décomposition est aussi sur quatre niveaux mais avec un niveau de précision en moins. Le choix du degré de précision dépend de l'étude qui doit être conduite. Toutefois, les modules doivent répondre aux caractéristiques énoncées précédemment. Dans tous les cas, le niveau le plus haut de la décomposition doit correspondre à l'ensemble du système étudié.

Notons aussi que, un module peut être un « module atomique », c'est-à-dire qu'il peut ne pas avoir de modules le constituant, il sera alors au niveau de granulométrie le plus bas possible pour ce module-là. Notons bien que le niveau correspondant au module atomique n'est pas le même pour tous les modules. Certains modules du niveau machine peuvent être atomiques, tout comme les modules de niveaux composants, sous composants, etc. Le module atomique correspond au niveau où s'arrête la décomposition modulaire du module considéré. Ce choix dépend bien sûr du degré de précision voulu.

L'agrégation des modules se fait au regard des différents aspects de celui-ci. Pour fonctionner, les ressources de production physiques doivent être reliées entre elles, de même, les logiques de contrôle de chaque module doivent fonctionner de manière cohérente. L'agrégation des ressources physiques donne naissance à l'implantation de la configuration (ou layout), tandis que la réunion des logiques de contrôle des différents modules donne la logique de contrôle du système. De la même manière, les performances du système (les KPIs) sont obtenues en agrégeant les différents KPIs des modules, et le modèle du système est la résultante de l'agrégation des modèles des modules le constituant. La **Figure 12** illustre cette proposition.

Cette approche permet de fédérer les considérations jusqu'ici données à la configuration par les chercheurs. On y retrouve la configuration aussi bien selon l'aspect physique que l'aspect logique. On y retrouve aussi les considérations relatives aux performances du système. Cette approche rend aussi bien compte du système que des éléments le constituant, ainsi que les différents niveaux évoquée par (Koren et al. 1999) et (Eguía, Villa, and Lozano 2017). Plus encore, elle prend en

considération les aspects issus de la modélisation du système (notamment la modélisation par simulation), permettant à ce formalisme de définition de s'aligner aux exigences de l'industrie 4.0 décrit entre autre par l'architecture RAMI 4.0 (Adolphs et al. 2015) (Contreras, Garcia, and Díaz Pastrana 2017). Cette vision modulaire de la configuration se veut assez générique pour contenir tous les paramètres jusqu'ici identifiés, mais aussi assez spécifique pour que chaque industrie ayant un système modulaire puisse s'y identifier. Décrire une configuration reviendra selon cette approche à décrire les modules la constituant.

Cependant, cette configuration est appelée à évoluer. C'est-à-dire, le système est appelé à être reconfiguré. Comment avec cette notion de modularité, pouvons-nous décrire cette évolution ? En d'autres termes comment la reconfiguration est-elle perçue selon cette approche modulaire ?

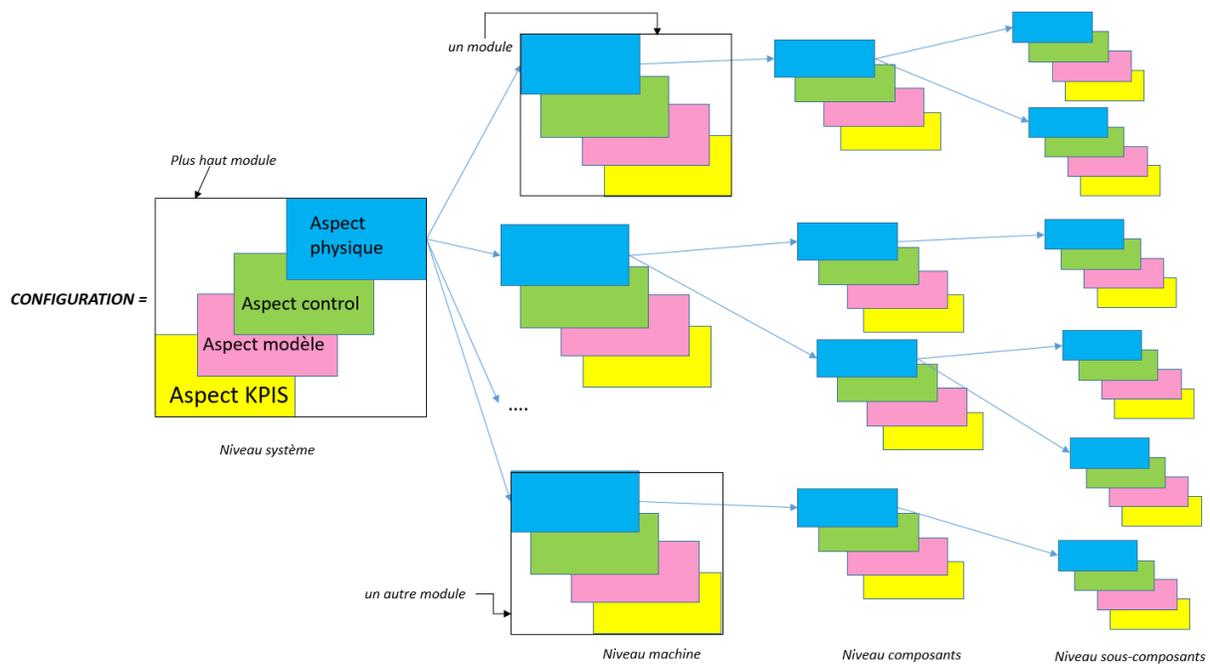


Figure 12: Vision modulaire et fractale de la configuration pour les RMS

## 2. La reconfiguration du RMS vue selon la modularité

Dans le [paragraphe II section 2](#), nous avons présenté l'évolution du module. Etant un élément constituant de la configuration, l'évolution du module a forcément une répercussion sur la configuration dans laquelle il se trouve. Le changement d'un des aspects du module induit un changement du module. Et si le module change, le tout obtenu par cohésion des modules lui aussi change, et par conséquent la configuration change. L'évolution d'un module engendre alors l'évolution de la configuration.

Ainsi donc, la reconfiguration selon l'approche modulaire consiste à faire évoluer les modules, et/ou leur agrégation. Cette évolution peut se faire de différentes manières en jouant avec les différents aspects du module. Etant donné le caractère fractal du module, cette évolution peut, elle aussi, être considérée sur différents niveaux. Deux configurations peuvent être constituées des modules ayant les mêmes aspects physiques mais seront différentes parce qu'une logique de contrôle change d'un module à un autre. Ceci est illustré avec la [Figure 13](#), la seule différence entre la configuration 1 et la configuration 2 se trouve au niveau des modules M2 et M5 qui ont le même aspect physique, mais diffèrent par le contrôle. De même, deux configurations ayant les mêmes modules mais agrégés différemment seront considérées différentes ([Figure 14](#)). Le fait de changer la logique de contrôle peut avoir une incidence sur les performances du module et également sur le modèle utilisé pour représenter ce module. Il en est de même pour la manière d'agréger les modules. Nous reviendrons sur cette notion d'agrégation dans la suite de ce chapitre. Avec cette vision modulaire une reconfiguration peut être évaluée sans avoir physiquement le module. En se servant de l'aspect modèle, le comportement et les performances de la configuration peuvent être évalués.

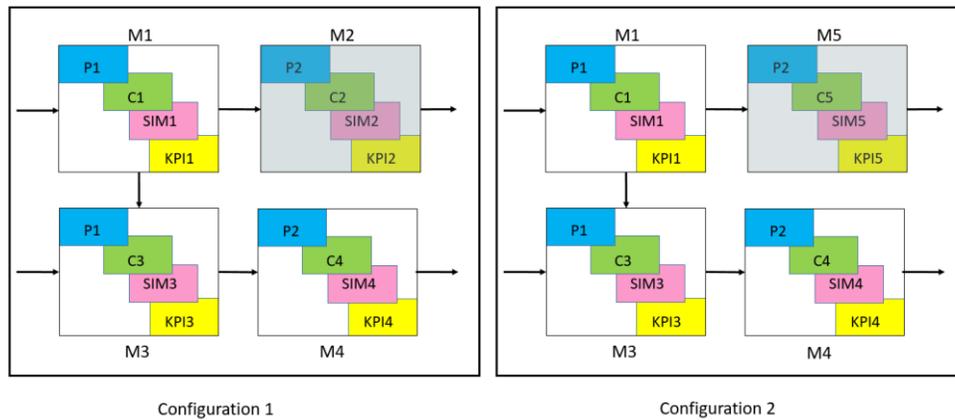


Figure 13: Différence entre deux configurations ayant les mêmes aspects physiques de modules

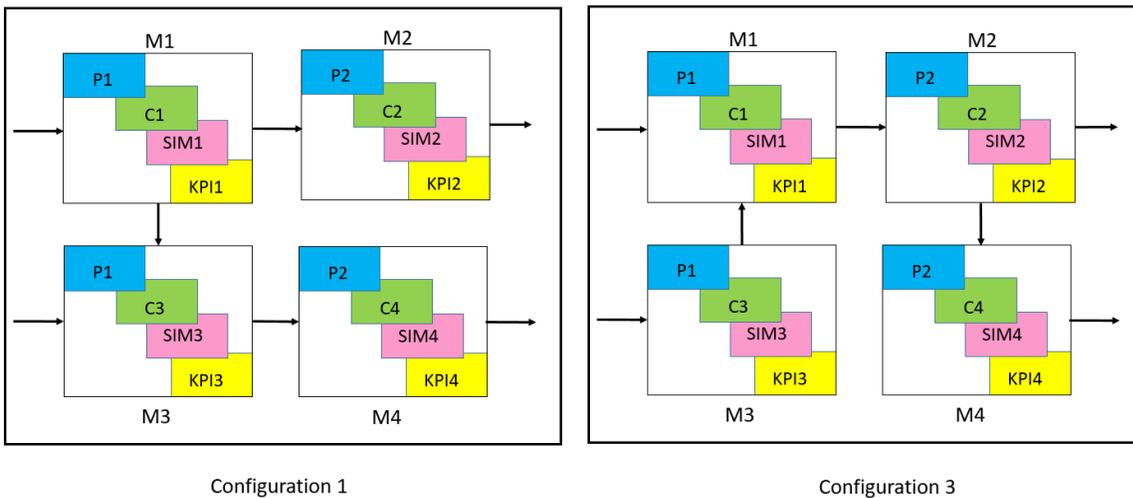


Figure 14: Deux configurations ayant exactement les même modules mais agrégés différemment

### 3. Les caractéristiques de la configuration

Plusieurs travaux relevés dans la littérature ont identifié un certain nombre de caractéristiques pour une configuration.

- La longueur et la largeur de la configuration représentent respectivement le nombre de machine en série et en parallèle dans le système (Spicer et al. 2002). Il s'agit en fait de déterminer pour le système quelle sera la disposition physique de ses éléments (le layout), en fonction de l'objectif de production, des contraintes d'espaces, et d'investissement.

- L'incrément minimal de conversion permet de savoir de combien le système doit être ajusté pour répondre à la demande (Maier-Speredelozzi and Hu 2002). Cet incrément généralement calculé en pourcentage, renvoie à ce qu'il faut ajouter ou diminuer à la production pour satisfaire la demande. Il est fonction du nombre de moyens de production présents dans le système, et donc, peut aussi être déterminé par le nombre de moyens à ajouter ou retrancher (Avikal et al. 2013) (W. Wang and Koren 2013). C'est un élément essentiel dans le choix de la configuration. En effet, l'objectif des RMS étant de produire « ce qu'il faut quand il faut », l'incrément minimal de conversion doit s'adapter au mieux aux différentes variations qui se présentent. Cet incrément s'adresse aussi bien à l'aspect physique qu'à l'aspect logique du module et est fortement lié à l'effort déployé pour mettre en place une configuration.
- L'effort de conversion, fortement lié à l'incrément de conversion peut être estimé par le temps et les coûts engagés pour passer d'une configuration à une autre (W. Wang and Koren 2012). Cet effort dépend aussi bien de l'incrément de conversion, de la structure des modules du système (selon que les éléments sont en série, en parallèle, mixte, etc.) que du niveau de reconfiguration du système (est-ce une reconfiguration du niveau système, machine, composant, ou sous composant ?). Le niveau de reconfiguration permet de dire si le système est profondément ou légèrement modifié (E Capawa Fotsoh et al. 2020). Plus l'effort est important, plus le niveau de reconfiguration est élevé. Cet effort permet de quantifier aussi bien les reconfigurations induites par les aspects physiques des modules, que celles découlant de la modification des aspects logiques des modules.
- (Koren, Hu, and Weber 1998) va relever d'autres caractéristiques liées à l'utilisation ou les performances du système, telles que le nombre de variations de produits supporté par le système, le niveau de qualité, le débit de production ou encore l'équilibrage du système (Son, Lennon Olsen, and Yip-Hoi 2001). Ces caractéristiques décrivent les KPIs du système et sont une conséquence d'utilisation du système.

Les caractéristiques autres que celles liées à la performance du système sont plus difficiles à évaluer. A notre connaissance, il n'existe pas de règles stables et établies permettant de les déterminer. Par exemple : la longueur et largeur du système dans le cas des dispositions mixtes où on a à la fois des machines en série et en parallèle restent difficile à évaluer. Les valeurs qui leur

seront données vont fortement dépendre de la stratégie de l'entreprise, des produits fabriqués et même du type du système de production. La longueur et la largeur de la configuration sont donc des caractéristiques assez subjectives. L'incrément minimal de conversion de même que l'effort de conversion sont tributaires des configurations de départ et d'arrivée. Ces deux caractéristiques ne sont pas intrinsèques à la configuration. Il est donc difficile de les utiliser pour caractériser la configuration en dehors du processus de reconfiguration. En effet la valeur de l'incrément et l'effort de conversion associés à une configuration A, vont dépendre s'il elle est reconfigurée pour devenir une configuration B ou pour être configuration C.

Il est important d'avoir des caractéristiques intrinsèques à la configuration, qui permettent non seulement de l'identifier mais aussi de pouvoir la comparer à d'autres configurations. Notre approche modulaire permet d'apporter des éléments de réponse à ceci. En effet, l'agrégation des modules de la configuration se fait suivant les quatre aspects des modules. Etant donné que la modification d'un de ces aspects entraîne la modification du module et donc de la configuration, nous pouvons affirmer qu'une configuration dépend fortement des modules qui la constituent et de l'agrégation de ceux-ci. Un même ensemble de modules agrégés différemment peut conduire à des performances différentes et affecter l'efficacité du système (M Reza Abdi 2005). Le choix d'une configuration doit donc se faire en considérant des modules à intégrer ainsi que la manière de les agréger. Selon notre approche modulaire, ce sont les modules et leur agrégation qui permettent de définir et caractériser une configuration.

#### IV. Exemple de configuration modulaire

Pour illustrer cette vision modulaire de configuration, nous proposons de considérer l'exemple de la ligne de production installée dans le hall du département QLIO<sup>8</sup> de l'IUT de Nantes et utilisée à des fins pédagogiques. La ligne est construite à partir d'éléments modulaires proposés par la société ELCOM ([elcom.fr](http://elcom.fr)), et la configuration décrite ici est présentée sur la Figure 17.

---

<sup>8</sup> QLIO : Qualité Logistique Industrielle et Organisation

La ligne est une ligne d'assemblage constituée de postes de travail, d'opérateurs (robot et humains) et de zones de stockage. Dans ce système, les produits sont transportés sur des palettes et sont obtenus en assemblant sur une quille, des disques de différentes couleurs (Figure 15). Le magasin à palettes se situe sur la ligne, tandis les quilles sont introduites dans le système par un robot. Lorsque l'assemblage est terminé, le robot remet les produits (Quille + rondelles) vers la sortie, et les palettes retournent au magasin si elles ont fini leur production, si-non elles repartent pour un autre tour de production.

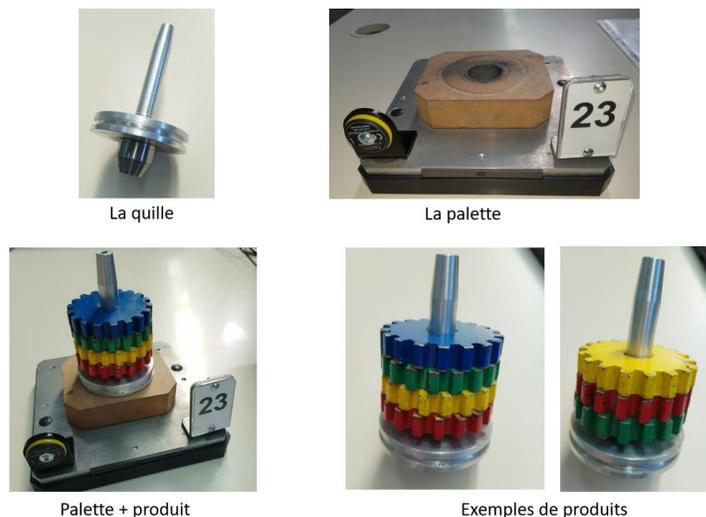


Figure 15: Description des éléments du produits

Trois niveaux sont identifiés : système, machine et composants. La ligne est essentiellement constituée de convoyeurs de différentes tailles. Ces derniers constituent le niveau composant. Par souci de simplification, nous allons nous arrêter à ce niveau de description. Le niveau machine est fait de poste de travail, de robot et d'opérateurs. La configuration décrite est faite de 4 postes de travail d'un opérateur et d'un robot cartésien.

Dans un premier temps, nous présentons un des modules de la ligne en détail (Figure 16). Par la suite, un tableau (Tableau 2) reprenant une décomposition modulaire de cette configuration est donné.

La Figure 16 représente un module du niveau machine ainsi que ses composants. Ce module est un poste de travail qui réalise bien une fonction dans le système (une opération du processus de fabrication est réalisée sur ce poste) et possède des interfaces qui lui permettent d'être reliés aux

autres éléments du système. Il répond bien aux caractéristiques d'un module. Cette même analyse peut être faite aux modules du niveau composant : le bloqueur indexeur par exemple a pour rôle de stopper la palette et la maintenir jusqu'à ce que l'opération réalisée sur le poste soit terminée. Le connecteur 180° permet d'orienter la palette en guidant son passage du convoyeur d'entrée vers le convoyeur de sortie. Chacun des modules de cette décomposition répond donc aux caractéristiques d'un module, peu importe le niveau considéré.

Ces différents modules ont une logique de contrôle leur étant associée, de même que des KPIs et un modèle de simulation. Par exemple, le poste de travail peut être géré soit en FIFO soit en CAF (clear a fraction). Ce qui donne lieu à deux modules possibles pour ce poste de travail. On aura par conséquent différentes configurations du système selon les modules du poste de travail.

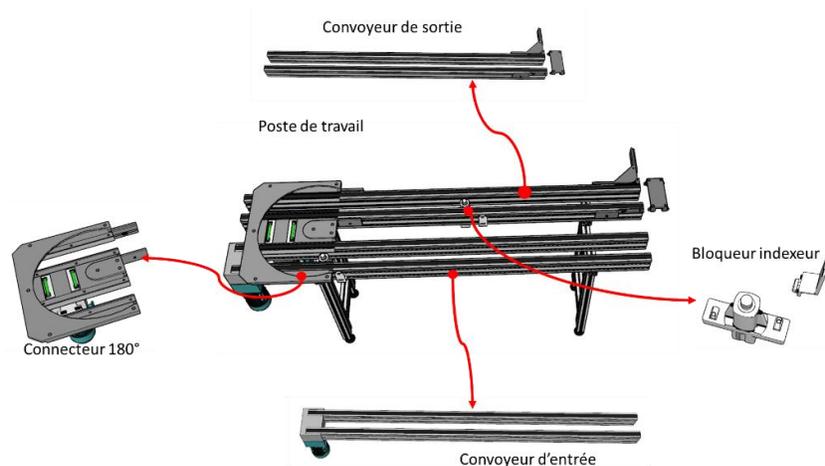


Figure 16: Exemple de vision modulaire d'un module du niveau machine et ses composants

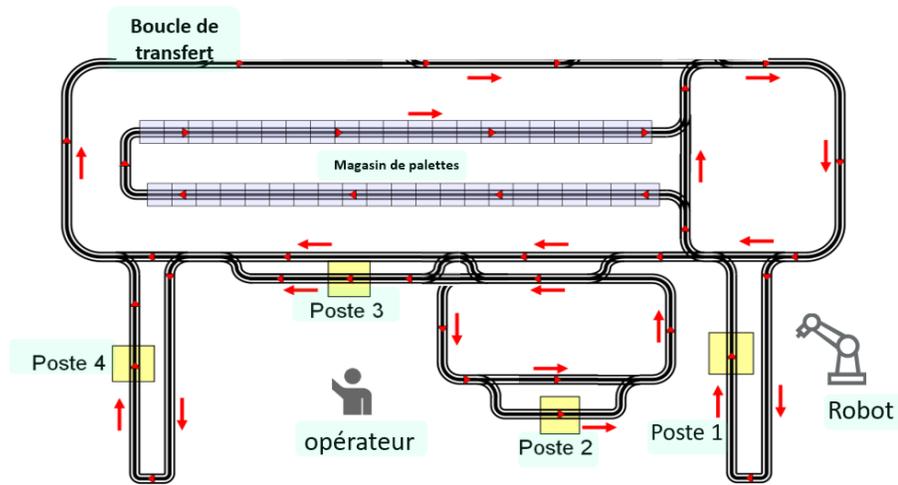


Figure 17: Représentation de la ligne d'assemblage du Hall QLIO

Tableau 2: Exemple de décomposition modulaire

Niveau	Système	Machine	Composants
Les différents modules par niveau	Ligne de transfert	Poste 1	Convoyeur d'entrée
			Convoyeur de sortie
			Connecteur 180°
			Bloqueur indexeur
		Poste 2	Boucle de stockage
			Convoyeur

			Bloqueur indexeur
		Poste 3	Convoyeur
			Bloqueur indexeur
		Poste 4	Convoyeur d'entrée
			Convoyeur de sortie
			Connecteur 180°
			Convoyeur d'entrée
		Boucle de transfert	Convoyeurs
		Magasin de palettes	Convoyeurs
		Opérateur 1	TOTO
		Robot	-

Dans cette décomposition, le robot du niveau machine est considéré comme un module atomique. C'est-à-dire qu'il est considéré comme ayant atteint son niveau de granulométrie le plus bas possible, il ne peut donc pas être décomposé. Toutefois, cette approche n'est pas universelle et reste propre à cet exemple. Dans des systèmes très robotisés par exemple où le robot est considéré comme essentiel, il peut être décomposé jusqu'au niveau de précision et granulométrie qui facilite son étude.

## V. Positionnement de la configuration

En parlant de configuration d'un RMS, on lui associe les aspects physique et logique de contrôle. Cependant ces considérations déjà évoquées dans la littérature sont souvent assimilées aux notions d'architecture, d'ordonnancement ou même pilotage. Dans cette section, nous proposons un positionnement de la configuration du RMS par rapport à l'ordonnancement, au pilotage et à l'architecture. En effet, nous pensons qu'avec la vision modulaire du système, les degrés de liberté d'ordonnancement et de pilotages peuvent être plus clairement identifiables.

### 1. La configuration par rapport à l'architecture

Il existe un lien fort entre l'architecture d'un système et sa configuration. Selon notre approche modulaire, la configuration renvoie à une agrégation des modules pris à différents niveaux. La configuration va définir non seulement les éléments utilisés mais aussi la manière dont ils sont agencés pour cette **utilisation effective**. L'architecture quant à elle représente l'ensemble des éléments du système, ainsi que les **interactions potentielles** entre ces éléments (Berruet 2007) (Kanso 2010). Tous les éléments d'une architecture ne sont donc pas forcément utilisés dans une configuration. Se rapportant à la notion de modules, l'architecture va correspondre à l'ensemble des aspects physique de modules (architecture physique) ou aspects logiques (architecture logique) à disposition. C'est-à-dire, l'ensemble des ressources, et logique de contrôle existant pour le système, et pouvant être mis en association pour la formation de modules. Leur utilisation est potentielle et devient effective quand ils sont utilisés pour une configuration. Une explication est donnée sur la figure ci-dessous **Figure 18**.

Plus concrètement, considérons une Architecture  $A$  constituée d'éléments  $e_i$  (les  $e_i$  renvoient à des ressources physique, ou à des logiques de contrôle). Les configurations  $C$  obtenues à partir de cette architecture seront définies comme un sous ensemble constitués d'éléments  $e_i$  :

$$C: \quad A \rightarrow A \\ \{e_i\} \rightarrow C_{\{e_i\}}$$

L'architecture est donc un ensemble plus vaste contenant des configurations. La configuration résulte de l'utilisation des éléments de l'architecture. De ce fait pour une même architecture, on peut avoir plusieurs configurations différentes (plusieurs agrégations différentes pour les modules). L'architecture physique est l'ensemble des moyens de production du système, et l'architecture logique représente l'ensemble des logiques de contrôle possibles pour ce système

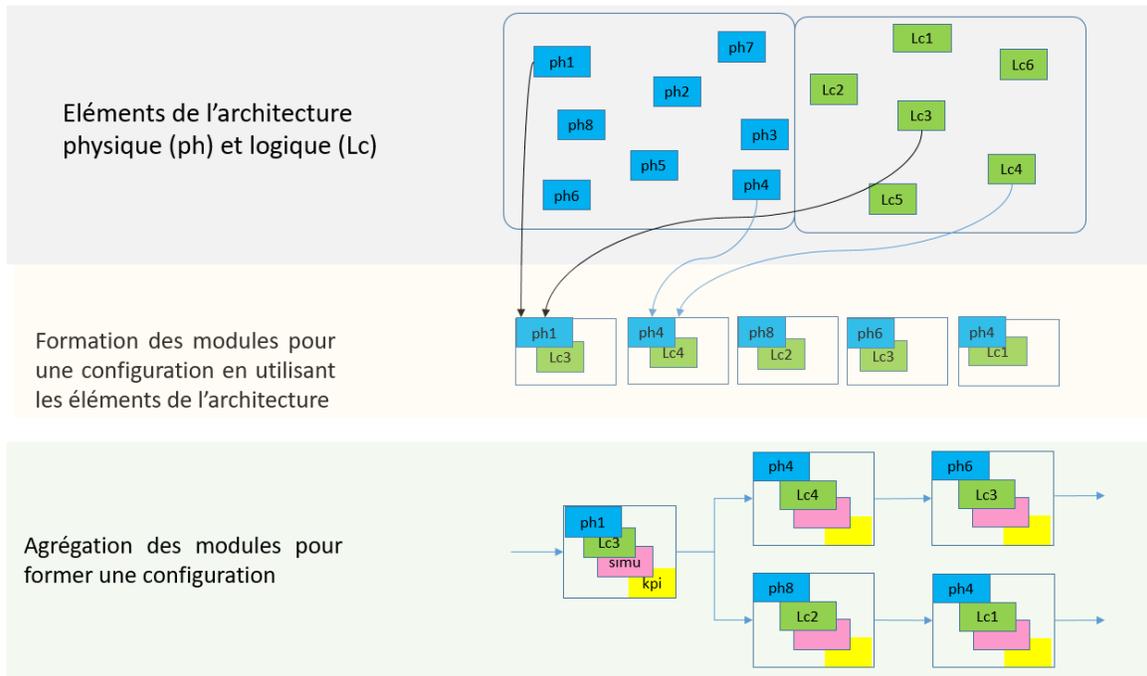


Figure 18: Explication différence entre configuration et architecture pour un RMS

## 2. La configuration par rapport à l'ordonnancement et au pilotage

La configuration physique du système est ce qu'on appelle le layout ou encore l'implantation. Elle résulte de l'agrégation des aspects physiques des modules constituant le système. La configuration logique quant à elle décrit l'intelligence au niveau système, correspondant au niveau le plus haut de la description modulaire. Il s'agit de l'agrégation des logiques de contrôle des différents modules qui décrivent les décisions prises par le système et les modules afin de produire. On voit naître ici l'aspect pilotage du système, qui est défini par (Trentesaux 2002) comme consistant à décider des

consignes pertinentes à donner à un système pour atteindre un objectif donné. Le pilotage du RMS peut ainsi être assimilé à sa configuration logique selon notre approche modulaire. Notons qu'à cette agrégation peut s'ajouter une logique de synchronisation des activités des différents modules. C'est donc l'agrégation des logiques de modules et les potentielle logiques de synchronisation qui définissent le pilotage du système de production.

L'ordonnancement consiste à organiser les tâches sur les ressources dans le système et peut être vu comme l'utilisation des aspects physiques tout en tenant compte de la logique de contrôle. En effet, l'allocation des tâches aux ressources dépend de l'objectif de production, de la disponibilité de ces ressources et bien sûr du type de pilotage appliqué dans le système.

En somme, la configuration d'un RMS est un ensemble qui englobe à la fois le pilotage et l'ordonnancement. Ces deux éléments ont un impact considérable sur les performances du système. Le pilotage guide les décisions des modules sur différents niveaux, tandis que l'ordonnancement au niveau temporel, structure l'utilisation des modules de la configuration.

## VI. L'agrégation de module : une difficulté de la modularité

Jusqu'ici nous avons présenté la vision modulaire de la configuration pour les RMS. Cette approche nous permet de décrire et caractériser la configuration d'un système grâce à ses modules et leur agrégation. Il a été montré plus haut comment la modularité aide à réduire la complexité du système, tout en donnant des informations assez précises sur chaque niveau de décomposition. Ceci aide à un diagnostic précis du RMS et guide une prise de décision de reconfiguration. Cependant, il existe des limites à l'utilisation de la modularité.

Après la décomposition modulaire du système il faut pouvoir agréger les différents aspects pour conduire une décision de reconfiguration. En effet, l'agrégation consiste à déployer des moyens pour combiner et regrouper plusieurs valeurs en une seule, de sorte que le résultat final de l'agrégation prenne en compte, de manière spécifique, toutes les valeurs individuelles (Moulahi 2015). C'est une notion assez utilisée dans les domaines de l'économie, statistiques, finance, la recherche de données en informatique, où les valeurs à agréger sont soit de type numériques, soit de type chaîne de caractères. Les KPIs du RMS sont très souvent de ces types. Pour ces valeurs qui

s'apparentent aux KPIs, il existe des méthodes d'agrégations telles que fonctions mathématiques (minimum, maximum, intégrale, etc.) (Bouyssou et al. 2006). Ces fonctions sont à choisir avec précaution pour éviter la perte d'information. Les compromis autour de ces fonctions vont très souvent dépendre du contexte et des objectifs voulus (Erica Capawa Fotsoh, Castagna, et al. 2020). Plus il y a de modules, plus il y aura de données, et plus de risques de perdre d'information.

Dans l'approche modulaire proposée dans le cadre de ces travaux, l'agrégation ne concerne pas seulement les KPIs, mais aussi les aspects physique, logique de contrôle et modèle. L'agrégation des aspects physique renvoie au choix de l'implantation des moyens de production dans le système. On a par exemple les formes d'implantation en U, en S, en ligne droite ou encore les formes circulaires. On peut aussi avoir des implantations en îlot, en parallèle etc., l'entreprise privilégie un choix d'implantation en fonction de ses contraintes d'espace.

Pour les logiques de contrôle il s'agit de déterminer la logique de contrôle à appliquer au niveau système de manière à assurer la coordination des modules des différents niveaux (Leitão 2004). Pour cela la logique du module au niveau système doit tenir compte à la fois des logiques de chaque module mais elle doit aussi prendre en compte l'organisation de l'activité de l'ensemble des modules. Ainsi, la logique du module au niveau N est l'agrégation des logiques des modules (au niveau N-1) le constituant, augmentée de la logique de synchronisation de l'activité des modules le constituant. Cette notion d'agrégation de logique de contrôle est beaucoup utilisée dans le domaine des systèmes de production holonique (Jimenez et al. 2015).

En ce qui concerne les modèles, les méthodes d'agrégation consistent à faire fonctionner ensemble les modèles des différents modules. Dans cette thèse, les modèles utilisés pour représenter les modules sont des modèles de simulation. Pour ces modèles il existe un standard HLA (High Level Architecture) qui donne des directives quant à l'agrégation des modèles (IEEE 1516 2000). Lorsque les simulateurs utilisés varient d'un module à l'autre, l'agrégation est plus complexe car doit faire intervenir l'interopérabilité des différents outils de simulation (Pedrielli et al. 2011). Par contre, si l'outil utilisé pour les modules est le même, l'agrégation est allégée. Nous avons explicité et montré cela dans (Erica Capawa Fotsoh, Castagna, et al. 2020).

Nous avons ici donné un aperçu du domaine de l'agrégation, indispensable quand on fait appel à la décomposition modulaire. Les références citées dans ce qui précède sont à titre indicatif. L'agrégation est une notion bien plus vaste qui va au-delà des travaux de cette thèse. Toutefois, il est important de la prendre en considération lors de la décomposition modulaire. La complexité de l'agrégation augmente avec la finesse de la granulométrie de la décomposition modulaire. Autrement dit, plus le système est décrit finement, plus il est difficile d'agréger et meilleure sera l'analyse du système. Ainsi donc il est important d'avoir le juste milieu entre la finesse de décomposition du système et la complexité de l'agrégation des différents aspects, pour tirer avantage de cette approche modulaire.

## Conclusion

Nous avons dans ce chapitre proposé un formalisme de description et définition de la configuration de RMS en se servant d'une approche modulaire. Cette approche permet de caractériser la configuration tout en prenant en compte son aspect évolutif. Nous avons ainsi pu apporter des éléments de réponse au premier verrou identifié pour cette thèse. Le formalisme se veut assez général pour s'adapter à un grand nombre de systèmes à la condition qu'ils soient modulaires. Ce formalisme permet aussi de répondre aux manques relevés pour les définitions jusqu'ici identifiées dans la littérature. Les quatre aspects identifiés pour le module, permettent de prendre en compte les changements de la commande, de la partie opérative (physique), tout en incluant une déclinaison sur les modèles et les performances.

L'un des avantages de cette vision modulaire est qu'elle permet d'avoir une analyse approfondie du système afin de mieux guider les décisions liées à la reconfiguration. Dans la suite, nous proposons un modèle de données de référence permettant de supporter ce formalisme.

## CHAPITRE 3 : VERS UN MODELE DE DONNEES DE REFERENCE POUR LES CONFIGURATIONS DES RMS

Ce chapitre apporte des éléments de réponse au second verrou identifié. Il s'agit de proposer un moyen aux entreprises de capitaliser sur les données de leur système de production afin de simplifier le processus de reconfiguration. La proposition faite ici fait suite à la définition de la configuration et à la vision modulaire du système décrit dans le **chapitre précédent**. Cette démarche s'inscrit dans un processus global de gestion de connaissances du système de production, et s'aligne sur les besoins exprimés par les industriels.

Avant toutes choses, nous souhaitons apporter quelques précisions. Il ne s'agit pas pour nous de redéfinir la connaissance ni de mener une étude approfondie sur ce vaste concept. Mais plutôt, de la comprendre dans sa globalité, en évitant les polémiques qui l'associe ou la dissocie des notions telles que le savoir, le savoir-faire, l'information, les données, etc. L'idée pour nous est de montrer comment de façon générale, les propositions que nous ferons dans ce chapitre aident ou marquent une avancée dans le domaine de la gestion de la connaissance en entreprise, et plus particulièrement dans le secteur de production industrielle dotée de système de production de type RMS modulaires. La connaissance dont nous parlons ici est donc à considérer et comprendre comme un ensemble global. Quelques fois nous allons parler de données ou même d'informations, mais ceci renvoie de manière générale à la connaissance prise dans sa globalité.

### I. Une base de données comme outil aidant à la gestion de connaissances

La connaissance au sein d'une entreprise est un capital propre qu'il convient de considérer et de gérer le mieux possible. Elle fournit à l'entreprise une forte capacité à suivre l'évolution de son environnement. Tout en remplissant les fonctions de production qui le caractérisent, un système de production crée et accumule en parallèle de la connaissance. Cette connaissance quand elle est identifiée et bien utilisée, génère des gains considérables notamment dans les activités de conception (Ermine 2003).

Dans le secteur industriel de production en particulier, les systèmes étaient autrefois considérés comme stables et avaient pour objectifs de produire durant des périodes importantes, avec des

processus homogènes et pérennes. Mais de plus en plus, le système jadis considéré comme stable nécessite une réactivité très forte. Afin de réduire leur vulnérabilité face à cette dynamique, assurer leur pérennité et renforcer leur activité face à un environnement qui évolue en permanence, (Ermine 2003) considère le patrimoine de connaissance de l'entreprise comme un outil précieux. La connaissance apparaît alors comme un élément de stabilité pour un système faisant face à un environnement changeant. De nombreuses entreprises en ont pris conscience et pensent désormais que pour maîtriser ces variations certaines données devraient systématiquement être détenues par les acteurs de l'entreprise (Hatchuel, Masson, and Weil 2002). Pour le diagnostic des défauts des systèmes de productions automatisés par exemple, (Nguyen et al. 2016) propose une méthodologie qui s'appuie sur les données historiques des équipements. La première difficulté qui apparaît alors, est de savoir où localiser ces données (Ermine et al. 1996).

L'approche de la gestion des connaissances doit être cohérente, originale et de surcroît être efficace par rapport aux objectifs. (Ermine 2003) propose que celle-ci réponde à 3 objectifs : la capitalisation, le partage et la création.

- La capitalisation consiste à accumuler le capital de connaissance dans l'objectif de le valoriser. Il s'agit de le stocker, le préserver et le protéger. L'enjeu ici est de « savoir ce que l'on sait ». En d'autres termes, il s'agit de pouvoir identifier et conserver la connaissance.
- Le partage consiste à faire circuler l'information entre différents acteurs de l'entreprise. Il s'agit de pouvoir assurer des échanges et collaborations entre la connaissance de différentes personnes, visant à répondre à un objectif commun. Le but ici est de « passer de l'intelligence individuelle à l'intelligence collective ».
- La création est un objectif fondamental, du fait qu'elle permet de valoriser les deux précédents. En effet la réactivité de l'entreprise dépend de sa capacité à utiliser ce qu'elle sait pour créer ce qu'il lui faut. L'enjeu ici est d'« innover pour survivre ».

Ramené au contexte de la reconfiguration des systèmes de production, ces trois objectifs cadrent bien avec les besoins exprimés par les industriels impliqués dans cette thèse. En effet, la reconfiguration rapide et efficace d'un système de production demande une connaissance approfondie du système, et la prise en compte de plusieurs données à la fois. Tel qu'évoqué dans

le chapitre introductif, les industriels voudraient devant une situation de reconfiguration, être capables de réutiliser les données qui ont autrefois servies. Ainsi, ces industriels voudraient « savoir ce qu’ils savent » afin de « créer ce qu’il leur faut ». Pour cela, la connaissance relative au système doit pouvoir être capitalisée, c’est-à-dire stockée dans le but d’être réutilisée.

Pour aller dans ce sens, nous proposons d’utiliser une base de données pour stoker les configurations du système. Ces configurations peuvent avoir été réellement mises en place ou elles peuvent avoir été étudiée à travers des modèles. La base de données pourra être interrogée devant chaque situation de reconfiguration, ou être alimentée de nouvelles configurations. Ainsi les données du système seront stockées, partagées et réutilisées au besoin. Mais pour stocker les données, il faut au préalable les organiser. C’est dans cette optique, que nous proposons un modèle de données de référence.

## II. Un modèle de données de référence

Le modèle de données que nous proposons a pour but de structurer les données relatives aux configurations du RMS. Etant donné le contexte de la thèse (différents secteurs industriels impliqués), il serait illusoire de penser qu’un seul modèle puisse contenir toutes les données des différents systèmes de production de différents secteurs d’activité. Toutefois, la vision modulaire que nous adoptons pour les RMS, nous permet de définir et décrire les configurations d’un système modulaire quelconque, peu importe son secteur d’activités. C’est donc dans cette même logique, que nous allons proposer un modèle de données de référence qui va permettre d’organiser et de structurer de manière formelle les données relatives au système de production.

Le formalisme que nous choisissons d’utiliser est l’UML (Unified Modelling Language). L’UML est un langage unifié, qui permet de modéliser les bases de données au travers des outils tels que les digrammes de classes.

### 1. Quelques prérequis du diagramme de classes

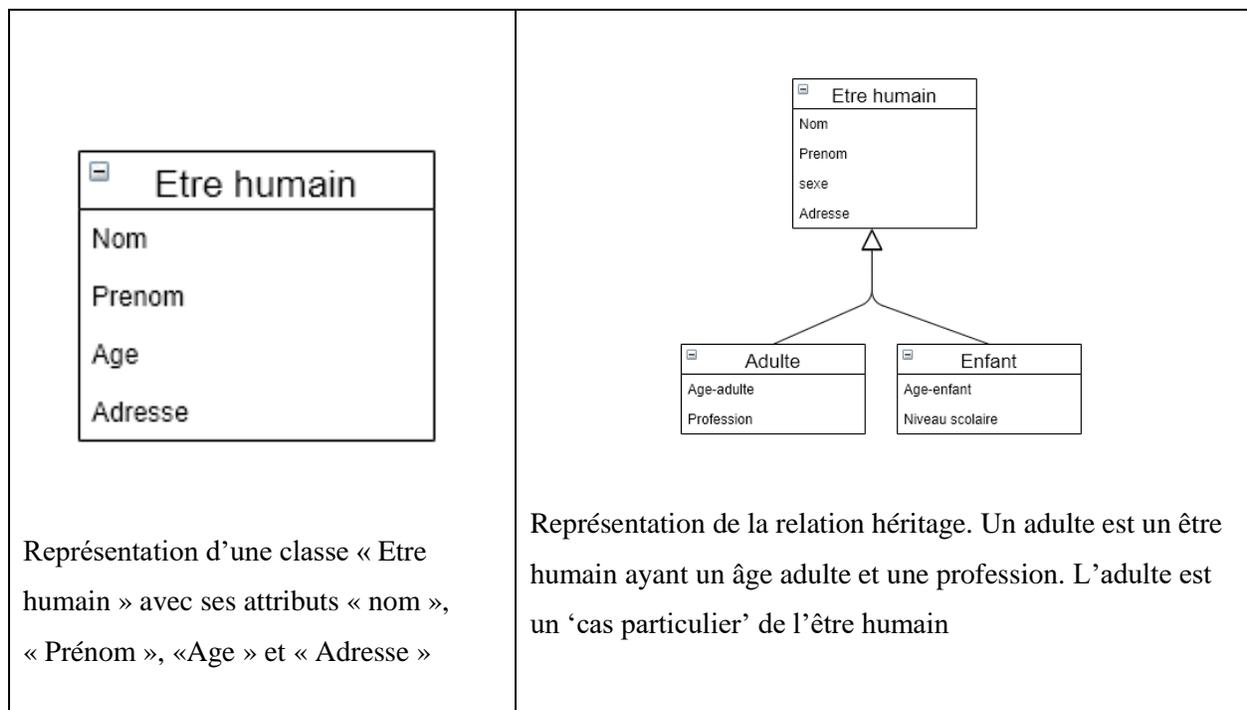
Le diagramme de classes représente en vue statique des classes et des relations entre-elles. Une classe définit et décrit le comportement d’un objet qui représente un élément du système. Les

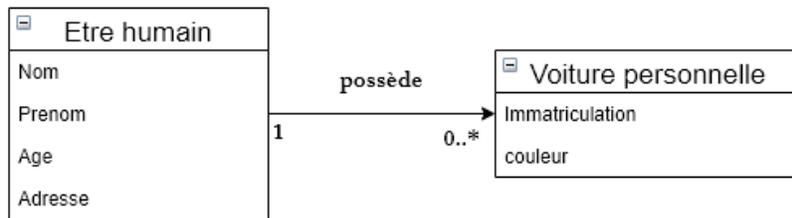
relations entre les classes peuvent être de différents types et UML utilise un formalisme pour les représenter.

Pour le modèle de cette thèse, nous utiliserons principalement les relations d'association, d'héritage, d'agrégation ou de composition (Tableau 3). L'association met en relation deux classes en indiquant le rôle de chacune dans cette relation. L'agrégation décrit des éléments qui sont constitués d'autres éléments. L'héritage quant à lui décrit la relation de deux classes qui ont certains attributs en communs. Les chiffres portés par les différentes relations sont appelés cardinalités, et permettent de définir le rôle de chaque classe dans la relation. Pour en savoir plus sur la modélisation UML vous pouvez vous référer à (Muller and Gaertner 2000).

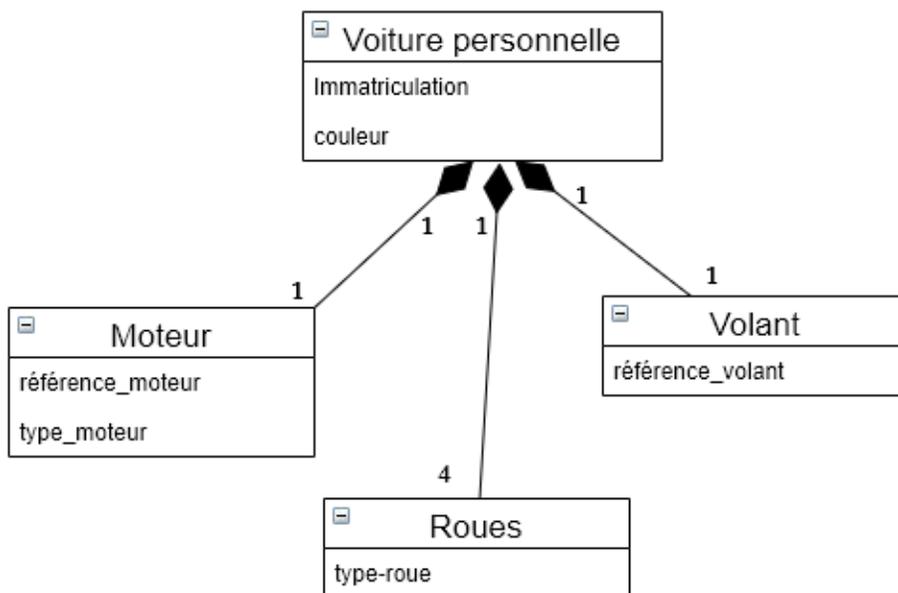
Partant de cette logique, le modèle proposé sera d'une part, assez général pour englober les RMS qui répondent à la condition de modularité, et d'autre part, assez flexible pour permettre à chaque entreprise de le personnaliser. De plus, un digramme de classes est évolutif, puisqu'il est possible d'ajouter/retrancher des classes et même des attributs de classes au modèle, bien sûr en respectant le formalisme de modélisation UML

Tableau 3: Représentation des éléments de modélisations utilisés





Représentation d’une relation d’association. Un être humain possède 0 ou plusieurs voitures personnelles



Représentation de la relation d’agrégation. Une voiture personnelle est composée de de 4 roues, un volant et 1 moteur.

## 2. Le *build-up* du modèle

Dans cette partie ne nous construisons pas à pas le modèle de référence en traduisant chaque considération de l’approche modulaire par un diagramme de classes. Afin de construire le diagramme de classe, il est important d’identifier les objets du système qui sont seront représentés,

de même que les attributs permettant de les décrire. Chaque élément que l'on souhaite décrire dans la configuration sera alors considéré comme une instance d'une classe, ayant des interactions avec d'autres instances de classes. Dans cette section, nous expliquons le choix des classes, des liens entre elles, et leurs attributs. Les attributs marqués dans les classes le sont à titre indicatifs, afin de rendre l'explication plus claire.

### *2.1. Le modèle décrivant le module*

Pour la représentation du module, nous partons du principe selon lequel le module est obligatoirement constitué d'un aspect physique, même si celui-ci n'existe pas encore de manière tangible. Dans une configuration, cet aspect physique peut être contrôlé par une logique de contrôle tout au plus, et représenté par un modèle de simulation. Le module ainsi formé peut-être évalué à travers plusieurs KPIs. Cependant, il peut arriver que l'évaluation d'un module ne soit pas jugée pertinente. Dans ce cas le module n'aura pas de KPI le décrivant. Ceci est traduit par les cardinalités des différentes relations. Des exemples d'attributs pouvant être utilisé pour décrire les différentes classes sont indiqués sur la **Figure 19**.

Dans un système de production, il n'y a pas que des machines, on peut aussi y retrouver des opérateurs. Ces opérateurs ont les mêmes caractéristiques que les modules ; C'est-à-dire, ils ont un aspect physique, une logique de contrôle, des performances de même qu'un modèle de simulation pour les représenter. Mais aussi, ils ont cette particularité d'avoir des compétences bien spécifiques et de pouvoir être assignés à d'autres modules dans le système. Les opérateurs sont donc des cas particuliers de modules. Ceci se traduit par la relation d'héritage entre les classes module et module-opérateur. Notons aussi que des machines telles que les robots, peuvent être décrit comme des module-opérateur, du fait qu'ils peuvent être utilisés sur d'autres machines pour effectuer des opérations.

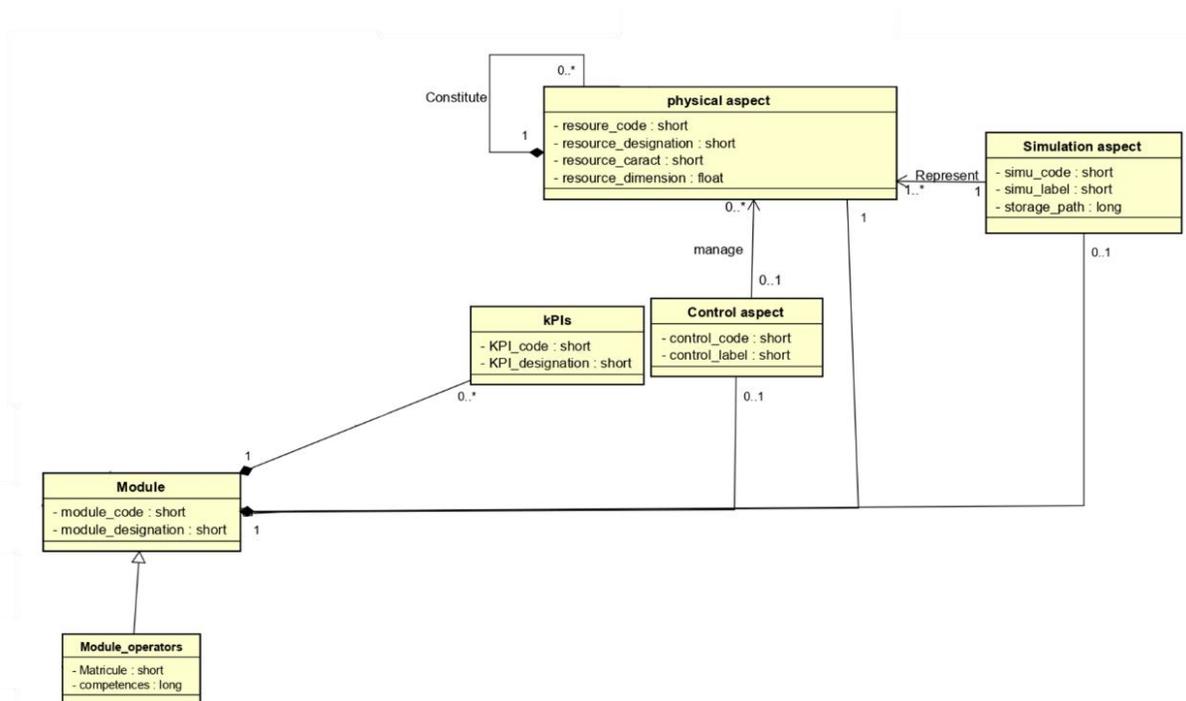


Figure 19: Diagramme de classes décrivant le module

## 2.2. Le modèle décrivant la configuration

Pour former une configuration, les différents modules sont agrégés. Cette agrégation entraîne une certaine disposition de chacun des modules, il s’agit de leur implantation, décrite par la classe *Layout*. L’utilisation des modules induisent des performances qui vont dépendre de la configuration dans laquelle ils se trouvent, c’est-à-dire de l’agrégation.

Dans ce modèle, les opérateurs sont utilisés pour réaliser certaines tâches au cours du processus de fabrication et sont affectés à un ou plusieurs autres modules au sein d’une configuration (machines ont besoin d’opérateur pour être utilisées). Cette affectation donne des performances spécifiques à une configuration, car les opérateurs ont généralement des compétences différentes. Aussi, la sécurité des opérateurs dans des environnements de plus en plus automatisés (avec les robots par exemple) est très souvent questionnée, et le choix d’une configuration devrait tenir compte de cette contrainte comme le souligne (Sallez, Berger, and Bonte 2020). Par conséquent, le changement de

l'affectation module/opérateur pour des raisons de compétences ou de sécurité, modifie la configuration, et constitue une reconfiguration. En entreprise, cette affectation module/opérateur est une donnée importante à conserver, et l'analyse de la performance ou des risques de sécurité d'un opérateur sur un poste de travail, peut être une source de reconfiguration. Nous proposons alors d'intégrer les opérateurs dans le modèle décrivant la configuration. Le diagramme de classe qui décrit l'agrégation de modules pour former une configuration est donnée en **Figure 20**.

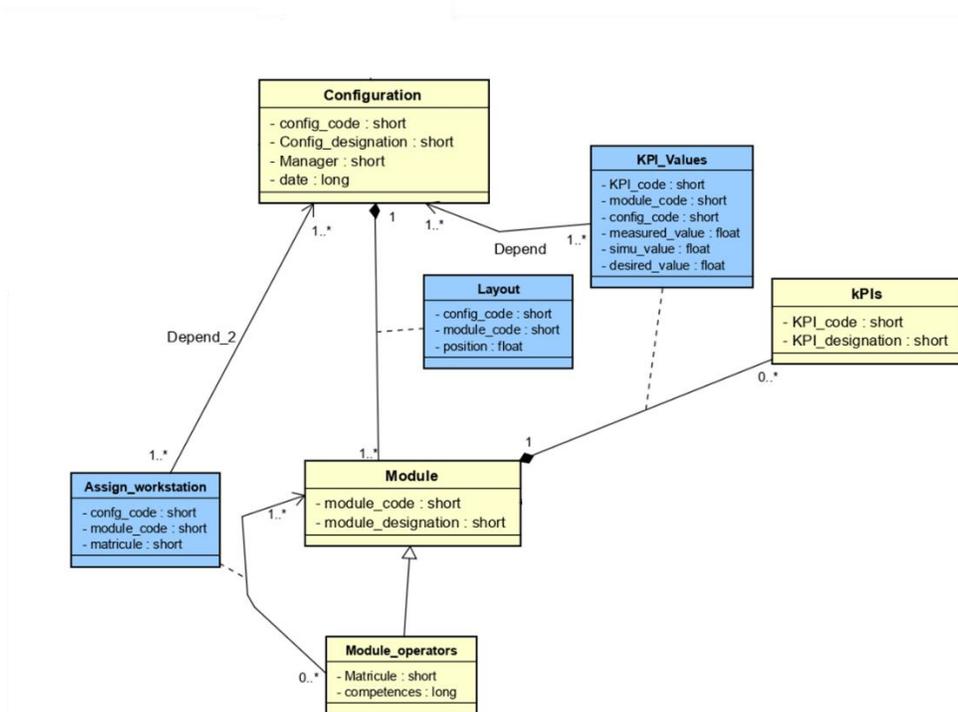


Figure 20: Diagramme de classes décrivant la configuration comme agrégation de modules

### 2.3. Le modèle décrivant la configuration dans son contexte d'utilisation

Les configurations sont définies pour satisfaire un contexte de production, et pour fabriquer des produits. En particulier, les RMS sont construits pour fabriquer une famille de produits (Goyal, Jain, and Jain 2013a). Par conséquent, les données relatives à la description de la configuration doivent inclure le contexte dans lequel cette configuration est utilisée, les produits fabriqués, ainsi que le process d'obtention de ces produits.

Les produits fabriqués dans une configuration servent à répondre à un contexte bien défini. Une configuration peut ainsi satisfaire plusieurs contextes de production et fabriquer un ou plusieurs produits. Ces produits ont une gamme logique décrivant leur processus de fabrication. La gamme logique qui décrit le processus d'obtention du produit est à dissocier de la gamme opératoire qui décrit les opérations qui conduisent à l'obtention du produit.

En effet, un système de production est appelé à délivrer un certain nombre de services, appelés fonctions (Berruet 1998). Ces fonctions représentent la réponse du système ou d'un composant du système lorsqu'il fonctionne normalement et indépendamment de l'environnement dans lequel il est sollicité (Toguyeni, Craye, and Gentina 1993). On va parler d'opérations, lorsqu'une fonction sera assignée à une ressource du système. C'est-à-dire, lorsqu'une fonction sera associée à un élément physique du système, consommant du temps et ayant une capacité limitée. (Voir Figure 21) Ainsi, pour une même fonction du système, on peut avoir plusieurs opérations. Par exemple la fonction « Usinage » dans un système peut être assignée soit à une machine à commande numérique, soit à une machine traditionnelle. L'opération effectuée par la machine à commande numérique est différente de celle effectuée par une machine traditionnelle car la ressource utilisée est différente, et le temps opératoire peut aussi être différent. Mais dans les deux cas il s'agit de la même fonction « usinage ». L'utilisation de la ressource va dépendre de l'ordonnement du système ou même des performances attendues. Toutefois, il est important de signaler que dans une même configuration un produit peut être fabriqué selon différentes gammes logiques, on parle de flexibilité de la gamme.

La séquence ordonnée d'opérations nécessaire à la réalisation d'un produit est appelée gamme opératoire. Etant donnée qu'une opération est rattachée à une fonction, on peut également associer à une gamme opératoire une séquence de fonction correspondante (gamme logique). Cette séquence de fonction est appelée gamme logique, et elle définit un processus de fabrication du produit. De manière générale, l'opération décrit ce qui est fait et où est-ce cela est fait (aspect effectif), tandis que la fonction décrit ce qui doit être fait (aspect normatif) (Trentesaux 2002). Cette notion de fonction permet alors d'avoir une vision macro et d'anticiper sur les capacités fonctionnelles d'une configuration. Un produit sera affecté à une configuration si et seulement si celle-ci dispose des fonctions qui permette de le réaliser. En l'absence d'une fonction dans une

configuration, une reconfiguration peut être envisagée pour ajouter ou modifier un produit de la configuration.

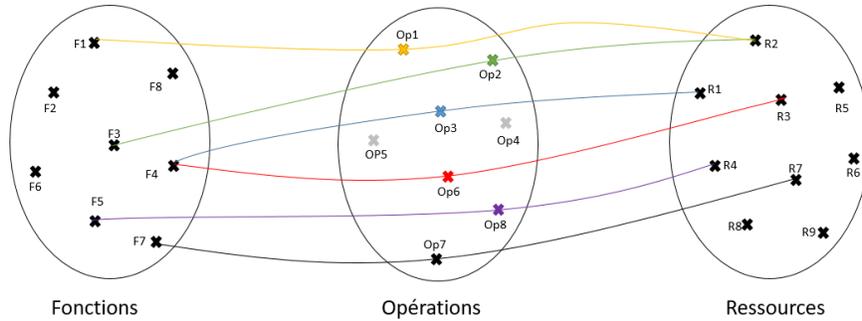


Figure 21: Relation entre les ressources physique, les fonctions et les opérations

Le digramme de classe qui permet de représenter la configuration comme évoluant dans un contexte de production et fabricant des produits est donné en Figure 22.

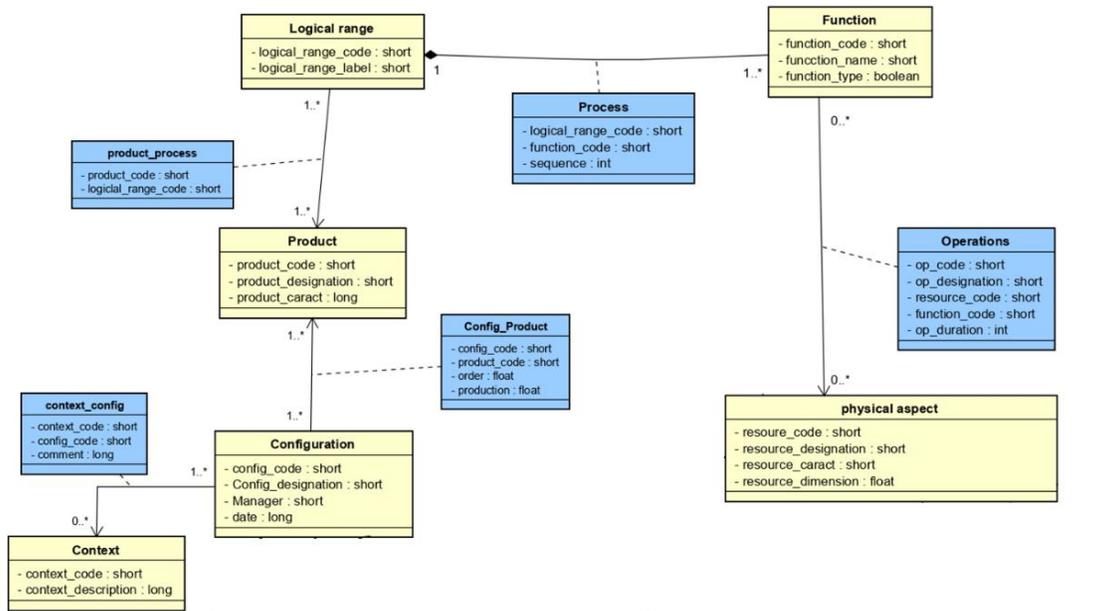


Figure 22: Diagramme de classes décrivant la configuration évoluant dans un contexte de production



### III. Du modèle de données de référence à une base de données de configurations

#### 1. Passage du modèle de données à la base de données

Le modèle de données ainsi proposé sert à construire une base de données de configurations. Un certain nombre d'étapes préalables est nécessaire pour mener à bien le passage du modèle de référence à la base de données. Nous proposons de suivre les étapes (voir Figure 24) suivantes afin d'alléger et fluidifier le passage du modèle de données à une base de données décrivant le système

- Tout d'abord, le système doit être correctement circonscrit. Il s'agit de définir la limite du système à considérer, afin de mieux appréhender la décomposition modulaire d'une part, et d'identifier les données pertinentes à saisir dans la base de données d'autres part. De cette manière, les attributs des différentes tables seront facilement identifiables. S'agit-il de toute l'usine ? d'un système de l'usine ? d'une ligne de production ? etc. La délimitation du système dont l'on souhaite conserver les données dans la base de données est une étape très importante.
- Ensuite, identifier les ressources ainsi que les logiques de contrôle de ce système. Il s'agit de constituer les architectures physique et logique du système. Par la même occasion, repérer les KPIs du système, de même que les modèles de simulation représentant les éléments identifiés.
- Les différents modules du système sont ensuite identifiés, formés et classés selon leur niveau (système, machine, composants, etc...). Il convient à cette étape d'aligner l'identification des modules avec le niveau de décomposition désiré. L'agrégation des modules, notamment des aspects KPI va dépendre de ce niveau de décomposition. A cette étape, il est aussi important de définir un système de codification (clé primaire) pour faciliter la recherche de données par la suite. Une fois de plus, chaque entreprise peut

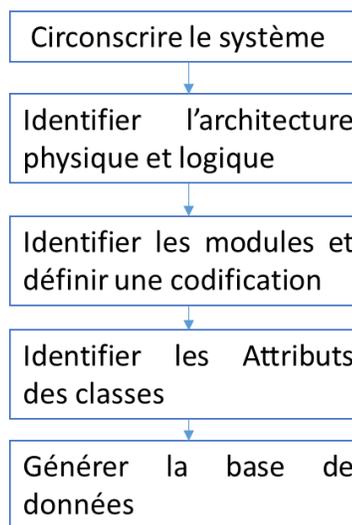


Figure 24 : Etapes de passage du modèle de données à la base de données

adopter une codification qui lui est propre et surtout comprise par les utilisateurs de la base de données.

- Une fois les modules identifiés, il est important de recenser les données pertinentes que l'on souhaite conserver. Il s'agit en fait d'identifier les attributs des classes qui décrivent le mieux le système étudié. Il est important de rappeler que toutes les classes possèdent une clé primaire, c'est une règle de la modélisation UML. Il peut s'agir des codes comme expliqué plus haut, ou des nombres qui s'auto incrémentent. Les codes seront nécessaires pour les classes dites principales, où la recherche de données est tributaire de l'unicité de ce code (ces classes sont de couleur jaune sur la Figure 23). Les nombre qui s'auto incrémentent seront utilisés pour les classes dont les codes ne sont pas indispensables à la recherche de la donnée. Elles sont appelées classes d'association en langage UML (et sont de couleur bleue sur la Figure 23). Ici les attributs qui viendront apporter plus de précision à la description de chaque classe sont identifiés.
- A ce stade, les tables de la base de données peuvent être créées en respectant le formalisme UML, et la base de données obtenue peut être alimentée.

## 2. Illustration avec le cas QLIO

La structure de la base de données a été construite à l'aide du modèle de référence et en suivant les étapes ci-dessus. Le passage des classes aux tables de bases de données peut se faire manuellement, ou automatiquement à l'aide de différents outils tels que MYSQL, Microsoft Access, SQLite, etc. Dans notre cas, un programme sous Python a été utilisé pour la création automatiquement des tables, une fois que les attributs et clé primaires aient été clairement définis. Nous avons ensuite utilisé le SQLite comme langage pour rédiger les requêtes et le logiciel DB Browser© comme interface d'écriture/affichage.

### 2.1. Circonscrire le système

Nous allons nous intéresser à la ligne d'assemblage, aux opérateurs, et aux zones de stockages directement contenues sur la ligne. Il s'agit en effet du magasin de palettes, et des stock tampons sur la ligne. Les zones de stockages des quilles et des rondelles ne seront pas incluses dans cet exemple.

Nous allons nous contenter de deux niveaux : le niveau système et le niveau machine. Le niveau système c'est la ligne entière. Le niveau machine va correspondre à la description des postes de travail. Les opérateurs sont considérés comme des modules du niveau machine. L'une des configurations pour laquelle la base de données sera interrogée est indiquée sur la Figure 25.

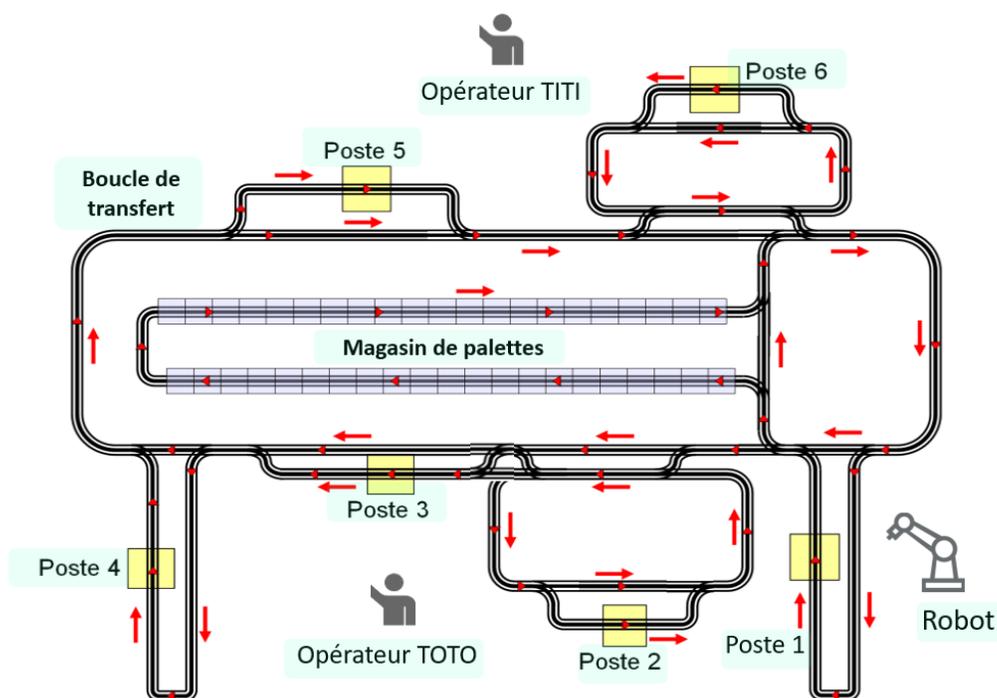


Figure 25: Une des configuration décrite dans la base de données (Conf 7)

## 2.2. Identification de l'architecture du système

Le système est constitué de postes de travail dont certains ont des aspects physiques identiques. Il s'agit par exemple du poste 4 et poste 1 ainsi que des postes 2 et 3. Les postes 2 et 6 ont chacun un stock tampon. Vu que le niveau de granulométrie choisi est le niveau machine, nous allons considérer le poste de travail dans son ensemble, c'est-à-dire le poste plus son stockage. De même le poste 4 est un poste de contrôle dont la camera peut être changée. Ce changement entraine une évolution du module. Etant donné le niveau de granulométrie, nous allons considérer le poste et sa caméra comme formant un module. Toutefois, cette évolution du module est signifiée pendant la décomposition modulaire. L'architecture physique est donc constituée :

- Des ressources poste de travail type 1 (pour poste 1), type 2 (poste 2 et son stockage), type 3 (poste 2), type 4 (poste 4 et sa caméra), type 5 (poste 5) et type 6 (poste 6 et son stockage).
- De magasin de palettes
- De deux opérateurs et d'un robot
- D'une boucle de transfert

L'architecture logique de contrôle est constituée de :

- Règle de contrôle en CAF (clear a fraction)
- Règle de contrôle en FIFO (first in first out) encore appelée FCFS (first come first served)
- Règle de contrôle en CAF\_P (clear a fraction partiel). Il s'agit d'une variante de la logique de contrôle en CAF
- Règle de gestion des opérateurs

Les performances que l'on souhaite mesurer dans ce système sont :

- Nombre de produits fabriqués par le système (sur une durée donnée)
- Le taux d'utilisation du système
- Le taux d'utilisation machine
- L'encours machine
- Le taux de réglage

### *2.3. Identification des modules et codification*

L'identification des modules et leur classification selon le niveau revient à la décomposition modulaire. Les logiques de contrôle identifiées dans l'architecture, sont associées aux différents postes de travail, donnant ainsi naissance à différentes configurations. Par exemple dans une configuration le poste 2 est géré en FCFS, dans une autre en CAF et dans une autre encore en CAF\_P. Pour l'exemple de la configuration présenté en Figure 25, la décomposition modulaire avec précision des logiques de contrôle utilisées est donnée dans le Tableau 4 suivant :

Tableau 4: Une décomposition modulaire au niveau machine de Conf 7

Niveau	Système	Machine
Les différents modules par niveau	Ligne de transfert	Poste 1 en FCFS
		Poste 2 en FCFS
		Poste 3 en FCFS
		Poste 4 en FCFS avec camera 2
		Poste 5 en FCFS
		Poste 6 en CAF
		Boucle de transfert en FCFS
		Magasin de palettes en FCFS
		Opérateur TOTO
		Opérateur TITI
Robot		

La codification que nous allons utiliser pour cet exemple est expliqué sur la Figure 26.

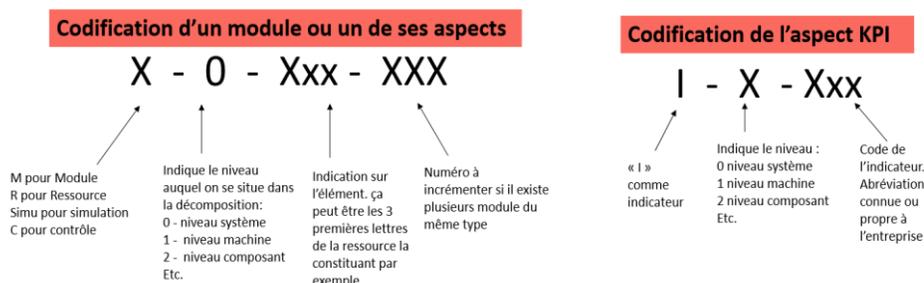


Figure 26: Exemple de formalisme de codification des éléments

### 2.4. Identification des attributs des classes

Ici nous identifions en plus des clés primaires, des attributs qui vont donner plus de précisions aux classes. Par soucis de simplification nous allons juste présenter 3 exemples de classes (Tableau 5). Pour les autres classes, le processus est le même.

Tableau 5: Exemple d'identification d'attributs de classe

Classes	Clé primaire	Autres attributs	Quelques explications
configuration	Config_code	Config_name Starting_date Responsable comment	Ces attributs nous permettent d'identifier pour chaque configuration, la date à laquelle elle a été implémentée ou créée (si seule sa simulation existe), et donne une indication sur le responsable sous lequel cela a été fait. L'attribut comment permet d'apporter des précisions que les attributs ne décrivent pas

KPI_values	Auto increment	Config_code  Module_code  KPI_code  KPI_value	Ici on associe à un module d'une configuration le KPI le décrivant ainsi que la valeur de ce KPI.
Product_config	Auto increment	Product-code  Config_code  Designation_OF  Nbre_lancé  OF_duration  Temps_prod_moyen  Temps-prod_eff	Pour chaque type de produit fabriqué dans une configuration, on définit l'ordre de fabrication (OF) qui mentionne le produit fabriqué ainsi que les caractéristiques de cet OF. Notamment la quantité de l'OF, durée totale de cet OF, le temps moyen et le temps effectif nécessaire pour fabriquer un produit de cet OF. Ces temps servent aussi à évaluer l'implantation de l'atelier.

Une fois toutes ces étapes conduites, nous avons créé les différentes tables. Nous sommes alors passé du modèle de données à une base de données, prête à être alimentée. Nous avons alimenté la base de données d'un certain nombre de configurations (8 configurations). Dans la suite nous proposons de tester la cohérence de la base de données, afin de valider le modèle de référence proposé.

### 3. Test de la base de données et validation du modèle de référence

La cohérence de la structure est testée en effectuant des requêtes dans la base de données obtenue à partir du modèle de référence. Il s'agit pour nous de vérifier la concordance entre le modèle de référence et les tables créées pour décrire notre système. L'objectif de cet exercice est de pouvoir

tester et valider la pertinence du modèle de référence proposé. Pour cela, nous avons effectué des requêtes, principalement concernant la configuration décrite en Figure 25. Nous avons procédé à une série de 5 questions - réponses. Les questions sont traduites en requêtes SQL vers la base de données, et les réponses correspondent au résultat que nous donne la requête après recherche dans la base de données. Dans le Tableau 6, les questions sont numérotées, les requêtes sur l'image de gauche, et les résultats des requêtes sur l'image de droite.

La configuration décrite en Figure 25 correspond à Conf 7 dans la base de données, le module au niveau système décrivant cette configuration est M0Conf7.

Tableau 6: Exemples de requêtes et résultats de requêtes en utilisant la base de données

1. Quelles sont toutes les configurations de la base de données ?																																														
<pre>SELECT config_code,        config_name,        starting_date,        responsable,        comment FROM configuration</pre>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>config_code</th> <th>config_name</th> <th>starting_date</th> <th>responsable</th> <th>comment</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Conf 1</td> <td>Configuration 1</td> <td>01/10/2010</td> <td>Monsieur 1</td> <td>Déjà implémentée_passée</td> </tr> <tr> <td>Conf 2</td> <td>Configuration 2</td> <td>01/10/2012</td> <td>Monsieur 1</td> <td>Déjà implémentée_passée</td> </tr> <tr> <td>Conf 3</td> <td>Configuration 3</td> <td>01/10/2014</td> <td>Monsieur 2</td> <td>Déjà implémentée_passée</td> </tr> <tr> <td>Conf 4</td> <td>Configuration 4</td> <td>01/10/2016</td> <td>Madame 1</td> <td>Implémentée_actuelle</td> </tr> <tr> <td>Conf 5</td> <td>Configuration 5</td> <td>05/15/2019</td> <td>Madame 2</td> <td>Simulée sans être implémentée</td> </tr> <tr> <td>Conf 6</td> <td>Configuration 6</td> <td>15/12/2019</td> <td>Madame 2</td> <td>Simulée sans être implémentée</td> </tr> <tr> <td>Conf 7</td> <td>Configuration 7</td> <td>3/02/2020</td> <td>Madame 2</td> <td>Simulée sans être implémentée</td> </tr> <tr> <td>Conf 8</td> <td>Configuration 8</td> <td>5/02/2020</td> <td>Monsieur 3</td> <td>Simulée sans être implémentée</td> </tr> </tbody> </table>	config_code	config_name	starting_date	responsable	comment	Conf 1	Configuration 1	01/10/2010	Monsieur 1	Déjà implémentée_passée	Conf 2	Configuration 2	01/10/2012	Monsieur 1	Déjà implémentée_passée	Conf 3	Configuration 3	01/10/2014	Monsieur 2	Déjà implémentée_passée	Conf 4	Configuration 4	01/10/2016	Madame 1	Implémentée_actuelle	Conf 5	Configuration 5	05/15/2019	Madame 2	Simulée sans être implémentée	Conf 6	Configuration 6	15/12/2019	Madame 2	Simulée sans être implémentée	Conf 7	Configuration 7	3/02/2020	Madame 2	Simulée sans être implémentée	Conf 8	Configuration 8	5/02/2020	Monsieur 3	Simulée sans être implémentée
config_code	config_name	starting_date	responsable	comment																																										
Conf 1	Configuration 1	01/10/2010	Monsieur 1	Déjà implémentée_passée																																										
Conf 2	Configuration 2	01/10/2012	Monsieur 1	Déjà implémentée_passée																																										
Conf 3	Configuration 3	01/10/2014	Monsieur 2	Déjà implémentée_passée																																										
Conf 4	Configuration 4	01/10/2016	Madame 1	Implémentée_actuelle																																										
Conf 5	Configuration 5	05/15/2019	Madame 2	Simulée sans être implémentée																																										
Conf 6	Configuration 6	15/12/2019	Madame 2	Simulée sans être implémentée																																										
Conf 7	Configuration 7	3/02/2020	Madame 2	Simulée sans être implémentée																																										
Conf 8	Configuration 8	5/02/2020	Monsieur 3	Simulée sans être implémentée																																										
2. Quelles sont les configurations dont le taux d'utilisation système est supérieur à 60% ?																																														
<pre>SELECT module_perfomance.config_code,        module_perfomance.module_code,        module_perfomance.KPI_code,        module_perfomance.KPI_value FROM module_perfomance WHERE module_perfomance.KPI_code = "IOTU" AND module_perfomance.KPI_value &gt; 60</pre>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>config_code</th> <th>module_code</th> <th>KPI_code</th> <th>KPI_value</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Conf 1</td> <td>M0Conf1</td> <td>IOTU</td> <td>64.45</td> </tr> <tr> <td>Conf 2</td> <td>M0Conf2</td> <td>IOTU</td> <td>60.58</td> </tr> <tr> <td>Conf 4</td> <td>M0Conf4</td> <td>IOTU</td> <td>61.77</td> </tr> <tr> <td>Conf 5</td> <td>M0Conf5</td> <td>IOTU</td> <td>62.95</td> </tr> </tbody> </table>	config_code	module_code	KPI_code	KPI_value	Conf 1	M0Conf1	IOTU	64.45	Conf 2	M0Conf2	IOTU	60.58	Conf 4	M0Conf4	IOTU	61.77	Conf 5	M0Conf5	IOTU	62.95																									
config_code	module_code	KPI_code	KPI_value																																											
Conf 1	M0Conf1	IOTU	64.45																																											
Conf 2	M0Conf2	IOTU	60.58																																											
Conf 4	M0Conf4	IOTU	61.77																																											
Conf 5	M0Conf5	IOTU	62.95																																											

3. Quels sont les modules de Conf 7, leurs aspects physique et logique, ainsi que leur layout ?

```
SELECT layout.module_code,
       module.module_designation,
       module.resource_code,
       module.control_code,
       layout.X_position,
       layout.Y_position,
       layout.Z_position

FROM module, layout

WHERE module.module_code = layout.module_code
AND layout.config_code = "Conf 7"
```

module_code	module_designation	resource_code	control_code	X_position	Y_position	Z_position
M1P1	module poste 1	R1P1	C1FIFO	1.5	4.5	1
M1P2_1	module poste 2 en FCFS	R1P2	C1FCFS	4.5	4.5	1
M1P3	module poste 3	R1P3	C1FIFO	7.5	3	1
M1P4_2	module poste 4 en cam 2	R1P4_2	C1FIFO	9.5	4	1
M1P6_2	module poste 6 en CAF	R1P6	C1CAF	2.5	0.5	1
M1BT	module boucle de transfert	R1BT	C0Syst	5	2	1
M1TOTO	module TOTO	R1TOTO	C1Op	5	6	1.8
M1TITI	module TITI	R1TITI	C1Op	2.5	0	1.8
M1StkP	module magasin de palettes	R1StkP	C1FIFO	6	2	1
M1Rbt	module robot	R1Rbt	C1FIFO	0	4.5	3
M1P5	module poste 5	R1P5	C1FIFO	8	1	1

4. Quels sont les produits fabriqués par Conf 7 ainsi que les durées associées à l'OF ?

```
SELECT product_config.product_code,
       product_config.Nbr_lancé,
       product_config.designation_OF,
       product_config.OF_duration,
       product_config.temps_prod_moy,
       product_config.temps_prod_eff

FROM product_config

WHERE product_config.config_code = "Conf 7"
```

product_code	Nbr_lancé	designation_OF	OF_duration	temps_prod_moy	temps_prod_eff
P6	11	OF 4	2779.44	1104.04	221.0
P7	15	OF 4	2649.4	1970.86	262.0
P8	15	OF 4	2903.87	1325.87	286.0

5. Quels sont les opérateurs de Conf 7, à quels postes sont-ils assignés et pour quelle tâche ?

```
SELECT assign_ws.module_op_code as matricule_op,
       module_operators.module_code as module_op,
       assign_ws.module_code as module_poste,
       assign_ws.executed_task

FROM assign_ws, module_operators

WHERE assign_ws.config_code = "Conf 7"
AND assign_ws.module_op_code = module_operators.module_op_code
```

matricule_op	module_op	module_poste	executed_task
Ref65898	M1Rbt	M1P1	chargement/déchargement quilles
Op0145TOTO	M1TOTO	M1P2_1	chargement rondelles
Op0145TOTO	M1TOTO	M1P3	chargement rondelles
Op0163TITI	M1TITI	M1P5	chargement rondelles
Op0163TITI	M1TITI	M1P6_2	chargement rondelles et retouches manuelles

6. Quels sont les modules (niveau système et machines) de Conf7 et quels sont leur KPIS ?

```
SELECT module_perfomance.module_code,
       module_perfomance.KPI_code,
       module_perfomance.KPI_value

FROM module_perfomance

WHERE module_perfomance.config_code ="Conf 7"
```

module_code	KPI_code	KPI_value
M0Conf7	I0PF	41.0
M0Conf7	I0TU	58.07
M1P1	I1TU	21.07
M1P1	I1WIP	1.0
M1P2_1	I1TU	82.56
M1P2_1	I1WIP	3.0
M1P2_1	I1TRgl	0.86
M1P3	I1TU	56.18
M1P3	I1WIP	1.0
M1P4_2	I1TU	73.04
M1P4_2	I1WIP	6.0
M1P5	I1TU	30.83
M1P5	I1WIP	1.0
M1P6_2	I1TU	84.76
M1P6_2	I1WIP	9.0
M1P6_2	I1TRgl	0.69

Le Tableau 6 ci-dessus donne un exemple des questions qui peuvent être posées à la base de données. Le résultat des requêtes montre la cohérence entre le modèle de référence et la base de données obtenue. On arrive à conserver les données aussi bien relatives aux machines qu'aux opérateurs. En plus, le modèle est personnalisé de manière à s'adapter aux attentes de l'exemple. Deux autres exemples d'applications, non présentés ici ont été utilisés pour vérifier cette cohérence. La conclusion de ces différents tests est la suivante : le modèle de référence permet d'organiser les données du système et conduit à une base de données respectant l'approche modulaire. Cette base de données constitue un capital de connaissance en terme de configuration du système qui peut être partagé et enrichi.

#### IV. Utilisation de la base de données

La base de données des configurations sert principalement à deux choses comme montré sur la **Figure 27** :

- Rechercher des configurations ou modules permettant de répondre à un besoin de production. Le système étant décrit par modules, les recherches peuvent se faire sur les différents modules, sachant que le module le plus haut de la description correspond à la configuration du système étudié. A la suite d'une requête la base de données va proposer des éléments qui satisfont aux contraintes de cette requête. Ces éléments vont alors aider le responsable de la ligne à prendre une décision de reconfiguration. Notons bien que l'idée ici est d'alléger le processus de choix de la configuration, en donnant au responsable de la ligne des données pertinentes et juste nécessaires pour le choix de la configuration qu'il faut, au moment où il le faut. Le rôle de la base de données n'est d'offrir une solution de reconfiguration de type « pick and place », mais, en fonction des données extraites de la base, d'aider le responsable de la ligne au choix de la configuration qu'il faut pour répondre à un contexte de production donné.
- La base de données sert aussi à contenir les propositions de nouvelles configurations qui pourraient satisfaire un contexte de production. En effet, l'utilisation de l'aspect modèle, notamment modèle de simulation, offre la possibilité de tester des configurations pas encore existantes avant leur implémentation. Une configuration simulée dont les résultats sont satisfaisants, peut être stockée dans la base de données, et pourra servir à alimenter les

résultats des recherches. Ceci assure à l'entreprise de pouvoir anticiper sur des situations et rapidement y répondre. Par ailleurs, étant donné que les résultats des requêtes guident le choix de nouvelles configurations, les nouvelles configurations construites à l'issue de l'utilisation de la base de données pourront elles aussi être réintroduites dans la base. Ce processus assure une disponibilité continue et actualisée des données.

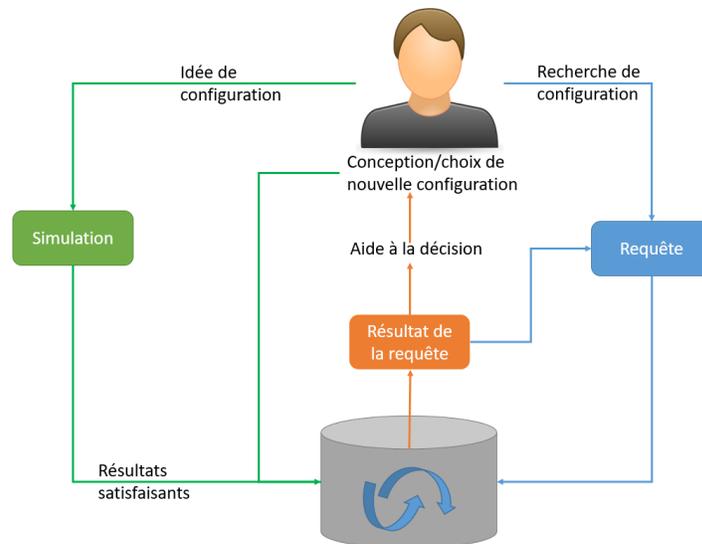


Figure 27: Schéma d'utilisation possible de la BD de configurations

## Conclusion

Nous avons vu dans ce chapitre que la gestion des connaissances du système de production est nécessaire pour une entreprise qui souhaite être proactive. Pour cela, il faut pouvoir capitaliser, partager et utiliser les données relatives à ce système. Un modèle de référence basé sur l'approche modulaire du système a été proposé pour permettre de structurer les données du point de vue de la configuration du système. Ce modèle conduit à la construction d'une base de données permettant de stocker les connaissances relatives au système de production. Cette base de données se présente comme un capital de connaissances qu'il faut enrichir et partager. Cependant, la question qui demeure est celle de savoir comment valoriser ce capital lorsque se présente une situation de reconfiguration. Autrement dit, une fois la base de données de configurations construite et alimentée, comment peut-on l'utiliser dans le processus de choix d'une nouvelle configuration ?

## CHAPITRE 4 : UNE DEMARCHE DE CHOIX DE CONFIGURATION BASEE SUR LA CAPITALISATION DES DONNEES

Dans ce chapitre, nous proposons une démarche de choix de configuration basée sur les données du système en utilisant la base de données de configurations. Dans **le chapitre précédent**, nous avons vu comment construire et interroger la base de données. Ici, nous montrons comment utiliser cette base de données dans le processus choix de nouvelles configurations. Le cas de la ligne QLIO est utilisé pour illustrer chacune des étapes de la démarche proposée.

### I. Les déclencheurs du processus de reconfiguration

#### 1. Les types de reconfiguration en industrie

La reconfiguration d'un système de production est très souvent introduite par l'analyse de ses performances en comparaison soit aux attentes de l'entreprise, soit à l'état des moyens de production, l'évolution du marché et de la concurrence. Dans le premier cas, on parle de reconfiguration programmée : l'entreprise évalue les performances de son système comparativement à ses attentes et décide de le reconfigurer. Ce type de reconfiguration peut se faire selon un cycle ou de manière ponctuelle. Cette reconfiguration est généralement préparée et l'entreprise n'agit pas sous l'effet d'une contrainte extérieure ou intérieure. Dans le second cas, la reconfiguration est imposée soit par le marché et la concurrence, soit par un moyen de production en panne ou défaillant. L'entreprise se doit alors d'y répondre le plus rapidement possible en alignant les performances du système aux exigences du marché. Qu'il soit programmé ou imposé, le processus de reconfiguration est étroitement lié au diagnostic du système au travers de ses KPIs (la diagnosticabilité). Le choix d'une configuration dépend donc de sa capacité à s'aligner à la vision de l'entreprise et à satisfaire les critères de performances et l'identification des KPIs à satisfaire est primordiale.

#### 2. Les indicateurs de performance retardés et avancés

Il existe un très grand nombre d'indicateurs de performance, qui vont varier d'un secteur d'activité à un autre ou d'une compagnie à une autre. La profusion des indicateurs soulève un autre problème, celui lié à leur interprétation. En effet, il ne suffit pas de mesurer un KPI tout simplement parce

cela est possible, mais il convient de s'assurer de son analyse, interprétation et surtout son utilisation dans une prise de décision. En plus de cela, l'approche modulaire du système que nous adoptons dans cette thèse voudrait qu'un KPI puisse être modulaire, c'est-à-dire analysé et interprété sur plusieurs niveaux de décomposition.

Dans la littérature on trouve deux grandes catégories d'indicateurs: les indicateurs avancés et les indicateurs retardés (leading and lagging indicators) (Kravchenko, Pigosso, and McAloone 2019).

Les KPIs retardés permettent de capturer les résultats du système. Ils peuvent être mesurés à travers le MES (Manufacturing Execution System) ou déduits d'une simulation, et donnent des informations relatives aux accomplissements sur une période donnée (exemple : le volume annuel de production). Ces indicateurs sont très souvent utilisés pour fixer les objectifs à atteindre par le système. D'un point de vue modulaire, ce sont les KPIs qui vont caractériser la configuration, c'est-à-dire le module correspondant au plus haut niveau de description. Même si ces indicateurs donnent des informations utiles sur les performances du système, ils n'offrent pas d'informations sur les causes qui ont produit ces performances. C'est là que les indicateurs avancés sont intéressants. Ce sont des indicateurs qui capturent la contribution des composants du système à un résultat. En d'autres termes, ils donnent un aperçu de l'évolution des performances du système afin de fournir des indications sur les performances futures et ils sont mesurés sur une période plus courte que les KPIs retardés (Exemple : le volume de production du système par jour). Dans l'exemple du volume de production annuel du système, l'indicateur retardé capturera les résultats du système, tandis que les indicateurs avancés qui sont les volumes journaliers de production aideront à comprendre et anticiper ces résultats. Ainsi, la production quotidienne pourrait être utilisée comme un "signe" préventif de ce que serait la production annuelle. Les KPIs avancés sont très souvent mesurés directement sur le système, alors que les KPIs retardés sont souvent le résultat de calculs intégrant les KPIs avancés.

Très souvent, les décisions de reconfiguration sont prises en fonction des indicateurs retardés. La compréhension des causes de ces indicateurs retardés passe par l'analyse des indicateurs avancés. Ramené à l'approche modulaire, les KPIs des niveaux inférieurs sont ceux qui aident à la compréhension des KPIs au niveau système. Les indicateurs avancés correspondent donc aux KPIs donnés par les modules des différents niveaux autres que le niveau système.

Ainsi que ce soit au niveau système, machine ou composant, l'analyse des KPIs est à l'origine d'une décision de reconfiguration. En effet, le suivi des indicateurs avancés peut renseigner sur l'évolution de l'atteinte des objectifs. Si cette évolution n'est pas satisfaisante, l'entreprise peut décider de reconfigurer son système. De même, l'entreprise peut attendre d'avoir les indicateurs retardés avant de conduire l'évaluation de son système qui peut mener à une décision de reconfiguration. Grâce à la base de données des configurations construite sur une approche modulaire, les informations relatives aux indicateurs retardés aussi bien qu'avancés peuvent être stockées de manière structurée. L'identification des indicateurs avancés et retardés qui seront utilisés pour décrire le système est une étape préalable à la construction et à l'utilisation de la base de données.

Dans le cadre des travaux de cette thèse, nous nous situons après l'étape d'identification des indicateurs retardés et avancé. Dans la suite, nous proposons une démarche de choix de configurations permettant de capitaliser sur les données du système.

## II. Démarche d'aide au choix de configurations alternatives

Dans cette section, nous déroulons la démarche de choix de configuration qui utilise la base de données comme outil de capitalisation de données. La démarche que nous proposons (Figure 37) est décrite par un Process Flow à 4 étapes qui suit une approche classique de conception à savoir : la définition du besoin, la recherche de solution(s), l'étude de faisabilité et l'implémentation. Cette démarche est appliquée pour passer d'une configuration obsolète, à une nouvelle configuration qui répond au besoin de production, comme le montre Les Figure 28 et Figure 29.

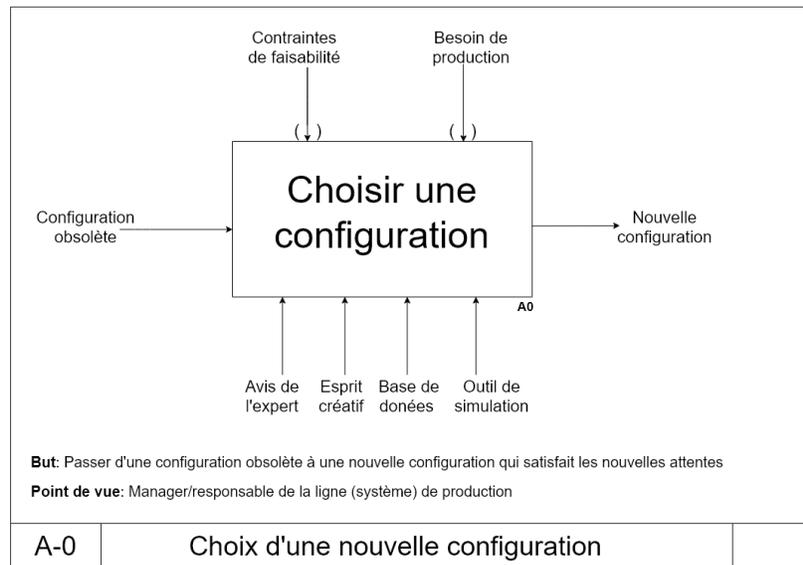


Figure 28: SADT parent A-0 de la démarche de choix

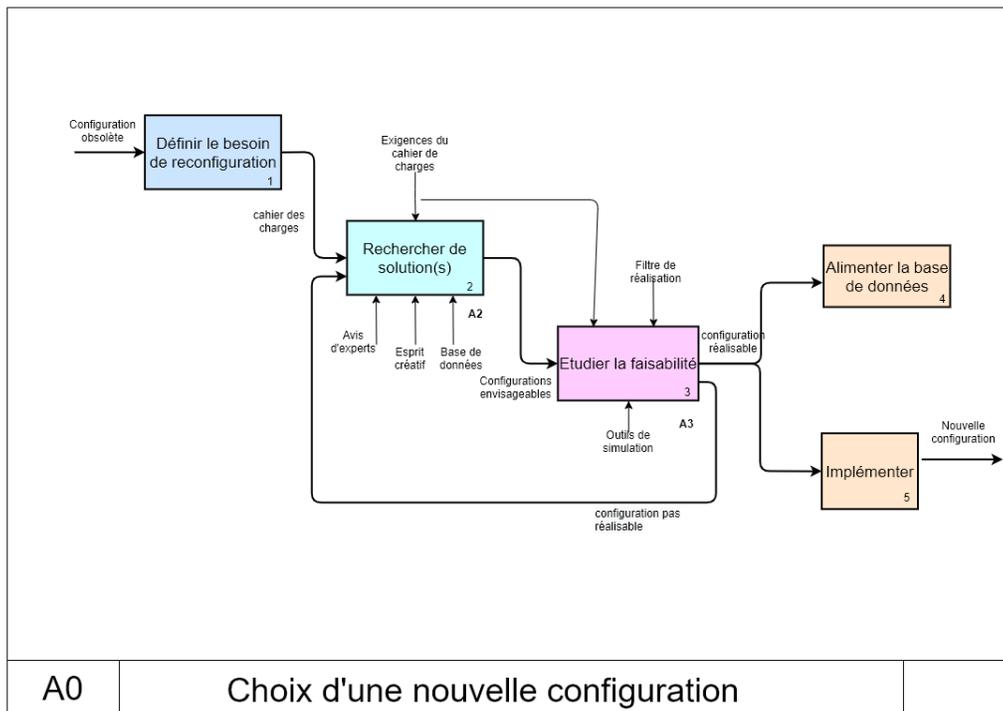


Figure 29: SADT A0 décrivant la démarche

La base de données de configurations intervient dans cette démarche comme un outil de recherche de solution. Dans le chapitre précédant, nous avons vu comment la construire et l'alimenter. Ici, il est maintenant question de l'utiliser pour guider le choix de nouvelles configurations.

### 1. Etape 1 : Définition du besoin de reconfiguration et choix des critères de sélection

#### *a) Définition du besoin de reconfiguration*

Un système peut être reconfiguré pour plusieurs raisons : ajuster le volume de production, changer un produit, améliorer des performances, etc. Ces différents besoins dépendent du contexte de production. Toutefois, nous pensons que les besoins de reconfiguration peuvent être répertoriés en quatre groupes. Il peut s'agir de :

- Ajuster le volume de production : soit l'augmenter soit le diminuer
- Ajouter ou retirer un produit de la ligne de production. Les produits doivent être la même famille car un système reconfigurable est construit autour d'une famille de produits (Koren and Shpitalni 2010)
- Changer ou modifier un produit de la ligne de production. Ici le produit est déjà fabriqué par le système, mais du fait du changement de certaines de ces caractéristiques, le système pourrait être reconfiguré pour supporter ce changement. Toutefois, ces changements se font dans la limite de la famille de produit autour de laquelle le système est conçu
- Améliorer les performances du système (ses KPIs) ou réagir à un dysfonctionnement ou une panne du système.

L'identification du besoin de reconfiguration se fait en accord avec la vision de l'entreprise. Au terme de cette étape, les exigences auxquelles doivent répondre la configuration sont définies, et le cahier de charge est établi. Tout choix ne pouvant être conduit qu'en utilisant des critères, des critères de choix de configurations doivent être définis afin de pouvoir utiliser la base de données. En effet, les recherches dans la base de données se font selon des requêtes SQL, et pour cela il faut au préalable fixer les critères de choix qui vont guider chaque requête, ceci constitue une phase préliminaire à l'utilisation de la base de données.

*b) Choix des critères de sélection*

Les situations de reconfiguration n'étant pas toujours soumises aux mêmes contraintes, il faut définir, pour chaque cas, des critères de choix qui conviennent. Nous proposons à cet effet d'utiliser les indicateurs de performance (avancés et retardés) comme filtre de sélection dans la base de données. Les KPIs permettent d'évaluer le système et conduisent aux décisions de reconfiguration. Une nouvelle configuration est donc choisie selon sa capacité à satisfaire ces performances. Lorsque la base de données est interrogée, ce sont ces performances qui permettent de dire si une configuration ou module de configuration satisfait une requête.

Les critères de choix de configuration sont souvent multiples, contradictoires, et peuvent dépendre les uns des autres (par exemple, un taux de qualité élevé pour un coût faible), il est donc important de les hiérarchiser afin de mieux exploiter la base de données : pour un coût donné, il existe la meilleure qualité possible. Pour une qualité donnée, il existe le plus faible coût permettant de l'obtenir : c'est la notion du front de Pareto. Le front de Pareto représente en effet la courbe donnant les optimums entre deux ou plusieurs critères considérés. Le décideur devra alors choisir un compromis sur cette courbe.

Pour un système de production, il existe un grand nombre de KPIs pouvant être mesurés, ou même simulés. Le choix des KPIs décisionnels est une étape primordiale au processus de reconfiguration. Ces KPIs décisionnels (souvent contradictoires) dépendent de chaque entreprise, voire de chaque système reconfigurable. Ce choix implique souvent des décisions multicritères qui sont largement étudiées dans la littérature (voir par exemple (Tzeng and Huang 2011)) et que nous n'allons pas reprendre ici. Nous allons pour ces travaux admettre que les KPIs décisionnels sont déjà choisis. Nous proposons aussi de considérer des filtres de sélection pour les requêtes de la base de données, la sortie de chaque filtre conduit à une nouvelle étape dans la démarche. Tout au long du processus nous allons utiliser des termes pour désigner les configurations qui passent à travers les différents filtres. Ainsi, nous aurons :

- Configurations candidates

Ce sont toutes les configurations (bien qu'elles ne soient pas toujours optimales) qui respectent les limites imposées par chacun des critères de sélection (voir Figure 30). Elles passent alors le premier

filtre de sélection. Il peut s'agir d'une configuration qui satisfait les critères au niveau système, ou d'une configuration dont les modules des autres niveaux satisfont les critères. Étant donné que les critères sont des indicateurs (retardés ou avancés), et que ceux-ci sont modulaires, les requêtes peuvent concerner les indicateurs soit au niveau du système, machines ou d'autres niveaux.

- Configurations envisageables

Elles représentent les configurations candidates qui optimisent au mieux tous les critères. Elles correspondent aux configurations se situant sur le front de Pareto, et respectant les limites des critères. De même que précédemment les requêtes dans la base de données se font sur différents niveaux : Si au niveau système aucun module n'est trouvé, la recherche peut se poursuivre au niveau machine, composant etc. L'intérêt étant de pouvoir exploiter au maximum les données du système qui existent déjà.

Si nous considérons deux critères K1 et K2, les configurations candidates et envisageables seront représentées comme suit (Figure 30):

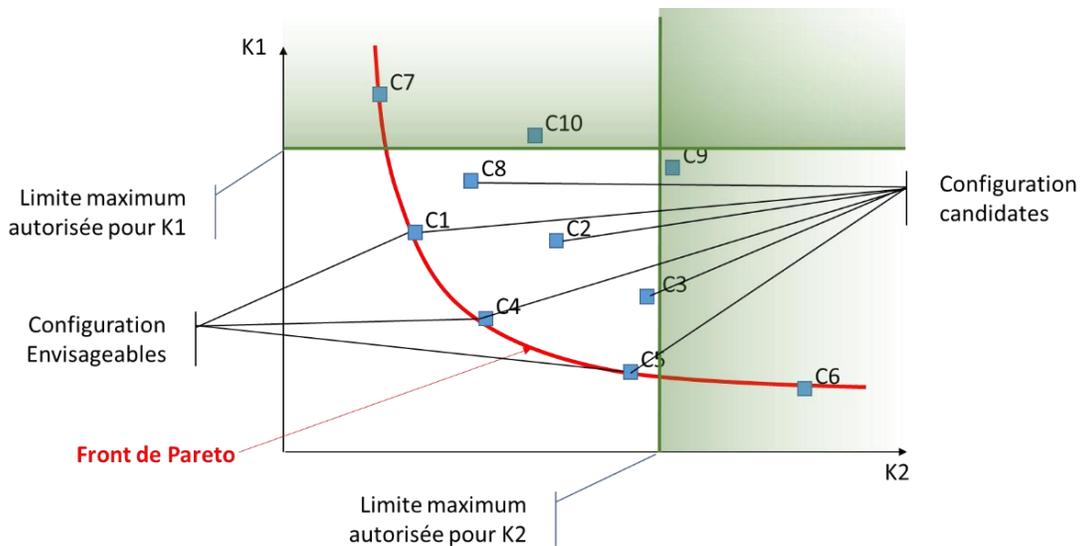


Figure 30 : Les configurations candidates, envisageables et le front de Pareto pour deux critères

- Configurations faisables

Ce sont des configurations envisageables qui sont affinées conformément au besoin de reconfiguration. En effet, la base de données n'est pas conçue pour fournir des solutions du type « pick and place », les résultats des requêtes aident au choix de nouvelles configurations. Ainsi, après chaque requête, il en ressort des idées de configurations, qui doivent être ajustées pour répondre au besoin de reconfiguration. Les configurations envisageables qui passent par cette étape deviennent donc faisables, car elles remplissent les exigences du cahier des charges, et permettent de répondre aux besoins de production. A ce stade de la démarche, ces configurations peuvent être enregistrées dans la base de données et pourraient sous réserve du filtre de réalisation, être implémentées.

- Configurations réalisables

Ce sont les configurations faisables qui passent par le filtre de réalisation qu'est l'effort de conversion. Ces configurations ont soit un effort de conversion peu élevé, soit sont en accord avec la vision stratégique de l'entreprise. Il est à noter ici que l'effort de conversion est calculé par rapport au système utilisé au moment où la nouvelle configuration est choisie. Les configurations qui ne passent pas le filtre sont toujours stockées dans la base de données car elles permettent au moins de répondre aux besoins de production. Pour une autre situation de reconfiguration, l'effort de conversion pourrait être moindre, c'est-à-dire le passage de la configuration en vigueur en ce moment-là, à la configuration stockée dans la base de données. Le calcul de l'effort de conversion, est présenté en détail dans la suite de ce chapitre.

## 2. Etape 2 : Recherche de solution(s)

À ce stade, les configurations candidates et envisageables sont identifiées. Cette étape a pour but de trouver les configurations ou les modules qui peuvent répondre au cahier des charges. La capitalisation des données du système par l'utilisation de la base de données prend tout son intérêt. Un premier filtre est imposé par un premier critère et un second par le deuxième critère pour conduire les recherches dans la base de données. Cette étape est conduite en trois phases. Dans un premier temps les configurations candidates sont identifiées, puis elles sont évaluées à la lumière

du cahier des charges. Ces configurations candidates passent ensuite par un second filtre. Il en ressort des configurations envisageables qui seront affinées et enrichies à la lumière des connaissances de l'expert de la ligne, du groupe de projet ou du chef de ligne, et des besoins de reconfiguration.

Dans le cas où aucun des critères n'est satisfait au niveau du système, le critère pourra également être vérifié à un autre niveau (machine, composant, sous-composant, etc.) selon les besoins de reconfigurations, ceci grâce au caractère modulaire des KPIs. A l'issue de cette recherche, si aucune configuration ni module ne satisfait le critère, une nouvelle solution peut être conçue de manière modulaire soit par l'ajout, le retrait ou l'ajustement d'un module (Erica Capawa Fotsoh, Mebarki, et al. 2020). Cette étape est décrite dans la Figure 31.

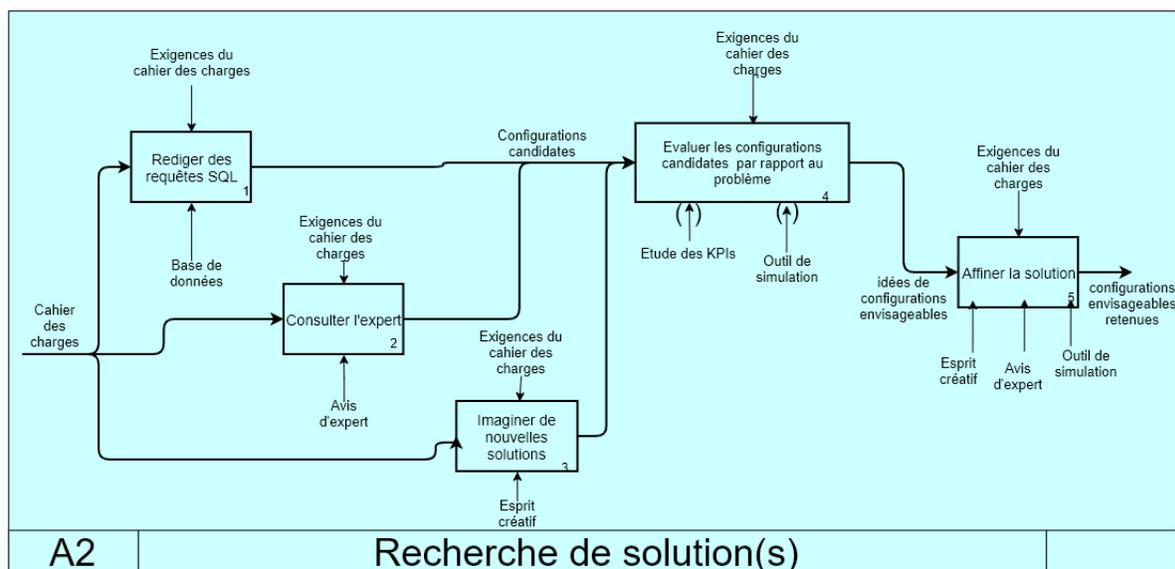


Figure 31: SADT A2 décrivant l'étape de recherché de solution(s)

### 3. Etape 3 : Etude de faisabilité

Les configurations envisageables sont enrichies, affinées et évaluées. Cette évaluation est réalisée à l'aide d'un outil de simulation. Si les résultats de la simulation sont conformes aux objectifs

définis, alors la configuration est considérée comme faisable et sera enregistrée dans la base de données, sinon la configuration est affinée ou abandonnée. La configuration faisable est ensuite étudiée à travers le filtre de réalisation (Voir Figure 32). Pour la mise en œuvre de ce filtre, nous proposons dans notre approche une métrique appelée effort de conversion. Cette métrique permet de déterminer l'effort déployé pour passer d'une configuration à une autre. Plus cet effort est important, moins la configuration est réalisable.

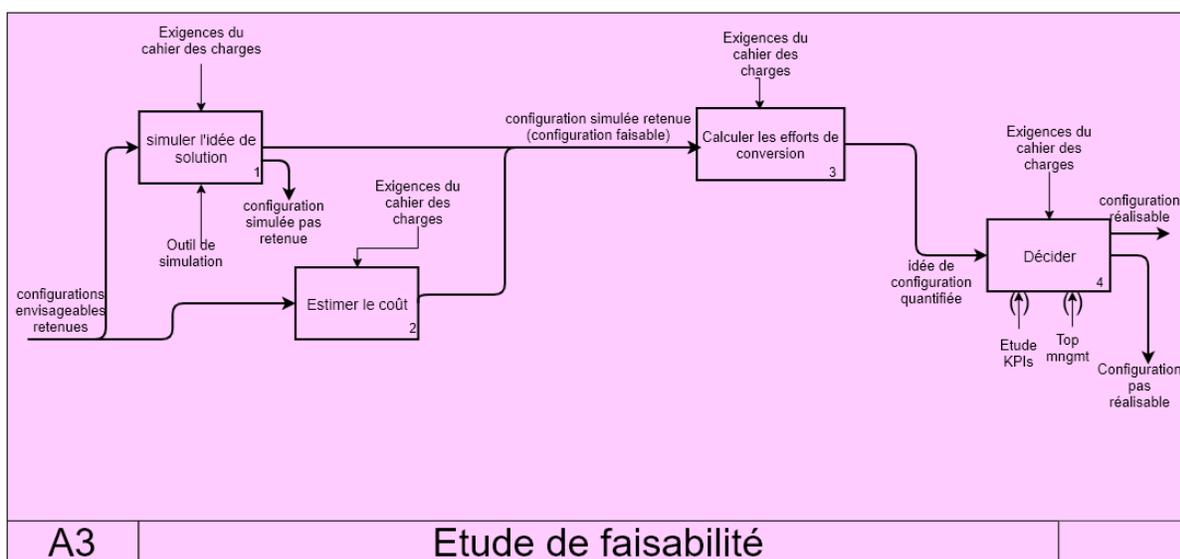


Figure 32: SADT A3 décrivant l'étape d'étude de faisabilité

a) Proposition d'une métrique : l'effort de conversion

Cette métrique permet d'évaluer quantitativement l'effort nécessaire pour passer d'une configuration à une autre. Dans notre approche, la reconfiguration signifie soit l'ajout, le retrait ou l'ajustement de modules (changement d'un de ses aspects). Chacune de ces actions nécessite un effort qui dépendra du niveau auquel la description modulaire est faite, et peut être évalué selon plusieurs axes par exemple, le temps nécessaire pour la reconfiguration, les compétences techniques internes à l'entreprise, les installations disponibles, le retard des sous-traitants ou des fournisseurs, etc. L'effort de conversion représente donc la somme des efforts de chacune des

actions d'ajout, de retrait ou d'ajustement de modules (Hasan, Jain, and Kumar 2013) et (Goyal, Jain, and Jain 2013b).

(Goyal, Jain, and Jain 2013b) affirment que l'effort requis pour ajouter un module est plus important que l'effort requis pour le retrait d'un module, qui est lui-même raisonnablement plus élevé que l'effort requis pour ajuster un module. Ils fixent des valeurs pour chacune de ces actions (0,5, 0,4 et 0,1 respectivement), qui sont ensuite intégrées dans un modèle de calcul. Cependant, cette approche directive ne tient pas compte des paramètres variables qui pourraient affecter ces efforts. En effet, devant chaque situation de reconfiguration, un certain nombre de questions peuvent être soulevées :

- Cas de l'ajout d'un nouveau module : Le module est-il déjà présent dans le parc machines de l'entreprise ? Si non, la fabrication du module est-elle réalisée en interne (par le bureau d'études de l'entreprise) ou en externe (achat ou sous-traitance par exemple ?). Le module existe déjà sur le marché, dans ce cas il suffit de l'acheter.
- Cas de l'ajustement du module : S'agit-il d'un ajustement de l'aspect physique du module ? Ou de l'aspect logique de contrôle ? Dans le second cas, le programme utilisé existe-t-il dans la liste des programmes en mémoire ? L'entreprise dispose-t-elle des compétences nécessaires pour effectuer les modifications ?
- Cas du retrait d'un module : Les ressources/compétences utilisées sont-elles internes (existent dans l'entreprise) ? Ou s'agit-il de ressources/compétences externes (sous-traitants par exemple) ?

Nous voyons ici que les valeurs des efforts d'ajout, de retrait ou d'ajustement du module ne peuvent pas être gravées dans le marbre pour tous les cas de reconfiguration. Nous proposons d'adopter une approche plutôt constructive, dans laquelle les valeurs action respectivement notées  $\alpha_i$ ,  $\beta_j$  et  $\gamma_k$  seront déterminées de façon à mieux s'adapter à chaque cas de reconfiguration. L'idée est d'avoir une méthode de calcul de l'effort qui soit suffisamment formelle et générique pour convenir à plusieurs contextes de production, bien sûr sous réserve de modularité. Cette approche propose d'évaluer individuellement chaque action de reconfiguration, afin que la valeur qui lui est attribuée reflète au mieux possible la réalité.

Nous assimilons l'effort de conversion d'une configuration A en une configuration B à une distance entre A et B. Plus la distance est grande, plus l'effort est grand (voir illustration Figure 33). Dans l'espace, la distance entre deux points est obtenue par une formule où interviennent les coordonnées du vecteur formé par ces deux points. Et ces coordonnées correspondent à la projection du vecteur sur des axes d'un repère. De même qu'un vecteur de l'espace, l'effort est obtenue en projetant son vecteur sur les axes au travers duquel il est évalué. Ces axes d'évaluation dépendent de l'intérêt de l'entreprise et de chaque situation de reconfiguration.

Par exemple, l'effort peut être évalué en fonction du temps nécessaire à la mise en œuvre de la configuration, du retour sur investissement, de la disponibilité des compétences techniques, etc. On pourrait alors avoir n axes sur lesquels évaluer l'effort afin d'avoir les n coordonnées du vecteur qui serviront à calculer la distance. Si l'analyse de l'effort porte sur un axe, le vecteur effort est à une seule dimension. L'effort est un vecteur de n-dimensions,  $n \geq 1$ , représentant le nombre d'axes d'évaluation sur lesquels l'effort est projeté.

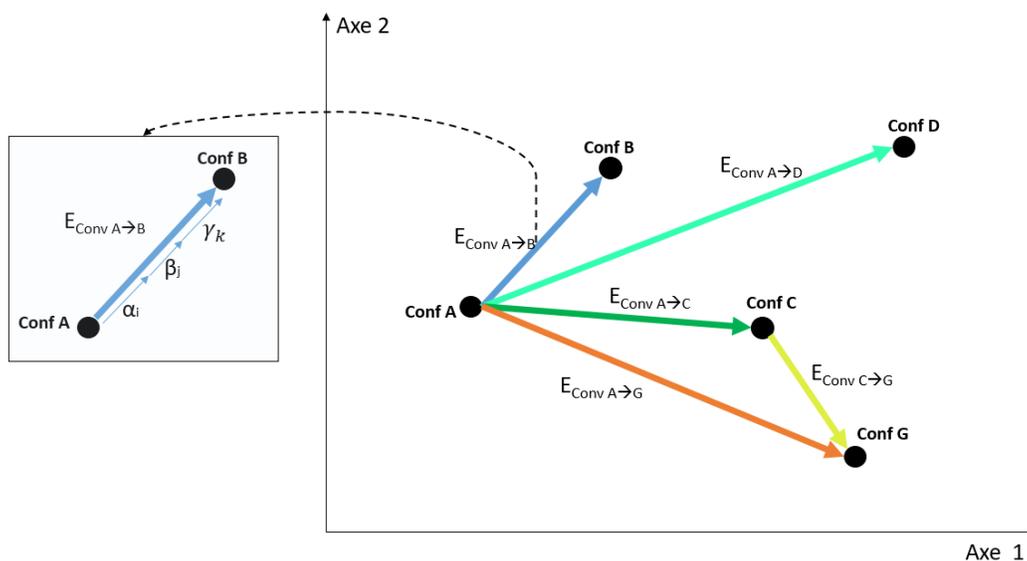


Figure 33: Exemple de représentation de l'effort de conversion suivant deux axes d'évaluation (dimension 2)

#### b) Calcul de l'effort de conversion

Comme plus haut, l'effort de conversion est la somme de l'effort de chaque action. A partir de ce postulat et en s'appuyant sur les travaux précédemment cités, nous proposons la formule suivante

pour l'effort de conversion ((Eq. 1). Déterminer la valeur de l'effort global revient donc à déterminer les valeurs des efforts de chacune des actions.

$$E_{conv(A \rightarrow B)} = \sum \alpha_i + \sum \beta_j + \sum \gamma_k \quad (\text{Eq. 1})$$

Avec  $\begin{cases} \alpha_i \text{ est l'effort nécessaire pour ajouter un module } i \\ \beta_j \text{ est l'effort nécessaire pour retirer un module } j \\ \gamma_k \text{ est l'effort nécessaire pour ajuster un module } k \end{cases}$

Les valeurs des efforts de chaque action représentent les coordonnées des vecteurs évalués sur chacun des axes considérés. Les axes d'évaluation étant subjectifs, nous proposons de formaliser leur détermination en utilisant une approche par classe de valeurs.

On propose de classer les efforts selon que l'action réalisée pour la conversion est mineure, moyenne, majeure, ou importante. A chaque classe est associé un coefficient. Cette classification permet d'avoir une appréciation globale de l'effort, et permet également de donner une valeur adimensionnelle à l'effort. L'objectif n'est pas de déterminer des valeurs exactes pour les efforts, mais de pouvoir les quantifier afin d'évaluer efficacement une reconfiguration. Pour cela, cette approche propose que le choix du seuil de chaque classe ainsi que la valeur attribuée aux classes restent prédéfinis en amont par la stratégie de chaque entreprise. La méthode est donc formalisée, mais elle peut encore être personnalisée en fonction du contexte de production.

Plus concrètement, nous proposons 4 classes de valeurs et trois seuils. Chaque entreprise décide de la valeur à attribuer à chaque des classes selon sa sensibilité. Un exemple est montré en Figure 34.

Par exemple, dans l'étude de cas réalisée dans ce chapitre, nous proposons d'évaluer l'effort de conversion selon deux axes :

- Le temps nécessaire pour installer et rendre opérationnelle la nouvelle configuration (D). C'est-à-dire le délai nécessaire pour acquérir le module (ou l'élément de module), l'installer

et le rendre opérationnel dans la configuration, en cas d'ajout/modification du module ; retirer le module et faire fonctionner la configuration, si le module est retiré.

- Le temps nécessaire pour obtenir le retour sur investissement (ROI). C'est-à-dire le temps nécessaire pour gagner de l'argent après l'installation et le fonctionnement de la nouvelle configuration.

Pour ces deux axes d'évaluation, nous considérons les classes et seuils décrits par le Tableau 7 et le Tableau 8. L'effort d chaque action est obtenu en multipliant pour chaque action, les valeurs de son évaluation sur les axes considérés. C'est-à-dire, l'action d'ajout de module sera obtenue en multipliant les valeurs de temps nécessaire pour installer ce module et de temps nécessaire pour le ROI, tel qu'expliqué dans le Tableau 9.

Ainsi, de manière générale, les  $\alpha_i$ ,  $\beta_j$  et  $\gamma_k$  sont déterminés en multipliant les valeurs décrivant les efforts sur les axes considérés. L'effort de conversion de la configuration A à la configuration B  $E_{Conv(A \rightarrow B)}$  est par la suite obtenu en additionnant les efforts des différentes actions conduits pour la reconfiguration, tel qu'expliqué par (Eq. 1).

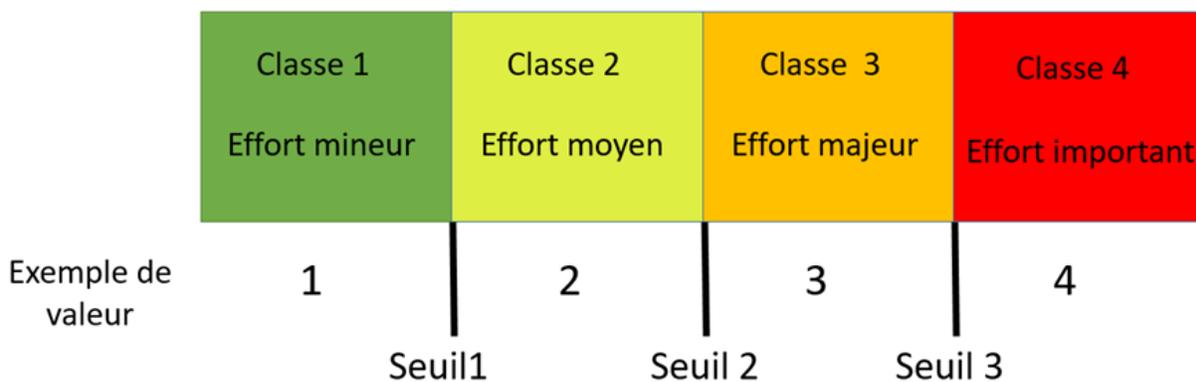


Figure 34: Les classes et seuils pour l'évaluation des efforts

Tableau 7: Exemples de seuils à considérer pour l'évaluation

Les seuils	ROI	D
Seuil 1	1 mois	1 jour
Seuil 2	3 mois	3 jours
Seuil 3	6 mois	7 jours

Tableau 8: Les classes et leurs valeurs

Classes	Valeur	Niveau	Explications
Classe 1	1	Mineur	L'action a un ROI en moins d'1 mois
			L'action est menée sur un délai < 1 jour
Classe 2	2	Médium	L'action a un ROI entre 1mois et 3 mois
			L'action est menée entre 1jours et 3 jours
Classe 3	3	Majeur	L'action a un ROI entre 3 mois et 6 mois
			L'action est menées entre 3jours et 7jours
Classe 4	4	Important	L'action a un ROI sur plus de 6 mois
			L'action est menée en plus de 7jours

Tableau 9: Calcul des efforts de chaque action de reconfiguration

		ROI			
D	Effort of the action ( $\alpha_i, \beta_j, \gamma_k$ ) = D*ROI	1	2	3	4
	4	4	8	12	16
	3	3	6	9	12
	2	2	4	6	8
	1	1	2	3	4

#### 4. Etape 4 : Implémentation

Le filtre de réalisation permet de décider des configurations à implémenter ou pas. Les configurations envisageables qui ont passé ce filtre deviennent alors des configurations réalisables. Il s'agit des configurations qui satisfont les critères du cahier des charges, et dont l'effort de conversion est minimal, ou des configurations dont l'effort de conversion convient à la stratégie d'entreprise. Ces configurations réalisables sont utilisées pour alimenter la base de données.

### III. Application au cas QLIO

Ici nous poursuivons avec l'illustration de la ligne QLIO (présenté au [chapitre 3](#)). La décomposition modulaire de même que la construction de la base de données ont été développé dans les chapitres précédents. Dans cette section, nous allons nous focaliser sur l'illustration de la démarche de choix de configuration qui se sert de la base de données. Nous allons dérouler pas à pas les étapes de la démarche en montrant leur application au travers de l'exemple.

## 1. Description de la situation de reconfiguration

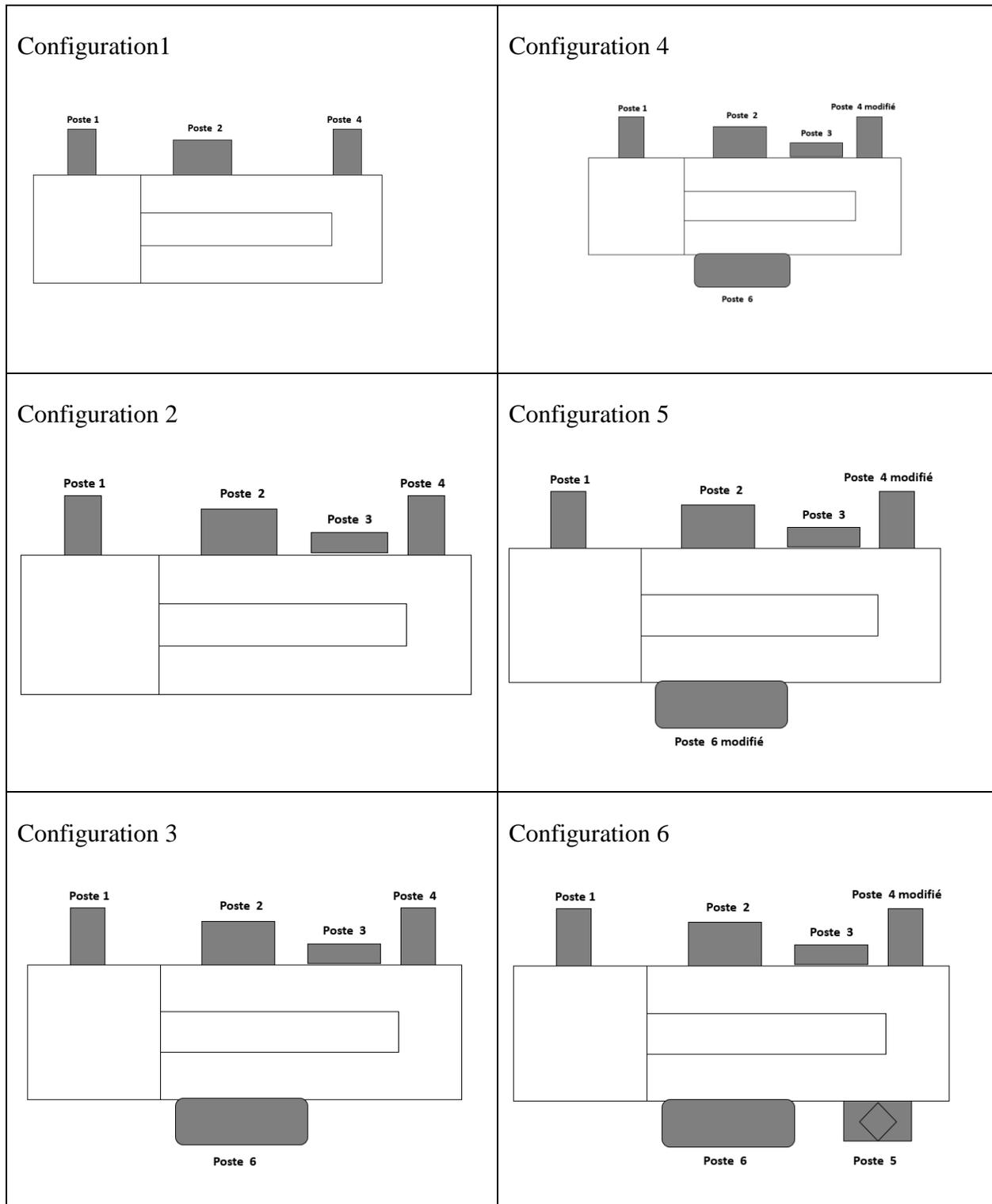
L'historique du système est constitué de trois configurations. La configuration 1 permet de fabriquer les produits P1 et P2, la configuration 2 les produits P3 et P4, et la configuration 3, P5 et P6. La configuration 4 est une variante de la configuration 3, dans laquelle le module « Poste 4 » a été ajusté afin de réduire les temps de production des produits P5 et P6. La configuration 4 actuellement utilisée dans le système.

Afin d'anticiper sur les changements potentiels, la simulation a été utilisée pour tester une nouvelle logique de contrôle (configuration 5) et l'introduction de nouveaux produits (configuration 6) ; Les données obtenues de ce futur potentiel ont été simulées et sauvegardées. Toutes ces configurations ont été sauvegardées dans la base de données des configurations du système. Il y a donc au total six (06) configurations dans la base de données toutes schématisées dans le Tableau 10.

Le système actuel (Configuration 4) fabrique deux produits P5 et P6. En raison de la baisse de la demande de P5, ce produit sera abandonné. Le volume de production de P6 lui aussi est réduit mais le produit est toujours fabriqué. Deux nouveaux produits P7 et P8 sont cependant ajoutés à la ligne et la configuration 4 ne convient donc plus.

Le besoin est alors de reconfigurer le système pour répondre à ce nouveau contexte de production en répondant à deux contraintes : (i) ne pas dégrader les conditions de production de P6, c'est-à-dire s'assurer que le temps de production effectif de P6 ne diminue pas et (ii) maintenir le temps que les machines passent en réglage au niveau le plus bas possible.

Tableau 10: Schématisation des configuration décrites dans la base de données



## 2. Application de la démarche de choix

### a) Définition du besoin de configuration

Pourquoi le système va-t-il être reconfiguré ? Pour ajouter deux nouveaux produits (P7 et P8) à la ligne. Quelles sont les contraintes ? Ne pas dégrader les conditions de production de P6 et limiter au maximum les temps de réglage des machines. Le temps réglage ici correspond au temps nécessaire à la machine pour passer d'un produit à l'autre.

Ces contraintes sont traduites en critères de sélection afin d'optimiser l'utilisation de la base de données. On suppose que cette tâche est déjà accomplie, comme indiqué précédemment.

Par conséquent, les critères de sélection sont les suivants :

- Critère 1 : fabrication P6, avec un taux de production effectif supérieur ou égal à 20%.
- Critère 2 : temps de réglage de la machine inférieur ou égal 1% dans les configurations.

### b) Recherche de solution en utilisant la Base de données

Dans un premier temps, nous allons considérer que la limite du critère 2 est infinie. Les configurations candidates sont celles qui répondent au critère 1. Après avoir exécuté la requête dans la base de données, les résultats sont donnés sur la Figure 35. La première ligne de la figure présente toutes les configurations qui fabriquent le produit P6 ainsi que leurs KPIs au niveau système. Les lignes qui suivent donnent la valeur du taux de production effectif, pour chaque configuration de la première ligne.

Les configurations candidates sont alors les configurations 4, 5 et 6. Nous recherchons ensuite parmi ces configurations celles qui satisfont les limites du critère 2. C'est-à-dire les configurations où le taux de réglages des machines est inférieur ou égal à 1%. Les résultats obtenus après les requêtes sont donnés sur la Figure 36.

Chapitre 4 : Une démarche de choix de configuration basée sur la capitalisation des données

```

Les configurations qui fabriquent P6 et leurs performances sont les suivantes :
[('Conf 3', 242.0, 1337.95), ('Conf 4', 221.0, 1052.77), ('Conf 5', 221.0, 1089.42), ('Conf 6', 221.0, 985.59)]
*****
Le taux de production effective de la configuration Conf 3 est : 18.087372472812884 %
La configuration Conf 3 ne satisfait pas le critère
*****
Le taux de production effective de la configuration Conf 4 est : 20.992239520503055 %
La configuration Conf 4 satisfait le critère
*****
Le taux de production effective de la configuration Conf 5 est : 20.286023755759945 %
La configuration Conf 5 satisfait le critère
*****
Le taux de production effective de la configuration Conf 6 est : 22.42311711766556 %
La configuration Conf 6 satisfait le critère
*****

```

Figure 35: Résultats de la requête relative au premier critère

config_code	module_code	KPI_code	KPI_value
Conf 4	M1P2_1	I1TRgl	2.23
Conf 4	M1P6_1	I1TRgl	3.57
Conf 5	M1P2_1	I1TRgl	2.29
Conf 5	M1P6_2	I1TRgl	0.92
Conf 6	M1P2_1	I1TRgl	0.85
Conf 6	M1P6_1	I1TRgl	3.41

Figure 36: Résultats de la requête relative au second critère

On peut voir d'après ces résultats qu'aucun des modules de la configuration 4 ne répond au critère 2, la configuration 4 ne passe donc pas ce filtre de sélection. Par contre, dans la configuration 5 de même que la configuration 6, seul un module satisfait la contrainte. On pourrait alors essayer d'ajuster l'autre module pour s'aligner aux contraintes. Par conséquent, seules les configurations 5 et 6 seront considérées comme des configurations envisageables. Elles correspondent aux configurations du front de Pareto et vont maintenant être enrichies et affinées afin de répondre aux exigences.

c) *Enrichissement des idées de solution et test de faisabilité*

Ici, les configurations envisageables 5 et 6 seront affinées en fonction des besoins. Deux produits sont ajoutés sur la ligne et nécessitent une nouvelle fonction qui n'existe pas encore dans le système. Ainsi, un module pouvant réaliser cette fonction est ajouté au système. Cette éventualité avait été simulée par la configuration 6. Afin de profiter des résultats simulés de la configuration 5, nous allons proposer deux configurations, construites à partir des configurations 5 et 6 respectivement. Les configurations enrichies présentées dans le Tableau 11 sont dénommées respectivement configuration 7 et 8, et les résultats de leur simulation sont donnés dans le Tableau 12.

Les expériences de simulation concluent que la configuration 7 et la configuration 8 répondent toutes deux aux critères, et ont d'ailleurs les mêmes valeurs pour ces critères. À ce stade du processus, ces configurations sont faisables et peuvent être stockées dans la base de données. Leur mise en œuvre sera soumise à l'effort de conversion nécessaire pour passer de la configuration 4 (le système actuel) à la configuration 7 ou 8.

Tableau 11: Schématisation des configurations enrichies

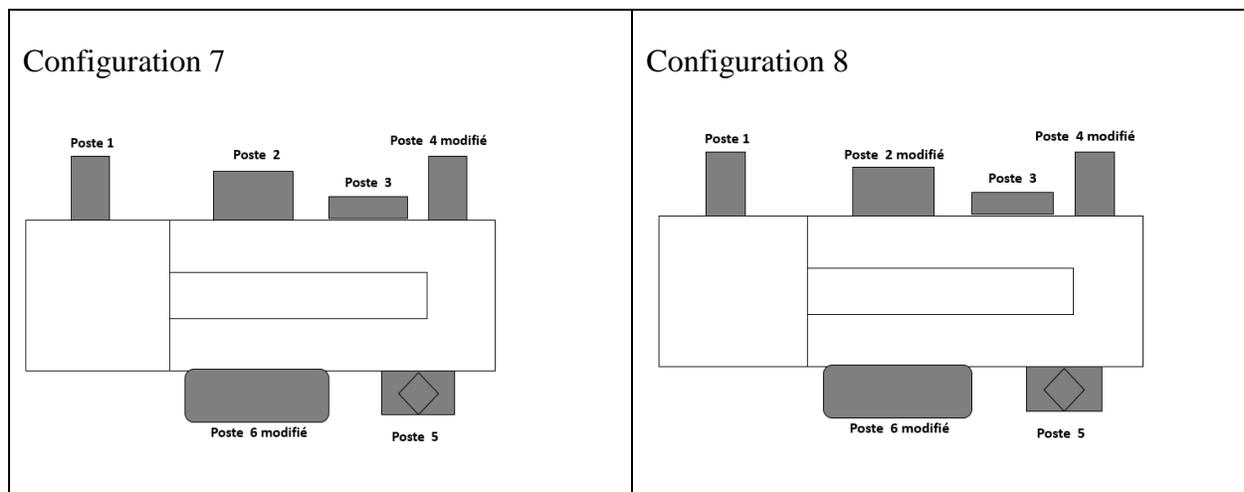


Tableau 12: Schématisation des résultats de simulation des configurations enrichies

Configuration	Effective production rate of P6 (%)	Setup rate of M1P2_x (%)	Setup rate of M1P6_2 (%)
Conf 7	20,0017	0.86	0.69
Conf 8	20,0017	0.86	0.69

- Calcul de l'effort de conversion  $E_{conv(4 \rightarrow 7)}$ .

Pour passer de la configuration 4 à la configuration 7, un module est ajouté au système. Ce module a déjà été simulé. La durée nécessaire pour installer ce module est d'environ 6 heures.

Conformément aux Tableau 8 et Tableau 9 de classes d'évaluation des efforts, ceci correspond à un effort de classe 1 du point de vue du délai d'installation. Le retour sur investissement est estimé à 3 mois, qui correspond à un effort de classe 2. L'effort nécessaire pour ajouter ce module est alors  $\alpha_1 = 1 * 2 = 2$ .

Aucun module n'est retiré du système  $\beta_1 = 0$ .

Un module est ajusté. La logique de commande du poste de travail M1P6 est modifiée. Le programme utilisé a déjà été testé par simulation, c'est-à-dire que le programme existe déjà dans l'architecture logique. La durée pour l'implémenter et le faire fonctionner est estimé à moins de 3 heures (classe 1) et le retour sur investissement d'environ 1 mois (classe 1). L'effort nécessaire pour modifier ce module est donc  $\gamma_1 = 1 * 1 = 1$ .

La somme des efforts de ces trois actions, donne un ordre d'idée sur l'effort à fournir pour passer de la configuration 4 à la configuration 7, au regard du délai d'installation et du ROI.

$$E_{conv(4 \rightarrow 7)} = \alpha_1 + \beta_1 + \gamma_1 = 2 + 0 + 1 = 3$$

- Calcul de l'effort de conversion  $E_{conv(4\rightarrow 8)}$

Nous allons procéder de la même manière que précédemment. Un module est ajouté au système, et ce module a déjà été simulé. La durée nécessaire pour l'installation et la mise en œuvre est estimée à 6heures et le ROI à 3mois.  $\alpha_1 = 2$ .

Aucun module n'est retiré du système  $\beta_1 = 0$

Deux modules sont modifiés avec des logiques de contrôle qui existent déjà dans l'architecture logique.  $\gamma_1 = 1$  and  $\gamma_2 = 1$

De ce fait,

$$E_{conv(4\rightarrow 8)} = \alpha_1 + \beta_1 + \gamma_1 + \gamma_2 = 2 + 0 + 1 + 1 = 4$$

d) *Décision et implémentation*

Le passage de la configuration 4 en 7 demande moins d'effort que le passage de la configuration 4 en 8. Etant donné que les configurations 7 et 8 donnent les mêmes résultats sur les critères considérés, la configuration 7 est celle à mettre en œuvre. La configuration 7 répond aux exigences de reconfiguration et donne de bons résultats en ce qui concerne l'analyse de faisabilité. Toutefois, une étude approfondie supplémentaire peut être utile avant sa mise en œuvre.

## Conclusion

Nous avons montré dans ce chapitre comment utiliser la base de données de configuration dans une démarche de choix. La base de données préalablement alimentée de configurations issues de l'historique du système ou de simulations, est mise à jour pendant le processus. En effet, les configurations qui passent par les filtres des critères primaire et secondaires, sont par la suite enrichies, testées puis enregistrées dans la base de données lorsqu'elles sont alignées avec le besoin de reconfiguration. Ceci permet d'assurer que la base de données est suffisamment fournie pour des recherches futures. Plus la base est alimentée en données jugées pertinentes, meilleur sera le processus de recherche dans la base.

*Chapitre 4 : Une démarche de choix de configuration basée sur la capitalisation des données*

Nous avons également introduit une métrique qui permet de choisir la configuration à implémenter, en tenant compte des efforts nécessaires pour reconfigurer. Ceci permet d'assurer que le choix de la configuration n'intègre pas seulement les contraintes techniques. Il est important de souligner que, la modularité reste fondamentale à l'utilisation de base de données, de même que pour le calcul des efforts de conversion. Puisque la démarche a été présentée et appliquée sur un exemple illustratif, nous allons dans le chapitre suivant l'appliquer à des cas industriels, afin de la confronter à des contraintes et situations réelles.

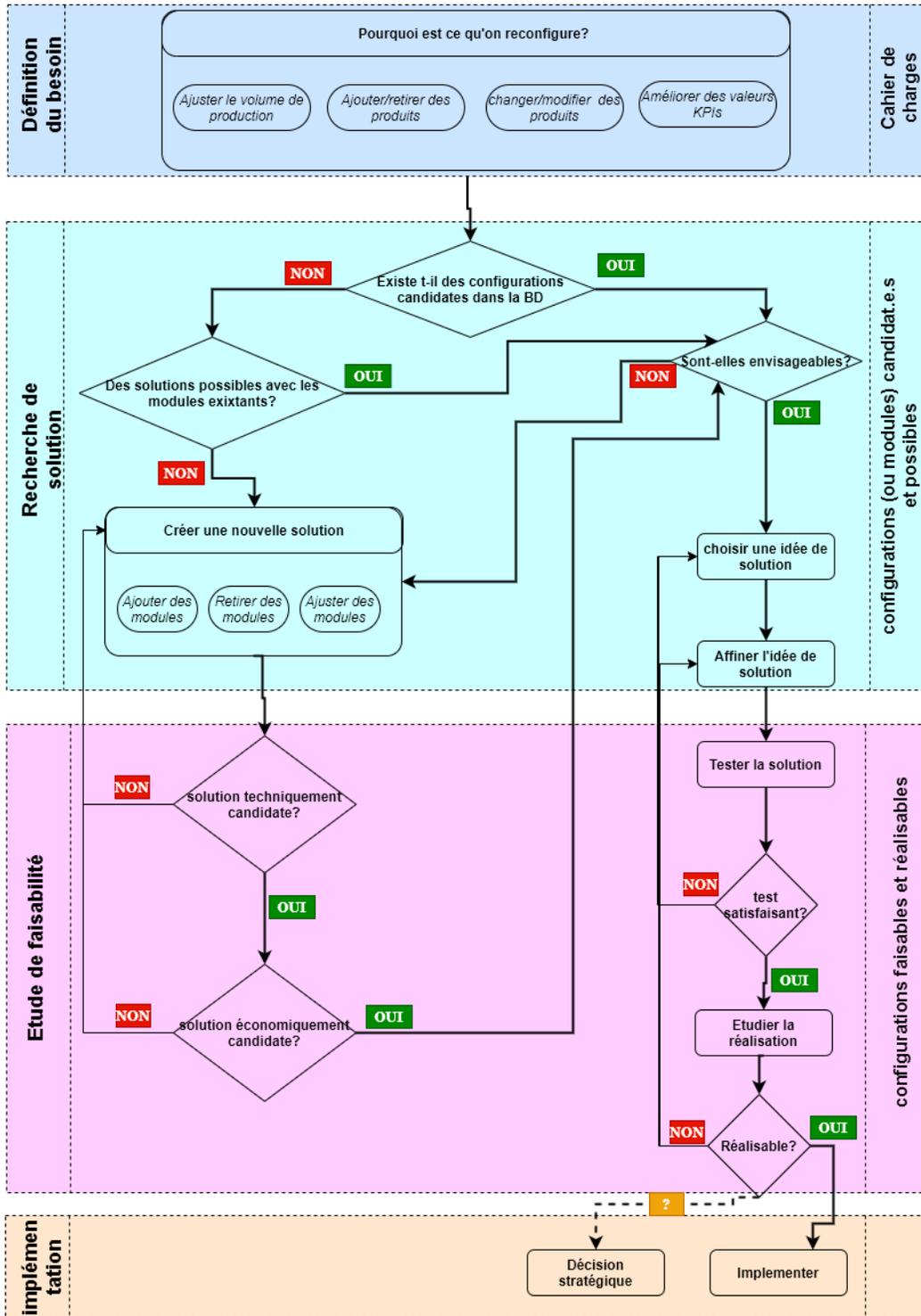


Figure 37: Process Flow de la démarche de choix de configurations

## CHAPITRE 5 : APPLICATION DES PROPOSITIONS AUX CAS D'ETUDE INDUSTRIELS

Dans ce chapitre, nous allons appliquer les propositions de cette thèse à des cas industriels. Nous allons ainsi confronter nos propositions à des situations réelles. Pour chacun des deux cas, nous allons mener une étude complète allant de la décomposition modulaire, à la démarche de choix de configuration, en passant par la construction et l'alimentation de la base de données.

### I. Le cas Europe technologies-LivingPackets

#### 1. Contexte de l'étude

LivingPackets® est une start-up nantaise qui a inventé « The box », un colis réutilisable, connecté et sécurisé pour le e-commerce (Figure 38). Le produit est conçu pour réduire l'impact environnemental en réduisant les quantités de carton générées par les colis du e-commerce. Différents modèles sont prévus pour le transport des volumes allant de 2 à 32 litres, pour une quantité annuelle évaluée à près de 5 millions de produits. Après avoir réalisé plusieurs prototypes, testés notamment par Orange et Cdiscount, l'enjeu pour cette start-up est désormais de produire les « The box » en série.

Le produit et les volumes de production étant susceptibles d'évoluer, LivingPackets® a opté pour un système de production reconfigurable. Pour cela, elle a fait appel à la société Europe technologies® pour la conception d'abord d'une ligne pilote pour réaliser les tests de production et ensuite d'une autre ligne destinée à produire les 5 millions de produits par an.

La ligne pilote est utilisée pour étudier l'industrialisation de « The box ». Les conclusions issues de l'étude de cette ligne serviront à concevoir la ligne permettant de fabriquer les 5 millions de produits. L'objet du cas d'étude est donc d'analyser les possibilités de la ligne pilote en vue de la conception de la ligne à grande capacité.

Le système soumis à notre étude est la ligne pilote, dont une photo est montrée en **Figure 39**. Cette ligne est constituée d'un ensemble de postes de travail manuels, robotisés et semi-automatiques. Le produit final est obtenu par l'assemblage de sous-composants. Chacun des sous-composants suit

une succession d'opérations avant l'assemblage final. Le produit final, ainsi que les sous-composants sont transportés à l'aide de convoyeur sur des palettes (même principe que celui du cas QLIO). Sur les postes manuels, les opérateurs déposent sur les palettes les éléments à assembler pour former chaque sous-composant. Ces sous-composants sont appelés posage, et chaque posage a sa gamme opératoire. Les posages vont passer par la suite par une successions d'opérations réalisées par des robots, avant d'aller en assemblage final. En assemblage final, les différents posages sont mis ensemble pour former le produit final qui va au poste de test. Les tests sur cette ligne pilote sont effectués par des opérateurs.



Figure 38: Le produit "The Box"



Figure 39: Une image 360° de la ligne pilote

## 2. Description de la situation de reconfiguration

Le nombre de palettes transportant les sous-composants à introduire dans le système a un impact sur la productivité et sur le temps d'attente généré par les opérations simultanées. En effet, certaines opérations nécessitent la présence de deux palettes devant le poste avant d'être effectuées. Ceci génère des temps d'attente et d'inactivité du poste. Le ratio optimal de palettes à introduire dans le système est donc une des décisions à prendre, tout en respectant la charge maximale (en Kg) que peut supporter la ligne.

La ligne pilote est conçue pour produire annuellement 80 000 produits sur une période de 2\*8 heures. Au moment où l'étude de cas est conduite, la ligne était installée mais pas encore fonctionnelle. Les responsables de la ligne ont déterminé des valeurs théoriques des performances de cette ligne pour la configuration installée. Quoique théoriques, ces performances ne satisfont pas les exigences de production attendues, notamment l'objectif de production annuelle des 80 mille produits. Outre cela, les responsables veulent pouvoir :

- Optimiser le nombre de palettes à mettre dans le système, tout en respectant la contrainte de charge (Kg) que les convoyeurs peuvent supporter.
- Tendre vers des Objectifs de production sur la ligne haute capacité : 1 million puis 5 millions par an
- Limiter les temps d'attente (ou d'inactivité) sur les postes de travail à opérations synchronisées

L'objectif de ce cas d'étude est double : (i) d'abord, proposer des configurations pour la ligne pilote de manière à répondre au volume de production des 80 000, tout en déterminant le ratio de palettes à introduire dans le système et limiter les temps d'attentes. (ii) Ensuite, analyser le comportement de la ligne pilote pour proposer des choix de solutions de conception pour la ligne à grande capacité.

Avant de démarrer le processus de démarche de choix de configuration, nous allons conduire l'analyse modulaire du système, puis construire et alimenter la base de données.

### 3. Une décomposition modulaire du système et construction de la base de données

#### a) Circonscrire le système et niveau de décomposition

En accord avec les responsables, la ligne est décrite sur 3 niveaux : système, machine et composant. Le système étudié va comprendre la ligne de production, les opérateurs, et les stocks situés sur chaque poste de travail. Le système d'approvisionnement de même que les magasins de stockage (hors de la ligne) ne sont pas inclus dans l'étude. Pour cette étude, nous considérons la ligne avec zéro défaut, le taux de non qualité n'est pas introduit.

#### b) Identification de l'architecture

Il s'agit de répertorier les ressources, les logiques de contrôle de même que les KPIs qui sont utilisés pour former les modules. Nous considérons les convoyeurs d'entrée et sortie de chaque poste de travail, comme faisant partie du poste. Par contre les boucles de transfert seront considérés comme des ressources à part entière, leur analyse au niveau composant ne sera pas considérée.

L'architecture physique est composée de :

- Au niveau système des ressources décrivant chaque configuration
- Au niveau machine : des ressources des postes de travail, des ressources de boucles de transfert et des ressources opérateurs
- Au niveau composant des ressources des composants des postes de travail en incluant les robots pour les postes automatiques, les zones de travail des postes, et les zones de stock tampon du poste

Pour ce qui est de l'architecture logique, nous n'allons pas la détailler. En effet, à ce jour, seule une logique est utilisée pour décrire le comportement des postes de travail. Elle reste cependant une propriété d'Europe Technologies et de LivingPakets.

Pour ce qui est des performances, celles mesurées pour ce système sont les suivantes :

- Le nombre de produits fabriqués pour chaque configuration
- Le taux d'activité de chaque module
- Le taux d'attente pour les poste de travail à opérations synchronisées

- Le taux d'attente de sortie, c'est-à-dire le taux d'inactivité du poste dû à la saturation de ligne

c) *Les modules et leur codification*

Les modules identifiés sont répertoriés dans le **Tableau 13** ci-dessous. Dans la base de données, la codification sera faite selon le modèle présenté dans **le chapitre 3**. Exemple : M1Bout va désigner le module bouterollage de niveau Machine. « M » pour module « 1 » indique le niveau de décomposition et « Bout » donne l'indication sur l'élément du module.

Tableau 13: Une décomposition modulaire du système

Niveau de décomposition	Système	machine	composant
Les modules considérés	Ligne d'assemblage	Poste prépa 1	Zone travail
			Buffer du poste
		Poste prépa 2	Zone travail
			Buffer du poste
		Poste prépa 3	Zone travail
			Buffer du poste
		Assemblage final	Zone travail
			Buffer du poste
		Poste test	Zone travail
			Buffer du poste
		Poste de vissage	Robot vissage
			Zone travail
		Poste bouterollage	Robot bouterollage
			Zone de travail
		Poste miroir HPW05	Robot HPW05
			Zone travail
		Poste miroir HPW11	Robot HPW11
			Zone travail
Poste miroir HPW12	Robot HPW12		

			Zone travail
		Poste pressage	Presse
		Boucle centrale	-
		Boucle secondaire	-
		Les opérateurs	-

*d) Les attributs des classes*

Pour ce cas d'étude, il est important de savoir pour chaque configuration, le ratio de palettes qui est utilisé. En effet, le ratio de palettes influence les performances du système et même des modules. Pour cela, nous proposons dans la table « product\_config » qui décrit les produits fabriqués dans une configuration de mentionner le ratio de palette qui a été utilisé.

*e) Construction et alimentation de la base de données*

La ligne pilote n'a pas d'historique. Pour alimenter la base de données après la création de toutes les tables, nous avons utilisé la simulation. En effet, nous avons construit un modèle de simulation décrivant la configuration telle qu'installée avec le ratio de palette indiqué par les responsables de la ligne [8.6.6.12] (8 posages de type 1, 6 posages de type 2, 6 posages de type 3, et 12 posages de type 4). Partant de ces données, nous avons proposé et testé six autres configurations en faisant varier trois ratios de palettes [9.8.6.13], [10.8.6.14] et [10.10.8.14]. Une capture d'écran du modèle de simulation d'une des configurations est montrée en Figure 40. Ces simulations ont été faites avec le logiciel FlexSim©. Au total, la base de données compte sept (7) configurations différentes. C'est sur ces données que les recherches seront menées, et le processus de choix de configuration appliqué.

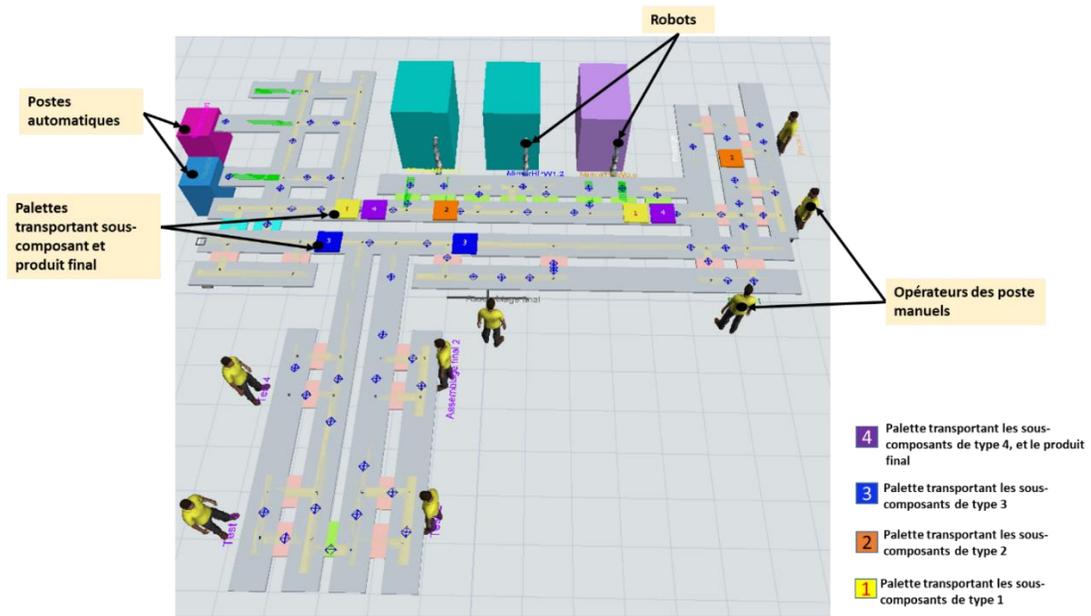


Figure 40: Une capture d'écran du modèle de simulation de la ligne pilote

#### 4. Application de la démarche de choix de configuration

##### a) *Besoin de reconfiguration*

Pourquoi voulons-nous reconfigurer le système ? Pour guider les choix de conception de la ligne de production à grande capacité. Ces choix de conception sont basés sur l'analyse de la ligne pilote. Les critères de sélection de la base de données concernent donc la ligne pilote. La traduction des spécifications en critère de sélection sont les suivants :

- Critère 1 : la ligne pilote doit atteindre au moins 80% de la capacité de production annuelle envisagé. C'est-à-dire 80% des 80 000 produits, soit une capacité d'au moins 64 000 produits par an
- Critère 2 : Les temps d'attente sur les postes à opérations simultanées doivent être minimaux.

*b) Recherche de solution(s)*

Nous allons dans un premier temps considérer que la limite du critère 2 est infinie. Les configurations candidates sont celles qui ont une productivité d'au moins 80%, c'est-à-dire plus de 64K produits. Après recherche dans la base de données, les configurations, ainsi que le ratio de palettes sont donnés dans la Figure 41a.

Après discussion avec l'équipe de conception, les ratios de palettes [10.8.6.14] et [10.10.8.14] ont été éliminés car la charge maximale en Kg de la ligne ne permet pas de les supporter. Les configurations candidates ainsi que les ratios de palettes correspondants qui satisfont cette contrainte sont celles présentées en Figure 41b. Notons ici que, pour une même configuration, le ratio de palettes [9.8.6.13] donne de meilleurs résultats.

Les configurations envisageables sont cherchées parmi celles de la Figure 41b. Il est question ici de repérer parmi ces configurations, celles dont les taux d'attentes sur les postes à opérations simultanées sont les moins élevés. Il s'agit de rechercher le taux d'attente (en %) des modules concernés par ces opérations synchronisées : M1HPW05, M1HPW11 et M1Prepa\_3. Simu\_value représente ces taux d'attente obtenus par simulation. Le résultat de la recherche est présenté sur la Figure 42. On constate avec ces données que les taux d'attente pour ces trois modules sont généralement les plus bas pour un ratio de palettes de [9.8.6.13], particulièrement pour les configurations Conf 3, Conf 4, Conf 5 et Conf 7 que nous allons retenir en tant que configurations envisageables

*c) Enrichissement et étude de faisabilité*

Les solutions envisageables sont enrichies pour répondre au besoin de reconfiguration. Dans cette étude de cas, l'enrichissement de la solution vise la proposition de configuration qui conviendra le mieux pour la ligne à grande capacité, en tenant compte des idées de configurations de la ligne pilote.

L'analyse des configurations envisageables 3, 5 et 7 nous a permis de tirer les conclusions suivantes :

- Pour réduire les temps d'attente sur les postes à opérations synchronisées, il faut soit dédier un poste à une seule opération (supprimer la synchronisation), soit dédoubler les postes de travail pour éliminer la demande simultanée d'une même ressource.
- La structure initiale (Une boucle centrale où circulent les produits) doit être abandonnée, pour une structure en ligne droite sur laquelle ne circulent que les produits finis. Cette boucle serait alimentée de circuits dédiés à l'assemblage des sous-ensembles.

config_code	simu_value	ratioP
Conf 1	64504.0	10.10.8.14
Conf 2	65032.0	9.8.6.13
Conf 2	65054.0	10.8.6.14
Conf 2	65868.0	10.10.8.14
Conf 3	66022.0	8.6.6.12
Conf 3	67364.0	9.8.6.13
Conf 3	66858.0	10.8.6.14
Conf 3	66528.0	10.10.8.14
Conf 4	65208.0	9.8.6.13
Conf 4	64020.0	10.8.6.14
Conf 5	64218.0	8.6.6.12
Conf 5	66682.0	9.8.6.13
Conf 5	66374.0	10.8.6.14
Conf 5	68112.0	10.10.8.14
Conf 7	65032.0	8.6.6.12
Conf 7	65824.0	9.8.6.13
Conf 7	66066.0	10.8.6.14
Conf 7	65846.0	10.10.8.14

(a)

config_code	simu_value	ratioP
Conf 2	65032.0	9.8.6.13
Conf 3	66022.0	8.6.6.12
Conf 3	67364.0	9.8.6.13
Conf 4	65208.0	9.8.6.13
Conf 5	64218.0	8.6.6.12
Conf 5	66682.0	9.8.6.13
Conf 7	65032.0	8.6.6.12
Conf 7	65824.0	9.8.6.13

(b)

Figure 41: (a) Toutes les configurations candidates (b) Configurations candidates avec les contraintes de conception

### Vers une ligne de production de grande capacité

Après discussion avec les responsables de la ligne, la ligne à grande capacité s'oriente plus vers la fluidification du processus de fabrication par l'élimination des opérations synchronisées, c'est-à-dire une modification du processus d'assemblage. Les postes de travail modulaires seraient constitués de deux convoyeurs superposés permettant la circulation des palettes pleines pour le convoyeur supérieur et des palettes vides pour le convoyeur inférieur. L'assemblage de ces postes permet de constituer des lignes dédiées à chaque composant principal du produit (voir Figure 43).

config_code	module_code	simu_value	ratioP
Conf 2	MIHPW05	38.6	9.8.6.13
Conf 3	MIHPW05	35.54	9.8.6.13
Conf 3	MIHPW05	53.57	8.6.6.12
Conf 4	MIHPW05	34.73	9.8.6.13
Conf 5	MIHPW05	35.44	9.8.6.13
Conf 5	MIHPW05	52.54	8.6.6.12
Conf 7	MIHPW05	58.44	9.8.6.13
Conf 7	MIHPW05	58.74	8.6.6.12
Conf 2	MIHPW11	49.56	9.8.6.13
Conf 3	MIHPW11	46.63	9.8.6.13
Conf 3	MIHPW11	54.85	8.6.6.12
Conf 4	MIHPW11	44.78	9.8.6.13
Conf 5	MIHPW11	46.57	9.8.6.13
Conf 5	MIHPW11	54.96	8.6.6.12
Conf 7	MIHPW11	15.27	9.8.6.13
Conf 7	MIHPW11	40.48	8.6.6.12
Conf 2	MIPrepa_3	48.21	9.8.6.13
Conf 3	MIPrepa_3	45.69	9.8.6.13
Conf 3	MIPrepa_3	48.09	8.6.6.12
Conf 4	MIPrepa_3	48.06	9.8.6.13
Conf 5	MIPrepa_3	37.58	9.8.6.13
Conf 5	MIPrepa_3	39.24	8.6.6.12
Conf 7	MIPrepa_3	46.6	9.8.6.13
Conf 7	MIPrepa_3	47.31	8.6.6.12

Figure 42: Résultats de la requête pour le second critère

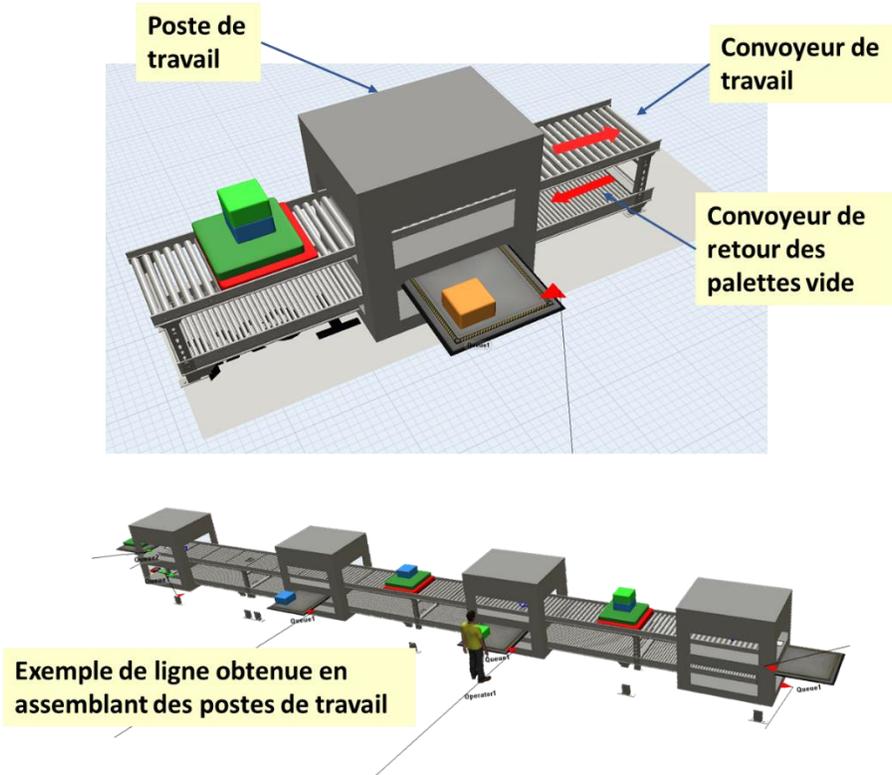


Figure 43 exemple de modélisation du poste de travail et d'assemblage de postes de travail

Ces systèmes de production ont vocation à être déployés des pays du monde entier. Chacun de ces pays ont des couts de main d'œuvre qui leur est propre. L'idée est alors, pour chaque module, d'avoir quatre versions de ce module caractérisées par des degrés d'automatisation variables. Un module très automatisé n'aurait pas besoin de main d'œuvre mais représenterait un cout d'investissement important. A l'inverse, un module peu automatisé représenterait un cout d'investissement faible mais nécessiterai un nombre d'opérateurs important.

Ainsi, pour chaque cas particulier, des choix de modules seraient fait pour optimiser la productivité en tenant compte du rapport Cout d'investissement/Cout de fonctionnement. Aussi l'identification et la décomposition modulaire, de la première ligne expérimentale a permis de rapidement visualiser la structure proposée pour la ligne à grande capacité. Outre cela, les différents ratios de palettes testés, ont guidé leurs réflexions quant au ratio à adopter pour la ligne à grande capacité.

Nous avons ensuite montré un grand intérêt de la couche « modèle » que nous avons proposé dans cette thèse. Nous avons pu réaliser une bibliothèque de modules à partir de l'outil de simulation FlexSim©. Chaque module est modélisé sur le plan physique et comportemental (voir Figure 44). L'agrégation de ces modules de simulation permet très rapidement d'obtenir un modèle global de la ligne.

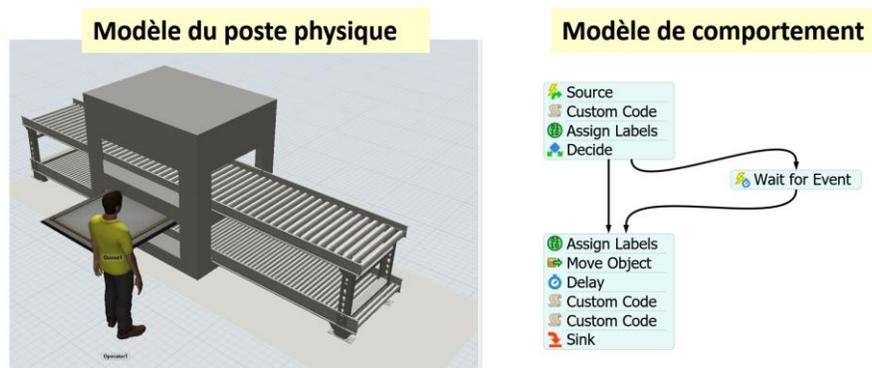


Figure 44 : Exemple de modélisation d'un poste de travail et de son comportement

L'équipe projet de LivingPackets est très intéressée par nos travaux pour aller vers un configurateur de lignes. Chaque système ayant été étudié sera stocké dans la base de configuration. Lors de la mise en place d'une nouvelle ligne, l'interrogation de la base permettra de retrouver la ligne satisfaisant au mieux de triptyque Coût d'investissement / Coût de fonctionnement / Productivité. Ensuite la proposition de nouvelle ligne pourra être affinée puis simulée. Pour l'instant, les tests et

l'étude de faisabilité sont en cours. En effet, d'autres décisions de conception doivent être validées par les industriels, le projet de ligne à haute capacité étant en cours de déploiement.

## 5. Conclusion du cas d'étude

Nous avons montré au travers de ce cas d'étude que la démarche de choix que nous proposons ne sert pas seulement pour une reconfiguration dans le but d'améliorer le système, mais, peut aussi être utile pour la conception d'un tout nouveau système. Ceci est possible grâce à l'analyse modulaire du système, plus précisément de l'utilisation de l'aspect simulation.

Etant donné que le produit est amené à évoluer, la ligne pilote pourra toujours servir pour tester et étudier l'industrialisation des nouveaux produits. La base de données déjà fournies avec des configurations, pourra à ce moment être utile pour une reconfiguration en vue de produire de nouveaux produits. Ceci montre que la méthode que nous proposons dans cette thèse est adaptée aussi bien aux systèmes matures (ayant un historique) qu'aux projets de conception (où il n'existe pas d'historique du système).

## II. Le cas TER Rental

### 1. Le contexte du cas d'étude

TER Rental est une société qui offre des services de locations et de maintenance des conteneurs servant dans les industries agroalimentaires ou dans la grande distribution. Les conteneurs sont loués aux clients, et après utilisation sont retournés chez TER Rental pour des opérations de maintenance dues aux étiquettes collées, pieds tordus, début de rouille, etc. TER Rental fait passer les conteneurs sur une ligne où les opérateurs effectuent les vérifications et les mises à niveau nécessaires. Les durées des différentes opérations, ainsi que la cadence de production du système dépendent fortement de la compétence des opérateurs. Plus un opérateur est expérimenté, plus rapide sera sa manipulation. Toutefois, une étude préalable menée par une stagiaire a permis d'évaluer les temps opératoires moyens de chaque opération. Et c'est à partir de ces temps que sera fixé l'objectif du volume de production

Avec l'augmentation des demandes, le système a désormais besoin de traiter un nombre plus élevé de conteneurs. L'objectif de TER Rental est d'assurer la disponibilité des conteneurs pour les prochains clients sur des délais raccourcis. Pour cela les opérateurs du système doivent suivre une certaine cadence de production journalière.

Le système sujet de notre étude, traite les conteneurs métalliques utilisés en industrie (Figure 45). Ils proviennent de différents fournisseurs, et le système les traite sans au préalable effectuer de tri. Les conteneurs très abimés se retrouvent ainsi mélangés avec ceux qui sont moins abimés, ce qui introduit un autre phénomène aléatoire sur la durée



Figure 45: Exemple de conteneur industrie

des opérations. Lorsque les conteneurs en entrée de ligne sont très abimés, les opérateurs sont très chargés et un goulot d'étranglement se crée en entrée du système. Si les opérateurs sont expérimentés, le système arrive à traiter un nombre raisonnable de conteneurs, par contre, si les opérateurs sont moins expérimentés, la cadence en sortie de ligne est moins importante. Lorsque les conteneurs sont moins abimés, les opérateurs expérimentés ou non parviennent à supporter la charge. Cependant, les opérateurs expérimentés peuvent se retrouver en inactivité, car leur cadence sera plus élevée que celle du système. Tout l'enjeu est donc de bien disposer les opérateurs dans le système selon leurs compétences, afin de répondre au besoin de production.

Le système est principalement constitué de robots, de systèmes de transport et d'opérateurs. Les robots assurent entre autre la manutention, tandis que les opérateurs effectuent la succession d'opérations nécessaires au nettoyage et à la mise à niveau des conteneurs. Le système est fait de deux lignes indépendantes l'une de l'autre, qui peuvent être utilisées simultanément ou individuellement.

## 2. Description de la situation de reconfiguration

Les opérateurs sont les facteurs déterminants de ce système. Etant donné l'incertitude de l'état des conteneurs à l'entrée du système, l'enjeu pour le responsable de production est de déterminer les

opérateurs à mettre dans le système, et à quel moment les mettre. Bien sûr, un opérateur expérimenté coûte beaucoup plus cher. L'objectif de ce cas d'étude est donc d'évaluer les configurations qui répondent aux exigences de production, tout en minimisant le coût de la main d'œuvre qui dépend du nombre d'opérateurs compétents dans le système.

L'objectif journalier est évalué à 2000 conteneurs par jour, soit 1000 conteneurs pour chacune des lignes. Une étude sur les lignes a montré que cet objectif ne peut être atteint que si tous les opérateurs sont très expérimentés, ce qui n'est le cas à ce jour. Il est donc demandé une production journalière d'au moins 90% de l'objectif, soit 1800 conteneurs pour le système, 900 conteneurs pour chaque ligne, tout en optimisant les opérateurs du système.

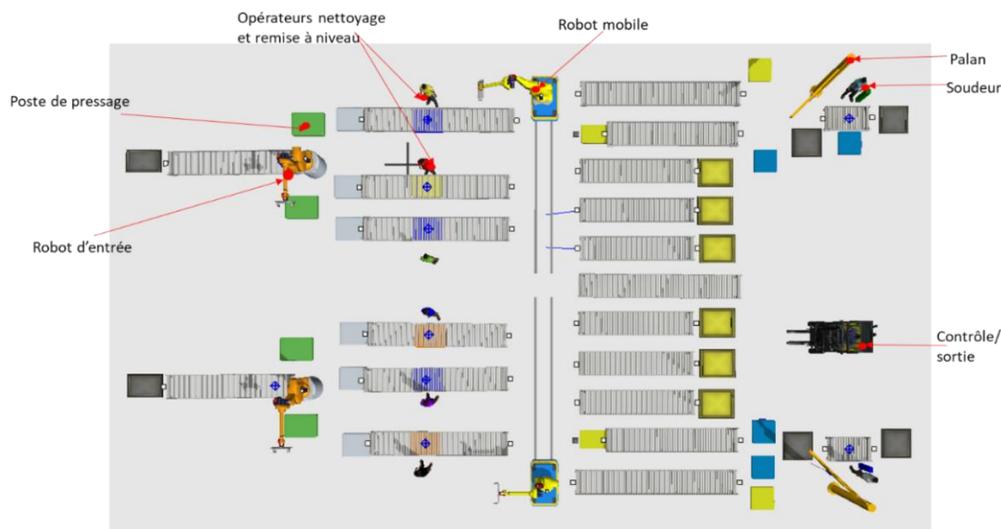


Figure 46: Une capture d'écran du modèle de simulation de la ligne de traitement des conteneurs

L'implantation de la configuration actuellement en place est montrée sur la capture d'écran de la Figure 46. Chaque ligne est faite d'un robot en entrée, de trois (3) postes de nettoyage/remise à niveau, d'un robot mobile et d'un poste de soudure. Le contrôle visuel et la sortie des conteneurs n'étant pas inclus dans l'étude, chaque ligne a au total 4 opérateurs et deux robots. Pour une configuration faisant fonctionner les deux lignes, il y a un total de huit (8) opérateurs (6 opérateurs pour chacun des six postes de travail, 2 soudeurs), en plus deux opérateurs sont prévus pour des remplacements.

### 3. Une décomposition modulaire du système et construction de la base de données

#### a) Circonscrire le système et niveau de décomposition

Le système est décrit sur trois niveaux : système, ligne et machine. Le niveau système correspond à l'ensemble du système que nous considérons, de l'entrée des conteneurs à la sortie de ceux-ci avant le contrôle. Dans notre étude, nous n'allons pas inclure le stockage des conteneurs en amont et en sortie des lignes de traitement. Le niveau ligne correspond à la description de chacune des lignes indépendantes qui forment le système, le niveau machine quant à lui renvoie aux postes de travail, aux opérateurs et robots présents dans le système. Comme mentionné plus haut, le poste de contrôle/sortie ne sera pas considéré dans cette étude, ceci n'affecte pas l'objectif de production fixé. En effet, le contrôle en sortie de ligne permet de vérifier visuellement si les conteneurs sont conformes ; très peu de conteneurs sont recalés à cette étape du processus.

#### b) Identification de l'architecture

Les éléments de l'architecture physique sont les suivants :

- Au niveau système : l'ensemble des ressources qui décrivent chaque configuration
- Au niveau ligne : il s'agit de ressources décrivant les lignes indépendantes qui constituent le système
- Au niveau machine : ce sont les ressources décrivant les postes de travail, les postes d'entrée et acheminement vers la sortie, les opérateurs et les robots.

Pour ce qui de l'architecture logique, la règle qui s'applique pour les modules au niveau machine est le FIFO (first in first out) : le premier conteneur à se présenter devant un poste de travail est traité. Pour le cas des robots, il existe des programmes particuliers qui décrivent leur comportement, ceci reste une propriété de TER Rental.

#### c) Les module et leur codification

Nous allons suivre la même logique de codification que précédemment en y ajoutant une précision. En plus des indications sur les modules et de leur niveau de décomposition, la ligne à laquelle le module appartient sera aussi précisée dans le code du module. Le niveau système est identifié par le 0, le niveau ligne par 1 et le niveau machine par 2. Exemple : M2L1Rbt renvoie par exemple au

module robot de niveau machine de la ligne 1. Une décomposition modulaire de ce système est présentée par le Tableau 14 ci-après.

Tableau 14: Une décomposition modulaire de la ligne sur trois niveaux

Les niveaux de décomposition	Système	Ligne	Machine
Les modules considérés	Le système de traitement des conteneurs	Ligne de traitement 1	Arrivée des conteneurs
			Robot d'entrée
			Presses
			Postes de travail nettoyage et remise à niveau
			Robot mobile
			Poste de soudage
			Palan
			Acheminement vers la sortie
			Contrôle et sortie des conteneurs
			Opérateurs nettoyage et remise à niveau
		Soudeur	
		Ligne de traitement 2	Idem que pour la ligne 1

*d) Les attributs des classes*

Une attention particulière est portée dans ce cas d'étude sur les opérateurs, nous allons présenter les attributs les décrivant. Chaque opérateur a des compétences qui permettent de l'assigner ou non à un poste de travail. Ici les compétences des opérateurs sont évaluées selon leur capacité à performer les opérations en respectant le temps opératoire. Plus un opérateur sera compétent plus

il sera rapide, à l'opposé, un opérateur moins compétent prendra plus de temps à réaliser les opérations. Une matrice permet donc de décrire la performance de chaque opérateur par rapport à l'opération. Un coefficient est attribué pour chaque opération : si le coefficient est égal à 1, l'opérateur réalise l'opération selon le temps opératoire moyen. Plus le coefficient est inférieur à 1, plus l'opérateur est compétent. Ainsi, dans la table « Module\_operators » qui décrit les opérateurs nous allons associer à chaque opération le coefficient décrivant la compétence de l'opérateur.

#### *e) Construction et alimentation de la base de données*

Le système installé depuis quelques années déjà n'a pas d'historique. L'objectif de ce cas étant d'étudier les dispositions optimales des opérateurs dans le système, la structure physique des postes telle qu'installée à ce jour ne sera pas changée. Seuls les opérateurs et leur affectation peuvent évoluer. Le système n'ayant pas d'historique, les configurations de la base de données sont celles dont les résultats de simulations seront satisfaisants.

Il y a au total dix (10) opérateurs pour le système : ceux utilisés (8) et ceux prévus pour le remplacement (2). Le responsable de la ligne décide de faire fonctionner soit une des lignes, soit les deux, en fonction des plannings prévisionnels de production. Dans tous les cas, l'atteinte des objectifs de production, de même que l'optimisation de l'utilisation des opérateurs restent les besoins de reconfiguration à satisfaire.

Dans la base de données, nous avons enregistré les résultats de différents scénarios d'assignations opérateurs/poste de travail selon leurs compétences. Au total, la base de données est constituée de 8 configurations.

### *4. Application de la démarche de choix de configuration*

#### *a) Besoin de reconfiguration*

Pourquoi le système veut être reconfiguré ? Pour atteindre l'objectif du volume de production tout en optimisant l'utilisation des opérateurs du système. Concrètement, ce besoin se traduit par les critères qui suivent :

- Critère 1 : un volume de production journalier d'au moins 90% du volume désiré. Ce qui correspond à 1800 conteneurs pour les 2 lignes soit 900 conteneurs par ligne.
- Critère 2 : privilégier les opérateurs déjà présents pour le système. C'est-à-dire limiter l'utilisation des remplaçants.

*b) Recherche de solution(s)*

Nous allons dans un premier temps considérer que la limite du critère 2 est infinie. Les configurations candidates sont celles qui permettent de traiter par jour au moins 1800 conteneurs pour un fonctionnement en 2 lignes, ou 900 conteneurs pour un fonctionnement en ligne unique. Après recherche dans la base de données, les configurations qui satisfont ces critères sont données en Figure 47.

config_code	module_code	KPI_code	simu_value
Conf 1	M1L1	I1PF	936.0
Conf 2	M0Syst	I0PF	1809.0
Conf 2	M1L1	I1PF	1026.0
Conf 3	M0Syst	I0PF	1845.0
Conf 3	M1L1	I1PF	1026.0
Conf 4	M0Syst	I0PF	1836.0
Conf 4	M1L1	I1PF	1026.0
Conf 8	M0Syst	I0PF	1008.0
Conf 8	M1L1	I1PF	1008.0

Figure 47: Résultat de la requête pour le premier critère

On peut remarquer au niveau système (M0Syst) que le nombre de produits fabriqués (I0PF) des configurations 2, 3 et 4 qui fonctionnent avec 2 lignes, répondent au critère. La ligne 1 (M1L1) de ces configurations aussi permet d'atteindre les 900 conteneurs désirés pour chaque ligne, ce qui n'est pas le cas de la ligne 2 de ces configurations.

Pour la configuration 8 la quantité des produits fabriqués au niveau système est égale à celle fabriqué au niveau ligne car cette configuration fonctionne en ligne unique. Par contre, la configuration 1 qui fonctionne avec les 2 lignes ne permet pas au niveau système d'atteindre les 1800 conteneurs, bien qu'au niveau d'une de ses lignes l'objectifs des 900 conteneurs est dépassé.

On peut en déduire que seules les configurations 2,3,4 et 8 répondent au premier critère et sont donc considérées comme étant les configurations candidates.

Nous allons à présent étudier les opérateurs de chacune de ces configurations pour déterminer celles qui satisfont le deuxième critère.

Le second critère de cette étude, est de s'assurer d'optimiser l'utilisation des opérateurs dans le système. En effet, il s'agit ici de privilégier les configurations qui ne font pas appel aux remplaçants. Ces remplaçants sont en effet affectés à d'autres lignes de l'usine, mais peuvent être déplacés, de ce fait, ils coûtent plus chers. L'idéal pour une configuration serait donc d'avoir tout au plus un remplaçant.

Parmi les configurations 2,3,4 et 8, nous effectuons une requête pour savoir quels sont les opérateurs utilisés et à quel poste ils sont assignés. Le résultat de la requête est montré sur la Figure 48.

config_code	matricule_operateur	poste_de_travail	performance_description	comment
Conf 2	Mat361OP1	M2L1Ws_1	nettoyage et remise à niveau	initial
Conf 2	Mat1140P4	M2L1Ws_2	nettoyage et remise à niveau	initial
Conf 2	Mat954OP3	M2L1Ws_3	nettoyage et remise à niveau	initial
Conf 2	Mat581OP2	M2L2Ws_1	nettoyage et remise à niveau	initial
Conf 2	Mat256OP5	M2L2Ws_2	nettoyage et remise à niveau	initial
Conf 2	Mat398OP6	M2L2Ws_3	nettoyage et remise à niveau	initial
Conf 2	Mat456OP7	M2L1Soud	soudure	initial
Conf 2	Mat698OP8	M2L2Soud	soudure	initial

config_code	matricule_operateur	poste_de_travail	performance_description	comment
Conf 3	Mat361OP1	M2L1Ws_1	nettoyage et remise à niveau	initial
Conf 3	Mat1140P4	M2L1Ws_2	nettoyage et remise à niveau	initial
Conf 3	Mat954OP3	M2L1Ws_3	nettoyage et remise à niveau	initial
Conf 3	Mat369OP9	M2L1Ws_1	nettoyage et remise à niveau	remplaçant
Conf 3	Mat256OP5	M2L2Ws_2	nettoyage et remise à niveau	initial
Conf 3	Mat398OP6	M2L2Ws_3	nettoyage et remise à niveau	initial
Conf 3	Mat456OP7	M2L1Soud	soudure	initial
Conf 3	Mat698OP8	M2L2Soud	soudure	initial

config_code	matricule_operateur	poste_de_travail	performance_description	comment
Conf 4	Mat361OP1	M2L1Ws_1	nettoyage et remise à niveau	initial
Conf 4	Mat1140P4	M2L1Ws_2	nettoyage et remise à niveau	initial
Conf 4	Mat954OP3	M2L1Ws_3	nettoyage et remise à niveau	initial
Conf 4	Mat581OP2	M2L2Ws_1	nettoyage et remise à niveau	initial
Conf 4	Mat256OP5	M2L2Ws_2	nettoyage et remise à niveau	initial
Conf 4	Mat369OP9	M2L2Ws_3	nettoyage et remise à niveau	remplaçant
Conf 4	Mat456OP7	M2L1Soud	soudure	initial
Conf 4	Mat698OP8	M2L2Soud	soudure	initial

config_code	matricule_operateur	poste_de_travail	performance_description	comment
Conf 8	Mat986OP10	M2L1Ws_1	nettoyage et remise à niveau	remplaçant
Conf 8	Mat369OP9	M2L1Ws_2	nettoyage et remise à niveau	remplaçant
Conf 8	Mat361OP1	M2L1Ws_3	nettoyage et remise à niveau	initial
Conf 8	Mat698OP8	M2L1Soud	soudure	initial

Figure 48: Résultat de la requête pour le second critère

On remarque sur cette figure que la configuration 8, qui permet d'atteindre une capacité de plus de 1008 conteneurs /jours utilise 2 remplaçants. D'après le responsable de la ligne, bien que l'objectif initial soit dépassé, la ligne en utilisant 2 remplaçants n'est pas rentable. La configuration 8 ne passe donc pas ce second filtre. Seules les configurations 2,3 et 4 sont considérées comme configurations envisageables, car elles permettent d'atteindre l'objectif de production tout en utilisant qu'un seul voire aucun remplaçant.

*c) Enrichissement et étude de faisabilité*

Pour ce cas d'étude, l'enrichissement des configurations correspond à « enrichir » les opérateurs de la configuration, c'est-à-dire les faire monter en compétences. En analysant les performances des configurations 2, 3 et 4 (Figure 47), on voit que les configurations 3 et 4 permettent d'atteindre quasiment la même capacité de production. Cependant, les configurations 3 et 4 font appel à un remplaçant (Figure 48). Notons aussi que, la capacité de production de la ligne 1 de la configuration 2 dépasse l'objectif de 900 conteneurs, c'est aussi vrai pour les configurations 3 et 4 qui, au niveau système ont une capacité supérieure à la configuration 2. En analysant les remplaçants et leur positionnement dans les configurations, on remarque que :

- Les opérateurs de la ligne 1 des configurations 2, 3 et 4 sont les mêmes
- Dans la configuration 3 et 4, les remplaçants sont situés sur la ligne 2 aux postes de nettoyage/remise à niveau

En analysant les capacités journalières des opérateurs de ces configurations (Figure 49), on se rend compte que deux opérateurs initiaux de la ligne 2 ont les moins bonnes performances. On peut donc en déduire que ces opérateurs initiaux de la ligne 2 des configurations 2, 3 et 4 sont moins expérimentés. Ceci peut aussi expliquer le fait que, la ligne 2 dans ces configurations n'atteint pas l'objectif journalier de 900 conteneurs.

L'objectif de l'enrichissement des configurations est d'avoir des configurations qui permettent d'une part d'atteindre l'objectif de 1800 conteneur pour les deux lignes, mais aussi de permettre à chaque ligne d'atteindre une capacité journalière d'au moins 900 conteneurs. Une action pour la ligne 2 des configurations 2, 3 et 4 est donc nécessaire.

config_code	matricule_operateur	KPI_code	simu_value
Conf 2	Mat361OP1	I2PF	368.0
Conf 2	Mat581OP2	I2PF	262.0
Conf 2	Mat954OP3	I2PF	364.0
Conf 2	Mat114OP4	I2PF	371.0
Conf 2	Mat256OP5	I2PF	365.0
Conf 2	Mat398OP6	I2PF	221.0

config_code	matricule_operateur	KPI_code	simu_value
Conf 4	Mat361OP1	I2PF	368.0
Conf 4	Mat114OP4	I2PF	371.0
Conf 4	Mat954OP3	I2PF	364.0
Conf 4	Mat581OP2	I2PF	261.0
Conf 4	Mat256OP5	I2PF	354.0
Conf 4	Mat369OP9	I2PF	282.0

config_code	matricule_operateur	KPI_code	simu_value
Conf 3	Mat361OP1	I2PF	368.0
Conf 3	Mat369OP9	I2PF	347.0
Conf 3	Mat954OP3	I2PF	364.0
Conf 3	Mat114OP4	I2PF	371.0
Conf 3	Mat256OP5	I2PF	334.0
Conf 3	Mat398OP6	I2PF	208.0

Figure 49: Capacité de production journalière par les opérateurs de chaque configuration

Afin d'augmenter la capacité de production de la ligne 2, trois cas de figures se présentent : soit utiliser en permanence les opérateurs de remplacement, soit embauchés de nouveaux opérateurs, soit faire suivre aux opérateurs les moins expérimentés une formation pour les faire gagner en compétences. Les deux premières propositions conviennent moins au besoin actuel de l'entreprise. De ce fait, la suggestion de formation, semble être celle qui conviendrait le mieux. Enrichir les configurations, revient donc à faire suivre aux opérateurs de cette ligne des formations.

Avant d'implémenter les nouvelles configurations issues de cet enrichissement, l'effort de conversion doit être évalué. Ainsi, pour ce cas d'étude, évaluer l'effort de conversion du système, revient à évaluer l'effort déployé pour former les opérateurs déjà présents sur la ligne. Cet effort est estimé en terme de coût déployé pour payer la formation, information gardée par l'entreprise.

La configuration 2 pourrait alors répondre aux deux exigences de reconfigurations, à savoir atteindre les objectifs de 1800 et 900 à la fois pour le système et les 2 lignes, et d'autre part répondre au critère de la non utilisation des remplaçants.

#### d) Implémentation

L'implémentation ici correspond à l'utilisation dans le système des opérateurs formés. Une nouvelle évaluation de ces opérateurs, permettra de statuer sur la valeur ajoutée de la formation reçue. Toutefois, à ce stade de l'étude, l'analyse modulaire du système a permis d'identifier des

points d'ombre du système (notamment concernant l'affectation des opérateurs en tenant compte de leur compétence) et d'y apporter des pistes de solution,

## 5. Conclusion du cas d'étude

Nous avons illustré avec ce cas d'étude la reconfiguration induite par le changement d'assignation opérateurs – poste de travail. Nous avons pu montrer que la base de données des configurations peut aussi bien décrire les machines du système que les compétences des opérateurs. La considération des opérateurs dans l'analyse modulaire du système permet de les étudier comme des modules à part entière. Etant considérés comme des modules, ils jouent un rôle important dans l'évaluation de l'effort de conversion. Par analogie avec les modules machines qui sont soit retirés, ajustés ou ajoutés au système, les opérateurs aussi peuvent être retirés, ajustés (c'est-à-dire formés), ou ajoutés (soit par embauche soit remplacés par d'autres). Le principe d'évaluation de l'effort de conversion pour le cas d'une machine reste donc valable pour un opérateur.

## Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons montré comment la décomposition modulaire, et la démarche de choix de configurations peuvent être utilisées pour des contextes de production différents. Dans le cas d'étude LivingPackets, la méthode a permis de guider les choix de conception d'un nouveau système et dans le cas TER Rental, l'accent est mis sur le rôle des opérateurs dans la reconfiguration. Le modèle de données de référence a été ainsi adapté pour la construction des bases de données décrivant les deux exemples. La méthode d'évaluation de l'effort de conversion basée sur la modularité, s'applique aussi bien pour des modules de type machine que pour des modules de type opérateur. Bien sûr, les axes d'évaluation de cet effort restent tributaires de chaque entreprise. Pour le cas TER Rental par exemple, l'effort de conversion est analysé sur l'unique axe du coût de la formation des opérateurs. Pour le cas LivingPackets il peut correspondre aux coûts des machines et au délai d'implantation de celles-ci. Toutefois pour le cas particulier des opérateurs, l'effectivité de la conversion ne peut être jugée qu'après l'implantation, étant donné qu'une compétence ne peut être mesurée ni évaluée « en temps réel », de plus, l'analyse des compétences reste subjective à chaque entreprise.

Dans l'exemple présenté ici, la compétence des opérateurs est « mesurée » par rapport à leurs performances. Pour des opérateurs dont le travail est plus cognitif que manuel, cette méthode est difficilement adaptable. L'évaluation de compétences est un sujet que nous ne traitons pas dans cette thèse. Cependant, l'idée de la capitalisation des données du système dont nous parlons dans cette thèse, peut aussi bien s'appliquer aux données machine qu'aux données des opérateurs. C'est en tout cas ce que nous avons essayé de montrer à travers le cas TER Rental. Une particularité de ces deux cas d'étude, réside dans le fait que ces systèmes sont au début de leur cycle de vie et n'ont donc pas d'historique. Ici, nous relevons toute l'importance de l'aspect modèle ajouté à la description du module. En effet cet aspect nous permet de constituer une base de données du système même si celui-ci n'est pas mature. Nous montrons aussi à travers ces exemples, que la démarche de choix d'une nouvelle configuration peut aussi bien s'appuyer sur l'historique que sur le potentiel futur de ce système.

## CHAPITRE 6 : LE CAS PARTICULIER DES RMS HOLONIQUEMENT CONTROLÉS

Les systèmes de production holoniques (HMS) et les RMS ont la modularité en commun. Les premiers sont reconnus pour leur reconfiguration dynamique (une auto reconfiguration), alors qu'intrinsèquement les RMS n'ont pas cette capacité à être « auto reconfigurable ». Pourtant on retrouve de plus en plus de systèmes résultant de l'association des deux précédents, il s'agit des systèmes de RMS holoniquement contrôlés. Cette divergence de vision de reconfiguration nous amène à nous interroger sur l'applications des propositions de cette thèse au cas particulier des RMS holoniquement contrôlés.

Ce chapitre reprend les propositions de l'article de conférence (Erica Capawa Fotsoh et al. 2021), qui résultent d'une collaboration lors d'un séjour en Afrique du Sud, dans le cadre de ma thèse, avec l'équipe de recherche MAD<sup>9</sup> de l'université de Stellenbosch en Afrique du Sud. J'ai notamment travaillé avec Karel Kruger.

### I. Les systèmes de production holonique (HMS)

#### 1. Vue d'ensemble du HMS

Parmi les systèmes déployés en vue de pallier les variations pouvant survenir dans les systèmes de production, on retrouve les systèmes de production holoniques (HMS- Holonic Manufacturing Systems) (Van Brussel 1994). Le HMS représente dans le domaine de la production, la traduction d'un paradigme des organismes vivants appelés holons (Van Brussel et al. 1998). Proposé par (Koestler 1968), un holon se réfère à un élément qui est suffisant pour exister seul, et qui peut également vivre dans un cadre social.

Ramené au contexte manufacturier, un holon est identifiable à une partie autonome et coopérative du système, c'est-à-dire qui interagit avec d'autres éléments pour atteindre les objectifs globaux du système, tout en satisfaisant ses objectifs locaux. Chaque holon représente donc une partie du

---

<sup>9</sup> MAD : Mechatronics Automation Design , <https://sites.google.com/view/mad-research-group/home>

système de production capable de localement prendre des décisions en réponse à une perturbation, tout en communiquant avec les autres holons.

Le système holonique représente une holarchie (Figure 52), c'est-à-dire un système d'holons qui coopèrent pour atteindre un objectif. Dans une holarchie, il existe trois principaux types d'holons, chacun responsable d'un aspect du système de production. L'idée des HMS, est de décomposer la complexité du système en petites entités autonomes, collaboratrices et dotées d'intelligence, dans le but de décentraliser les prises de décision et rendre le système plus réactif face aux changements (Barbosa et al. 2015). Il existe plusieurs architectures décrivant la structure du HMS, dont les plus répandues sont PROSA (Van Brussel et al. 1998) et ADACOR (Leitão 2004). L'un des objectifs de ces architectures est de proposer des lignes directrices de développement de la couche contrôle des systèmes de productions devant évoluer dans des environnements en constante évolution.

Dans l'architecture PROSA (*Product - Resource - Order - Staff Architecture*), une holarchie est composée d'holons ressources, produits et ordres. Le holon ressource est une abstraction d'un moyen de production du système (son aspect physique ainsi que sa logique de contrôle). Il peut s'agir d'un robot, un convoyeur, un

poste de travail, etc. Le holon produit quant à lui décrit le process de fabrication du produit, et contient toutes informations importantes du produit : son cycle de, matière premières, procédures qualités, etc. Le holon ordre est responsable de l'exécution correcte des tâches dans le système. Il peut être assimilé aux

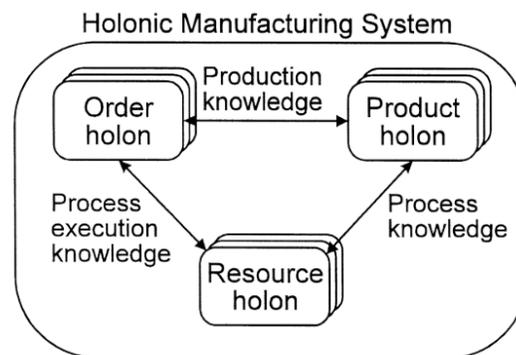


Figure 50 : Les principaux holons dans PROSA (Van Brussel et al. 1998)

ordres de fabrication, ordres de maintenances, ordres de gestion des stocks, etc. La structure PROSA est représentée sur la Figure 50. A ces trois holons, on rajoute (parfois) le holon staff, dont le rôle est d'assister les autres holons dans la réalisation de leur fonction, il est considéré comme un expert extérieur pouvant donner son avis, sans être impliqué dans la prise de décision. Mis à part

le holon ressource qui fait référence à la fois aux aspects matériel et logiciel de l'élément qu'il représente, les autres types d'holons font essentiellement référence à l'aspect logiciel.

Dans l'architecture ADACOR (*ADaptive holonic Control aRchitecture*) représenté sur la Figure 51, l'holarchie est composée d'holons opérationnel, produit et tâche. Ces holons jouent les mêmes rôles que les holons ressources, produit et ordre, décrit dans PROSA. A ces holons, est ajouté le holon superviseur, qui joue un rôle essentiel de coordination des holons sous sa responsabilité. Contrairement au holon staff de PROSA, le holon superviseur d'ADACOR est responsable de l'agrégation des compétences et des capacités des holons opérationnels qu'il supervise (Leitao and Restivo 2003).

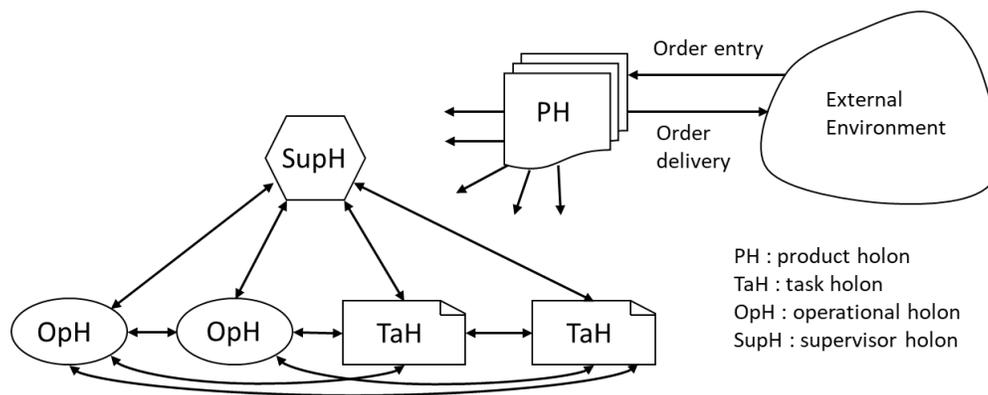


Figure 51 : Les holons d'ADACOR (adapté de (Leitao and Restivo 2003))

Les holons jouent un rôle central dans la capacité des HMS à s'adapter aux variations du système. Afin de mieux comprendre les HMS d'une part et leur rapprochement avec les RMS d'autre part, nous allons dans les paragraphes suivants présenter les caractéristiques et la structure interne du holon.

## 2. Caractéristiques du holon

Le holon possède une autonomie, des capacités d'intelligence et d'adaptation. Il décrit aussi bien les ressources physiques (palettes, robots, etc.) que les entités logiques (ordres, produits, etc.) (Leitão and Restivo 2006), et a cette particularité d'être un élément modulaire (Leitão 2004). Lorsque des changements surviennent dans le système, les holons recueillent instantanément des

informations sur leur environnement le plus proche, négocient avec d'autres holons de l'holarchie, puis prennent une décision et la transmettent par la suite au système physique qui se charge de l'exécuter. Ce processus se déroule pendant que le système est en fonctionnement, c'est l'aspect dynamique des holons.

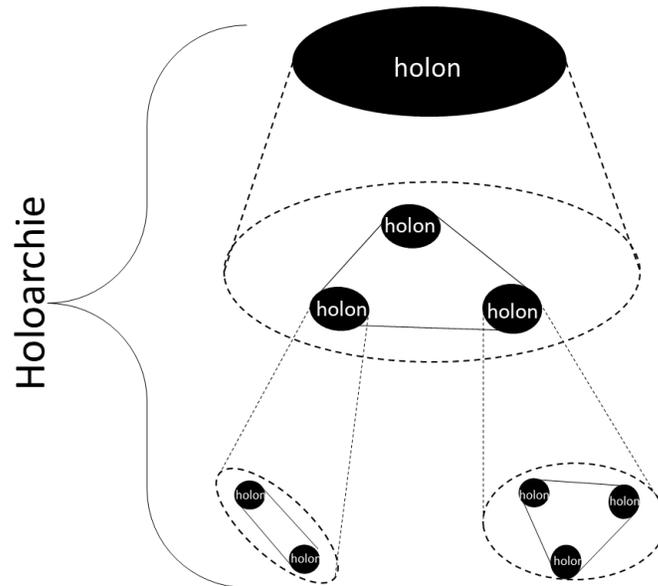


Figure 52 : Représentation du holon et de l'holarchie

(Cardin and Castagna 2009) recense trois types de comportement des holons:

- Soit un comportement basé sur les compétences : la situation qui survient est exactement la même qu'une situation précédente
- Soit un comportement basé sur les règles : lorsque la situation qui survient est similaire à une situation précédente
- Soit un comportement basé sur les connaissances : lorsque la situation qui survient n'a jamais été rencontrée auparavant, c'est-à-dire complètement méconnue de la mémoire du système.

Les deux premiers cas répondent aux besoins de dynamiques recherchés dans le cadre de l'utilisation des holons. Ici, les actions du holon sont prédéfinies par des événements déjà décrits à l'avance. Les décisions prises dans ce cas par le holon sont issues de programmes déjà présents

dans sa mémoire. Ces décisions sont transmises et appliquées au système sans intervention externe (ajustement de programmes, déplacement de machines, etc.) ; on parle de reconfiguration dynamique. Dans le dernier cas, une nouvelle solution (non incluse dans la mémoire du holon) doit être déterminée ce qui va au-delà de sa portée dynamique, car cette nouvelle solution nécessite l'arrêt momentané du système, et une intervention externe. Ici, on retrouve la reconfiguration telle que supposée pour cette thèse, c'est-à-dire la reconfiguration hors ligne, non dynamique.

### 3. La description de la structure interne du holon

La capacité du holon à adopter ces comportements (basés sur les compétences et sur les règles) provient de sa structure interne que nous allons présenter. Nous nous intéressons particulièrement au holon ressource (encore appelé holon opérationnel dans ADACOR). C'est celui dont la description est la plus complète puisqu'il intègre à la fois les aspects logiciel et matériel, alors que les autres types de holon, notamment les holons produit, commande, staff (respectivement appelés produit, tâche, superviseur dans ADACOR) peuvent n'être que des logiciels, et ne nécessiteront donc pas d'interfaçage avec une entité physique du système. Ainsi dans toute la suite, le terme *holon* fait référence au holon ressource.

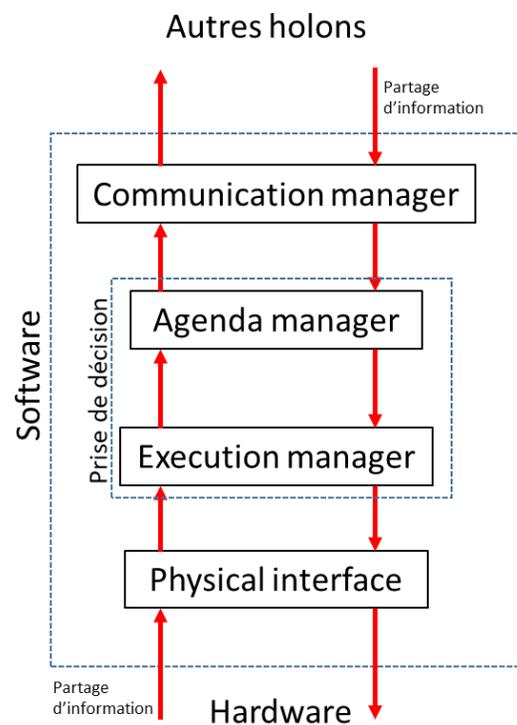


Figure 53: Structure interne du holon telle que décrite par (Kruger and Basson 2017)

La structure interne du holon que nous présentons ici est proposée par (Kruger and Basson 2017) et jumelle les structures décrites par PROSA et ADACOR. (Figure 53)

- Communication manager - Responsable de la communication : assure la communication inter-holons. Il réalise la réception et l'envoi d'information d'un holon à un autre et partage ensuite les informations à l'agenda.
- Agenda manager - Responsable de l'agenda : C'est ici qu'est géré la succession des opérations à réaliser par le holon en fonction du contexte de production. Il fait partie de la composante de décision. Il gère la liste des engagements de service que la ressource va réaliser, et déclenche le composant d'exécution. Après avoir collecté les informations nécessaires auprès des autres holons, ce composant choisit (décide) du service qui doit être réalisé afin de répondre au besoin de production, le composant exécution est alors activé et l'information est mise à jour puis partagée d'une part avec l'exécution et d'autre part avec le responsable de la communication pour informer les autres holons du système.
- Execution component - composant d'exécution : s'assure de l'exécution effective des opérations telles que décrites par l'agenda. Il échange des informations directement avec l'interface physique et choisit (décide) comment le service sera traité par la ressource, en fonction de l'état réel de la machine et du système. Il envoie l'information à la partie physique du holon au travers de l'interface. Les informations concernant la réalisation effective des opérations par la partie physique sont ensuite remontées au composant d'exécution qui les partagera avec l'agenda. L'agenda et le composant d'exécution représentent le lieu de prise de décision. C'est à eux que revient la décision du choix de l'auto-reconfiguration à adopter, en vue de s'adapter au contexte de production décrit soit par les autres holons, soit par le hardware.
- Physical interface - l'interface physique : maintient la communication entre le hardware (qui réalise les opérations) et le software composé des trois éléments précédents. Elle est généralement réalisée par une connexion OPC.

Ce sont ces différents éléments qui permettent au holon de s'auto reconfigurer en cas de changements dans le contexte de production, à condition que la situation qui survient ait déjà été répertoriée dans la mémoire du holon. C'est l'harmonie de l'holarchie, qui assure au système la réactivité face aux incertitudes de l'environnement de production en lui procurant une flexibilité dynamique (Giret and Botti 2009).

#### 4. Le rapprochement entre HMS et RMS et motivation de la proposition

Les HMS et les RMS sont tous les deux des systèmes de production conçus pour s'adapter aux variations de l'environnement de production. Les HMS sont fondés sur la notion de holons et les RMS sur la notion de modules. De plus, le holon est modulaire et permet une description des éléments matériels et logiciels du système qu'il représente. Par rapprochement aux idées développées dans cette thèse, le holon pour un HMS représente le module pour un RMS.

Les HMS ont la capacité d'être dynamiquement reconfigurés, pour des situations prédéfinies, et les RMS quant à eux vont au-delà de cette limite. Ils offrent des possibilités de reconfiguration au-delà de scénarios prédéfinis, mais des reconfigurations non dynamiques. Afin de tirer avantages de ces deux paradigmes, des auteurs tels que (F. Wang et al. 2005), (Jimenez Gordillo 2017) et (Kruger 2018), ont travaillé à développer des systèmes capables d'allier la dynamique des HMS et les grandes possibilités de reconfiguration des RMS. Aujourd'hui, de nombreux RMS utilisent des développements issus des HMS pour être implémentés et vis vers ça.

Etant donné que les situations de reconfigurations qui surviennent ne sont pas toujours prédéfinies dans la mémoire du holon (Jimenez et al. 2015), les RMS qui utilisent une architecture de contrôle holonique doivent pouvoir gérer à la fois des scénarios de reconfiguration dynamiques et non dynamiques. Par conséquent, la structure des holons doit être conçue de manière à s'adapter aux deux cas. Les descriptions des structures du holon qui existent jusqu'à présent dans la littérature ne prennent en compte que leur aspect dynamique. Il est donc nécessaire de revoir la structure interne des holons, afin qu'elle puisse à la fois maintenir son dynamisme pour les situations connues ou prédites, et réagir aux nouvelles situations inconnues. Cette analyse nous a conduit à nous interroger sur l'application des propositions de cette thèse aux cas particuliers des RMS holoniquement contrôlés.

L'approche développée dans nos travaux se base sur la notion de modules. Les RMS et les HMS ont cela de commun, ils sont des systèmes modulaires. C'est donc partant de ce point commun que nous allons proposer un enrichissement de la structure interne du holon.

## II. Proposition d'enrichissement de la structure interne du holon

Dans l'approche de la vision modulaire développée dans cette thèse, le module en plus de la dualité physique et logique de contrôle intègre aussi des aspects performances (KPI) et modèle. Ces deux derniers aspects jouent un rôle important dans les prises de décisions de reconfiguration, notamment pour des situations où la reconfiguration ne peut être dynamique.

Afin de s'assurer que les holons utilisés pour décrire les RMS s'alignent avec cette approche modulaire tout en permettant de répondre aux situations de reconfiguration non dynamiques, nous proposons d'intégrer les aspects KPI et modèle à la structure du holon. En effet, en associant à chaque holon un modèle le représentant ainsi que des KPIs le décrivant, il sera possible d'évaluer et de décider d'une reconfiguration qui n'existe pas encore dans la mémoire du holon. Lorsque surviendra une situation inconnue du holon, le modèle de simulation de celui-ci sera utilisé pour tester de potentielles configurations, et les KPIs serviront à évaluer ces configurations par rapport à l'objectif. Si les résultats obtenus sont satisfaisants, ils seront intégrés dans la mémoire du holon.

Sur cette base, nous proposons d'intégrer dans la structure interne du holon une couche modèle et une couche KPI. La structure proposée (Figure 54) est basée sur celle proposée par (Kruger and Basson 2017), Cette structure est faite des éléments suivants :

- Communication manager, agenda manager, execution component et physical interface, qui ont les mêmes fonctions définies précédemment.
- Une couche KPIs : Cette couche contient des informations sur les performances du holon qui vont guider les choix de reconfiguration. Ces KPIs sont soit simulés (issus du modèle de simulation), soit mesurés sur le système réel, ou encore imposés par le contexte de production. La mise en relation de chaque KPI avec son holon permet d'une part une analyse modulaire et plus précise du système, et d'autre part une évaluation des performances du holon pour mieux guider les décisions de reconfiguration.
- Une couche Modèle : Cette couche contient une représentation de la partie physique et ou logique délimitée par le holon et est une représentation fidèle du système de production (Brandimarte and Villa 2013). De même que l'aspect modèle du module, la couche modèle du holon permet de prévisualiser le comportement du holon, et guide aussi les décisions de

reconfiguration. Les modèles peuvent être des modèles de simulation (tel que montré et utilisé dans le cadre de cette thèse), des modèles analytiques ou même des modèles hybrides (Buzacott 1985). De même qu'avec les modules, les données de simulations peuvent être stockées dans une base de données qui ensuite alimentera la prise de décision du holon en cas de reconfiguration.

Ces deux couches viennent renforcer la structure interne du holon, permettant ainsi une reconfiguration du système spécialement dans le cas où le comportement du holon doit être basé sur la connaissance, où l'auto reconfiguration n'est pas possible. Toutefois, les configurations testées par la couche modèle, évaluées par la couche KPI, validées et enregistrées dans la base de données peuvent désormais alimenter *l'agenda manager* et *l'execution manager*, permettant ainsi au holon de répondre plus rapidement aux sollicitations.

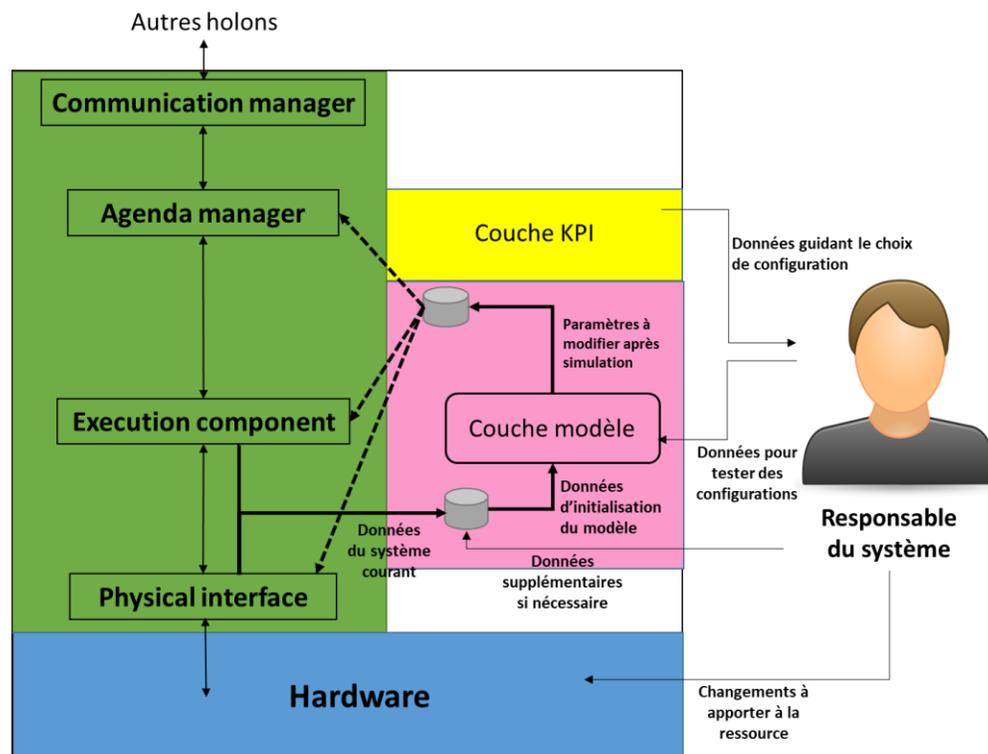


Figure 54: Proposition de la structure interne du holon enrichi

Avec cette nouvelle structure enrichie, le holon ne sera plus « abandonné » à lui-même devant une situation inconnue. S’il est vrai que l’indépendance du holon a permis de grand progrès dans le domaine de la reconfiguration dynamique du système, le manque d’assistance à cet holon a parfois occasionné des blocages conséquents du système (Jimenez et al. 2015). Désormais, avec cette structure enrichie du holon, il sera possible de répondre à davantage de situations de reconfiguration, sans mettre à mal le potentiel dynamique du holon.

Le holon enrichi se présente ainsi comme un véritable substitut du module tel que présenté dans cette thèse. Ils ont tous les deux des aspects physiques et logique de contrôle pour décrire le système, et en plus les aspect KPI et modèle pour guider et évaluer les décisions de reconfiguration. Cet holon ainsi enrichi permet aux RMS holoniquement contrôlés de s’aligner aux propositions faites dans le cadre de cette thèse.

### Un exemple illustratif

Il s’agit du holon enrichi décrivant un poste de travail de l’exemple illustratif que nous avons explicité dans (Erica Capawa Fotsoh et al. 2021).

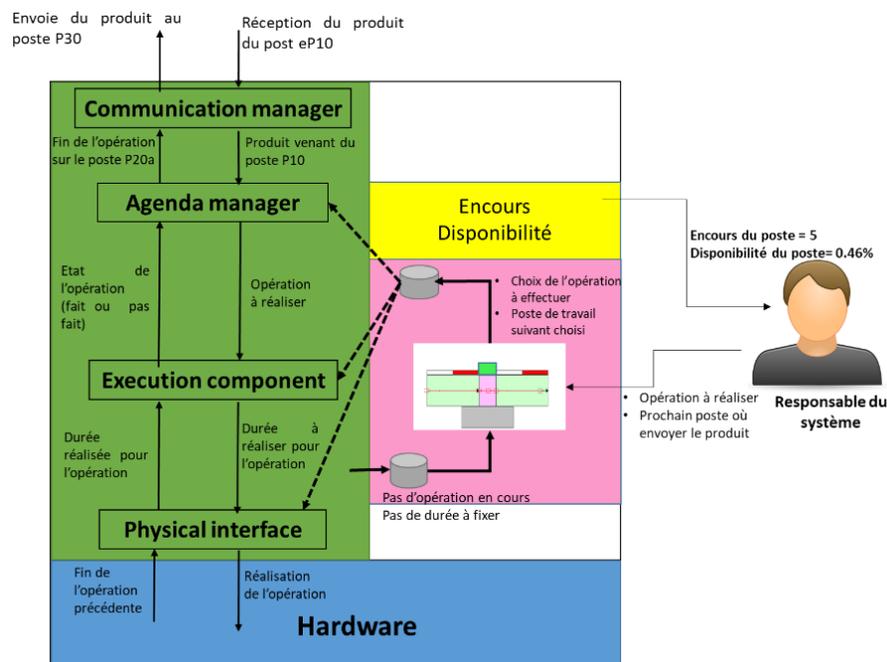


Figure 55 : Exemple illustratif du holon enrichi (tiré de (Erica Capawa Fotsoh et al. 2021))

Dans cet exemple, nous avons montré l'utilisation du holon enrichi a permis de déterminer le poste de travail où envoyer le produit ainsi que l'opération à effectuer, dans un cas où la reconfiguration dynamique du holon ne pouvait être utilisée. Le responsable du système s'est alors servi du modèle de simulation du holon représentant le poste de travail, pour tester et évaluer différentes possibilités, avant de l'implémenter. L'encours du poste, ainsi que la disponibilité de celui-ci, sont les performances qui ont guidés ses choix. Les informations circulant entre les différents éléments du holon sont représentés sur la Figure 55.

### III. Les utilisations possibles du holon enrichi

#### 1. Dans un contexte de reconfiguration

Dans le contexte de la reconfiguration, le holon enrichi sera utilisé pour prévisualiser les configurations potentielles, ou pour évaluer les conséquences des comportements avant leur implémentation. Lorsqu'une situation de reconfiguration à laquelle ne peut répondre la dynamique du holon se présente, le responsable de production a généralement peu de temps pour réagir. Cette réaction doit bien sûr dépendre de l'état du système et des objectifs attendus. Pour mieux connaître les conséquences de ses choix, le responsable de production peut utiliser le modèle du système comme outil d'analyse. Le modèle du système est construit de façon modulaire c'est-à-dire par agrégation des modèles et KPIs des différents holons. Différentes configurations du système peuvent alors être testées et évaluées, et la configuration qui correspond le mieux au nouveau contexte de production est choisie. Les données résultantes de cette configuration et les paramètres sont partagées avec les composantes du software du holon (communication manger, agenda manager, execution component et physical interface), qui se chargeront de les transmettre aux autres holons du système. Le modèle du système peut également être utilisé comme un outil de prévision dont le responsable de la production se servira pour tester et introduire de nouvelles données afin d'anticiper de nouveaux scénarios de configurations possibles. Si les résultats de ces tests sont concluants, les paramètres des holons correspondants sont enregistrés dans une base de données, et utilisés au moment opportun. Le modèle de référence proposé dans cette thèse peut alors servir de socle pour la construction de cette base de données.

## 2. Dans un contexte d'aide au pilotage

Le pilotage d'un système consiste à décider dynamiquement des instructions pertinentes à donner à ce système afin d'atteindre un objectif donné (Trentesaux 2002). Pour les RMS qui utilisent la contrôle holonique, l'intérêt est de satisfaire à la fois des objectifs globaux (au niveau du système) et des objectifs locaux (au niveau de chaque holon), notamment en cas de perturbations où la dynamique et l'auto-reconfiguration des holons ne peuvent être utilisées. Le choix de la logique de contrôle nécessite une certaine connaissance du comportement de chaque holon individuellement, et dans l'ensemble du système.

Les décisions locales des holons ont une incidence sur l'ensemble du système, raison pour laquelle ces décisions doivent être évaluées avant leur implémentation afin de savoir quelles seront les conséquences potentielles. Le holon enrichi peut être utilisé à cette fin. Il permettra d'étudier et d'évaluer les différents comportements locaux et globaux des holons afin de choisir la logique de contrôle la plus adaptée à un contexte de production, ceci grâce aux couches modèle et KPI. Le comportement choisi après les tests peut être stocké dans la base de données des configurations et être réutilisé ultérieurement. Cette utilisation du holon enrichi n'a pas encore été déployée, et constitue d'ailleurs un axe intéressant de continuité des travaux.

L'utilisation d'un modèle de simulation du système pour l'aide au pilotage n'est pas un concept nouveau. (Holvoet and Valckenaers 2006) ont proposé dans leurs travaux, l'utilisation de D-MAS comme moyen de représenter virtuellement les tâches des holons et de prévoir l'impact des interactions futures entre holons. Cette représentation virtuelle est aussi utilisée au sein de l'architecture ARTI (Activity- Resource-Type- Instance, qui est une mise à jour de PROSA) (Valckenaers 2019), dont le but est de clairement mettre en avant la notion de jumeau numérique, de plus en plus répandue (Derigent, Cardin, and Trentesaux 2020).

Pour l'application du jumeau numérique par exemple, le modèle utilisé pour représenter le holon est très souvent une simulation en ligne, c'est-à-dire, le modèle de simulation communique directement avec le système pour l'échange d'informations. Le processus de reconfiguration ici est dynamique et basé sur une décision comportementale prédéfinie. Pourtant, lorsque la situation est imprévue, inattendue et non prédéfinie, le système se bloque, et aucun des jumeaux physique ou

numérique ne sait comment réagir. C'est ici que la proposition d'ajouter les couches modèle et KPI à la structure interne du holon prend tout son sens. Tout comme le D-MAS, le holon enrichi est utilisé comme un outil de prévisualisation. Mais en plus, cet holon enrichi peut être considéré comme une étape supplémentaire dans l'aide à la décision de pilotage. De plus, il offre des possibilités d'aide à la décision relative aussi bien au software qu'au hardware (les changements pouvant être apportés sur la ressource après simulation par exemple).

#### IV. L'agrégation des données

Puisque chaque holon a ses propres paramètres et un comportement lui étant propre, il est nécessaire de définir au niveau du système un moyen de fédérer ces différents paramètres. Il est donc essentiel de pouvoir agréger les modèles, les KPI et les comportements, sans toutefois détériorer l'informations ou trop limiter l'indépendance de ces holons. En effet, les données des holons prises individuellement sont pertinentes pour une analyse locale. Elles doivent être intégrées dans les données globales du système afin de garantir la cohérence du processus de décision pour une vision globale du système. Le modèle du holon donne une vue partielle du système, mais la prise de décision au niveau du système doit prendre en compte des informations supplémentaires. On retrouve une fois de plus la notion d'agrégation (cf. chapitre 2 et (Erica Capawa Fotsoh, Castagna, et al. 2020)) (Figure 56), nécessaire pour coordonner les holons afin de garantir la pertinence des décisions au niveau système. Plus il y a de holons, plus il y a d'informations locales sur le système et plus il est nécessaire de les agréger et de les faire remonter au niveau du système. La pertinence du modèle et des KPIs dépendra donc du modèle d'agrégation choisi et de la granulométrie de la décomposition holonique, tel que mentionné pour le cas de la vision modulaire du système. L'agrégation dans les contrôles holoniques reste un enjeu important et d'actualité.

#### Conclusion

Ce chapitre visait à étudier le cas particulier des RMS holoniquement contrôlés. Ces systèmes sont décrits au travers des holons et font face à des reconfigurations qui ne sont pas toujours dynamiques. Or les structures du holon qui existaient jusqu'à présent ne concernaient que cette reconfiguration dynamique. Nous avons donc proposé d'intégrer les couches modèle et KPIs à la structure interne des holons, afin de palier ce besoin de reconfiguration non dynamique. Ces

couches sont construites de manière modulaire et s’alignent aux propositions décrites dans cette thèse. De cette manière, que ce soit pour un RMS « classique » ou un RMS holoniquement contrôlé, l’idée de la décomposition modulaire peut être appliquée. Dans le premier cas, le système sera décrit par les modules, et dans le second par des holons. Dans tous les cas, le système et ses éléments seront décrits suivant quatre aspects : physique, logique de contrôle, KPI et modèle.

L’intérêt de la proposition du holon enrichi est à la fois pour la reconfiguration et pour l’aide au pilotage. Plus encore, si le modèle de simulation utilisé pour chaque holon est une simulation en ligne, la proposition du holon enrichi se présentera alors comme un pas de plus vers l’implémentation des jumeaux numériques (Digital Twins). La construction modulaire de ces jumeaux s’apparente aux travaux développés par (Redelinghuys, Basson, and Kruger 2019). Toutefois, l’agrégation des modèles, des KPIs et des comportements restent une question ouverte et d’actualité à traiter, pour la pertinence de cette proposition. Heureusement, de nombreuses recherches sont menées dans ce sens.

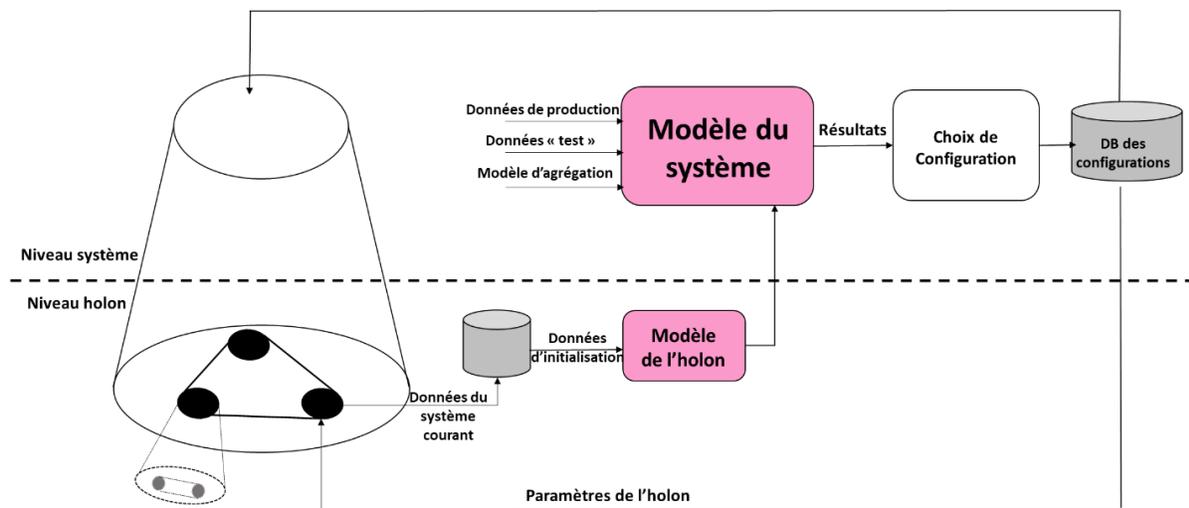


Figure 56: Illustration de l'agrégation avec les holons

# CONCLUSION GENERALE

## I. Rappel de la problématique

Nous avons vu en étudiant la littérature qu'il existe de nombreux travaux autour des RMS. Cette multitude de travaux induit des avis pas toujours convergents notamment en ce qui concerne la définition donnée à la configuration pour un RMS. Certains la considèrent selon une approche physique et d'autre selon une approche logique. Pourtant les RMS sont dotés d'une dualité physique et logique. De plus, pour les industriels, la définition donnée pour la configuration du système varie d'un contexte de production à un autre. Nous avons ainsi relevé un manque de formalisme autour de la notion de configuration, qui amène l'acteur de reconfiguration à la voir sous un certain angle et à conduire la reconfiguration selon cette perspective subjective, rendant ainsi la connaissance difficilement partageable et donc difficilement réutilisable. Or, devant une situation de reconfiguration, on voudrait pouvoir capitaliser sur les données du système afin de guider les choix de nouvelles configurations, assurer la proactivité du système, ainsi que le partage de connaissance. Les objectifs de cette thèse consistaient donc à formaliser la définition de la notion de configuration des RMS d'une part, et à proposer une démarche de choix de configurations visant à capitaliser sur les données du système.

## II. Discussions des propositions

### 1. Vision modulaire du système

Pour répondre à la problématique, nous avons axé nos réflexions sur la modularité du système. Nous avons dans un premier temps montré l'importance d'avoir une vision modulaire du système, débouchant sur une définition et une caractérisation de la configuration. Pour nous, la configuration d'un système de production est une agrégation de modules pris à différents niveaux, chaque module ayant quatre aspects (physique, logique de contrôle, KPI et modèle). Cette définition intègre les différentes approches de la configuration relevées dans la littérature (approche physique et approche commande). De plus, elle prend en compte les aspects performance et modèle, qui permettent d'évaluer et prévisualiser/anticiper sur le comportement du module, répondant ainsi aux exigences de proactivité.

Notons aussi que, il existe des situations où l'agrégation des KPIs globaux d'un système sont difficilement déductibles des KPIs des modules qui le constituent. Or, pour le choix d'une nouvelle configuration, l'agrégation des KPIs est fondamentale car elle permet de situer les KPIs globaux par rapport aux objectifs de production. C'est alors que la couche modèle du module système que nous proposons devient fondamentale. Le modèle du système global pourra alors aider à prévoir les KPIs globaux du système.

Selon notre approche modulaire, reconfigurer c'est modifier un module (un ou plusieurs aspects de ce module). Le module représente l'élément fondamental de cette approche. Il permet de conduire une analyse approfondie du système, guidant ainsi les décisions de reconfiguration. Dans cette approche, le système est modulairement décrit et analysé sur plusieurs niveaux. Plus la granulométrie de description modulaire est fine, plus il y a de précision dans la connaissance des modules. Cependant, la prise de décision de reconfiguration se faisant au niveau système, les données doivent être agrégées. Ici apparaît la limite de cette approche. En effet, l'agrégation est une notion complexe; plus il y a de données, plus difficile peut être l'agrégation (Bouyssou et al. 2006). Dans notre approche, cette agrégation concerne aussi bien les aspects physiques que les aspects logiques, KPI ou encore modèle. S'il est vrai que la notion d'agrégation des données numériques est assez répandue notamment dans le domaine économique/financier, l'agrégation des logiques de contrôle et des modèles doit encore faire l'objet de recherches.

Cette notion d'agrégation est donc à prendre en compte dans la décomposition modulaire du système pour rendre viable notre approche. De ce fait, nous suggérons que le choix des modules se fasse en fonction de la maîtrise des méthodes ou outils d'agrégation. Le tout n'étant pas d'avoir absolument une connaissance très précise de chaque module, mais plutôt de pouvoir intégrer les données de chaque module dans l'analyse globale du système avant de le reconfigurer.

## 2. Modèle de données de référence

Dans le but de répondre au besoin de capitaliser sur les données du système pendant le processus de reconfiguration, nous avons proposé un modèle de données visant à décrire une configuration. Ce modèle de référence basé sur la vision modulaire du système, décrit la configuration selon les modules qui la constituent, les produits qu'elle fabrique et le contexte dans lequel elle est utilisée,

et intègre aussi l'affectation des opérateurs aux machines. L'objectif de ce modèle de référence est de parvenir à la construction d'une base de données utilisée pour stocker les configurations passées, présentes et potentiellement futures du système. Le modèle se veut assez générique pour intégrer la plupart des données de différents systèmes. Cependant il n'est pas rigide, et peut être personnalisé selon le contexte dans lequel il est utilisé. Ceci a été testé avec les cas d'étude de la ligne QLIO de l'IUT, d'Europe Technologies/LivingPackets, ainsi que de TER Rental.

La base de données issue du modèle de référence constitue un « réservoir » de connaissance et joue un rôle central dans le processus de capitalisation des données du système. Elle permet de « savoir ce que l'on sait » du système, de partager et de valoriser ce savoir. Cependant, le modèle ne décrit pas explicitement les connexions entre les modules. L'intégrabilité physique n'est pas explicitement présentée dans le modèle. Il en est de même de l'intégrabilité des commandes (logique de contrôle). Pour l'instant, il n'existe pas d'interface permettant de préciser les points d'entrée sorties. Or, cette notion est déterminante pour les décisions de reconfiguration, car elle permet de dire si deux modules partagent des interfaces permettant de les associer (Lameche 2018).

Toutefois, le modèle de référence vient en complément à ceux proposés par (Monticolo et al. 2015) et (Mabkhot, Al-Samhan, and Darmoul 2016). Il offre en plus de la description physique et logique, la possibilité de situer chaque configuration dans un contexte par rapport à ses performances (réalisés, simulés, ou attendus). En plus, le modèle de référence intègre les opérateurs, qui à notre sens, restent des vecteurs majeurs de reconfiguration. Le cas d'étude avec TER RENTAL a montré comment l'assignation opérateur/poste de travail en fonction de leurs compétences peut fortement impacter la configuration d'un système. A notre connaissance, il n'existe pas encore dans la littérature, de modèle permettant d'intégrer les opérateurs au même titre que les machines dans la description de la configuration. Le modèle que nous proposons, marque un pas de plus vers une description de plus en plus complète de la configuration d'un RMS.

### 3. Le démarche de choix basée sur la capitalisation

La base de données issue du modèle de référence constitue le socle de la démarche de choix. Une fois les configurations enregistrées la base de données est interrogée devant chaque situation de reconfiguration, selon une démarche à quatre étapes. Chacune des étapes constituent un filtre de

sélection permettant de capitaliser le plus possible sur les données du système. Etant donné que cette base de données n'a pas pour mission de proposer uniquement des solutions de type « pick and place » les solutions issues de la base sont enrichies pour s'aligner aux besoins de configurations identifiés. Nous proposons dans cette démarche d'étudier l'effort de conversion avant de décider d'implémenter ou non une configuration. Cet effort évalue ce qu'il faut faire (en terme de coût, de temps ou d'effort technique par exemple) pour passer d'une configuration à une autre.

La bonne utilisation de la base de données dans le processus de capitalisation requiert un certain nombre de configurations dans la base de données. Les systèmes de production ont des durées de vie plus ou moins longue car les configurations sont souvent utilisées sur plusieurs années. Il peut donc arriver qu'il n'y ait pas d'historique pour le système. Or sans données pour alimenter la base, il est impossible de parler de capitalisation. C'est ici que l'utilisation de l'aspect modèle prend tout son sens. Bien que le système n'ait pas d'historique, la base de données peut être alimentée par des configurations issues de la simulation. Cela a été bien démontré avec les cas d'études industriels. Ici, les configurations imaginées qui n'ont pas pu être installées, sont tout de même sauvegardées pour une utilisation ultérieure.

La démarche que nous proposons permet non seulement de capitaliser sur les données du système, mais aussi d'évaluer la reconfiguration avant de la conduire. S'il est important de reconfigurer le système pour s'aligner aux besoins de production, il est tout de même judicieux de s'assurer que cette reconfiguration cadre avec la vision et les capacités de l'entreprise. Le calcul de l'effort de conversion est le moyen que nous proposons pour cela. Le système étant décrit et analysé par modules, l'évaluation de cet effort de conversion suit la même logique.

Cependant, dans la démarche proposée, les recherches dans la base de données sont réalisées une à une, le calcul des efforts de conversion peut quant à lui s'avérer fastidieux. Pour de grands systèmes ayant un grand nombre de données, cette démarche peut se révéler chronophage : les résultats des requêtes devront être évalués un par un, de même que les efforts de conversion. Une telle démarche perdrait alors de sa valeur devant des situations où il est primordial de se montrer réactif. L'automatisation de la démarche est indispensable pour assurer sa viabilité pour des systèmes volumineux.

Cette démarche vient compléter les méthodes multicritères citées et utilisées dans la littérature. Elle permet de guider les choix de décision au regard des performances des modules du système, et de l'effort de conversion. Toutefois, le choix des critères de sélection découle d'une approche multicritère, tel que mentionné dans le **chapitre 4**. La démarche que nous proposons vise principalement la capitalisation des données, cependant, les outils des décisions multicritères (tel que AHP par exemple) peuvent être utilisés dans le processus de la démarche. Exemple : Pour de grands système avec beaucoup de configuration, le choix des configurations envisageables à enrichir pour être testées (passage de l'étape de recherche de solution à l'étape d'étude de faisabilité) pourrait se faire à l'aide des matrices de décisions de type AHP. La démarche que nous proposons peut donc être couplée aux méthodes existantes dans la littérature.

### III. Les perspectives et futurs travaux

Ces perspectives sont présentées selon leur mise en œuvre sur du court et moyen terme.

#### 1. Vers une notion de bibliothèques de simulation

Dans la vision modulaire du système de production, nous avons proposé d'utiliser un modèle de simulation pour représenter chaque module, le modèle de simulation du système étant alors obtenu par la mise en commun des différents modèles de modules. L'idée derrière cette proposition est de permettre en cas de reconfiguration de facilement construire le modèle de simulation du système, même si la personne qui le fait n'a pas de compétences poussées en simulation de flux. Plus le système est complexe, plus la construction de son modèle de simulation est chronophage, même pour un expert en simulation. Pour y remédier, il faudrait que les modèles des modules soient disponibles et prêts à l'emploi. Il s'agit donc d'avoir à disposition, une bibliothèque contenant les différents modèles des modules du système, ce qu'on appelle une bibliothèque de simulation du système.

Nous avons montré dans (Erica Capawa Fotsloh et al. 2021) comment l'utilisation de la bibliothèque de simulation réduisait considérablement le temps, et le nombre d'objets nécessaires à la construction du modèle de simulation du système : de plus de 500 objets basiques du logiciel ARENA© à seulement 15 objets pour la bibliothèque de simulation du système. Nous abordons

aussi cela dans (Erica Capawa Fotsoh, Castagna, et al. 2020), où la bibliothèque de simulation est construite avec le logiciel FlexSim©.

Cette idée d'utiliser les bibliothèques de simulation justifie d'avantage la notion de vision modulaire du système telle que mentionnée pour le cas LivingPackets. Les modèles des modules seront alors utilisés en « pick and place » pour construire les modèles de simulation du système. Ceci va permettre des gains considérables en temps et une simplification significative de la complexité liée à la construction de modèles de simulation. De plus, les personnes appelées à utiliser ces bibliothèques n'auront pas forcément besoin d'avoir des connaissances soutenues en simulation. Toutefois, le choix des modules de la bibliothèque est bien sûr lié à la décomposition modulaire du système et la taille de la bibliothèque, et sera tributaire de la granulométrie de cette décomposition.

Avec le développement des outils de simulations, nous sommes convaincus que cette approche par bibliothèque représente un levier considérable à l'utilisation des modèles modulaires de simulation comme outil de prédiction/prévisualisation en cas de reconfiguration, de même que pour l'aide au pilotage (pour les RMS holoniquement contrôlés par exemple).

## 2. Vers une notion de système Expert

L'une des limites relevées pour la démarche de choix proposée est le manque d'automatisation. Or, plus le système est grand, plus il y a de données, et plus il sera difficile d'appliquer la démarche proposée. Il est donc préférable d'automatiser le processus d'utilisation de la base de données : au lieu d'avoir à manuellement écrire requêtes et analyser les résultats un par un tel qu'expliqué précédemment, il serait préférable d'avoir un système capable de :

- Générer automatiquement les requêtes à la demande de l'utilisation, car tous les utilisateurs de la base de données ne maîtrisent pas forcément le langage SQL.
- Trier et classer les résultats des requêtes en fonctions des critères préalablement définis.
- Présenter à l'utilisateur des données pertinentes lui permettant de conduire sa prise de décision

Pour cela, nous proposons le développement d'un système expert (SE) qui se servira de la base de données de configuration et des connaissances des experts sur le contexte de l'entreprise, le contexte concurrentiel, et d'autres informations relatives aux processus internes de l'entreprise. Ce SE construira les requêtes SQL en fonction des demandes saisies par l'utilisateur, ensuite effectuera les recherches dans les bases de données, hiérarchisera au besoins les résultats selon des critères définis par l'utilisateur, pour enfin ne montrer à l'utilisateur que le juste nécessaire pour sa prise de décision. L'objectif de ce SE est double : d'abord, il s'agit d'automatiser la démarche de capitalisation proposée, ensuite, d'affiner cette démarche au travers des données qui ne figurent pas forcément dans la base de données de configurations, par exemples des règles définies les experts, les contraintes liées à la législation, etc..(Figure 57).

### 3. Vers la conception d'un configurateur

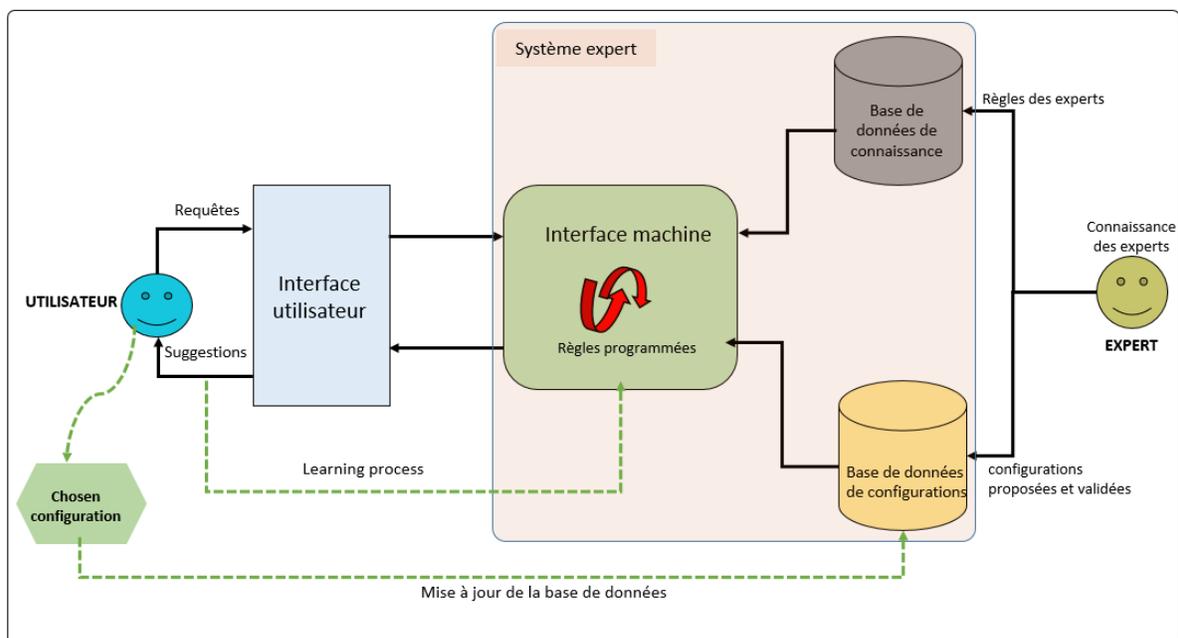


Figure 57: Utilisation du Système Expert dans le choix de nouvelle configuration, inspiré de (Tan et al. 2016) et (Leo Kumar 2019)

Jusqu'ici les propositions et perspectives que nous avons évoquées, pour tester les configurations, ont besoin au préalable de manuellement construire le modèle de simulation. L'utilisateur devra pour chaque idée de reconfiguration, construire un modèle, l'évaluer, décider de conserver ou pas

ses données. S'il est vrai que la construction du modèle de simulation peut être allégée avec l'utilisation des bibliothèques de simulation, il n'en demeure pas moins vrai que cette tâche conduite de manière répétitive peut tout de même être chronophage. Il faudrait donc également l'automatiser.

De plus en plus, les auteurs s'intéressent à la génération automatique des modèles (par exemple (Pichard et al. 2017), (Foucher and Albert 2018)). Cette même idée pourrait servir à la conception d'un configurateur permettant de générer des modèles de simulation des configurations puis les tester de manière automatique. Les données des configurations jugées satisfaisantes seront alors envoyées vers la base de données de configuration.

Le configurateur utilisera les modèles de modules de la bibliothèque, puis générera automatiquement des modèles du système selon les spécifications de l'utilisateur. Ces configurations seront alors simulées et les performances automatiquement évaluées. Cette évaluation peut se faire en comparant les performances du système avec celles introduites par l'utilisateur, ou avec celles disponibles dans le MES/ERP de l'entreprise. Sur le court terme, le MES/ERP pourra servir à alimenter la base de données de KPIs directement mesurés sur le système.

A terme, le configurateur se présente comme un outil d'aide à la reconfiguration et au pilotage, dont l'objectif sera de capitaliser sur les données du système et même de l'entreprise, car il pourra être interfacé avec les outils type MES/ERP.

## Liste des publications

- **Chapitre de livre.** [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-28782-5\\_2](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-28782-5_2)

### Chapter 2 A Classification for Reconfigurable Manufacturing Systems

E. C. Fotsoh, N. Mebarki, P. Castagna and P. Berruet

**Abstract** Flexibility is a complex concept, difficult to define. Most of the definitions of flexibility refer to the adaptation of the system in a changing context, which is quite general. We propose to see flexibility as a black box, without trying to define how the system works internally. This external point of view allows most of the parameters, which influence flexibility to be identified. Our definition of flexibility highlights customer satisfaction, changes in demand and in the environment in order to remain competitive. Each of the terms of this definition is studied. We propose a typology of companies in terms of flexibility and we show why Reconfigurable Manufacturing Systems are often the solution for companies that need to combine flexibility and productivity. We develop the eight characteristics of RMS. Among these eight characteristics, we propose a new one: reconfiguration strategy that enables to choose the best way to adapt the system to changes. Finally, we discuss an approach based on an 8-dimensional KIVIAT to classify RMS.

**Keywords** Flexibility, Reconfigurable manufacturing system, Configuration design, KIVIAT diagram, Reconfiguration strategy

- **Conférence internationale APMS 2020** [https://doi.org/10.1007/978-3-030-57993-7\\_44](https://doi.org/10.1007/978-3-030-57993-7_44)

### Towards a reference model for configuration of reconfigurable manufacturing system (RMS)

Erica CAPAWA FOTSOH<sup>1,2</sup>, Nasser MEBARKI<sup>2</sup>, Pierre CASTAGNA<sup>2</sup>,  
Pascal BERRUET<sup>3</sup>, Francisco GAMBOA<sup>1</sup>

<sup>1</sup> IRT Jules Verne (French Institute in Research and Technology in Advanced Manufacturing), 44340 Bouguenais, France (erica.fotsoh@irt-jules-verne.fr, erica.fotsoh@ls2n.fr).

<sup>2</sup> Nantes University, IUT of Nantes, LS2N, BP539 44475 Carquefou Cedex, France

<sup>3</sup> Lab-STICC Research Center, University of South-Brittany, BP 92116 56321 Lorient, France

**Abstract.** Reconfigurable Manufacturing Systems (RMSs) offer the ability to change organizations to fit changing contexts. Modularity, both physical and logical, is an essential feature of RMS. Not only because it allows a wide variety of use of the system, but also because it allows to determine the other characteristics of RMS. We propose in this article a new way of defining a configuration for RMS, based on modularity. The module-based view includes four aspects: physical, control, performance and simulation, taken at different levels: system, machines or component. The introduction of the virtual view of the module aim to align the proposition with the requirement of industry 4.0 (The RAMI 4.0 architecture). Simulation and performance concern the technical, ecological or even economical aspect of the system. The module-based view of the system allows a decomposition, a description and an accurate analysis of the system, that leads to a better knowledge of the system, its components and allows a better approach to the reconfiguration process: an industrial case study is presented for illustration. A reference data model emerged from module-based view of the system. The purpose of this reference model is to create a configuration database that can be used as input to a reconfiguration decision process

**Keywords:** modularity, module-based configuration, reference model, reconfiguration process, industry 4.0.

- **Conférence internationale SOHOMA2020** [https://doi.org/10.1007/978-3-030-69373-2\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-030-69373-2_11)

## Proposition of an enrichment for holon internal structure: introduction of model and KPI layers

Erica CAPAWA FOTSOH<sup>1,2</sup>, Pierre CASTAGNA<sup>2</sup>,

Olivier CARDIN<sup>2</sup>, Karel KRUGER<sup>3</sup>

<sup>1</sup> IRT Jules Verne (French Institute in Research and Technology in Advanced Manufacturing), 44340 Bouguenais, France

<sup>2</sup>LS2N, UMR CNRS 6004, Université de Nantes, IUT de Nantes, 44 470 Carquefou, France

<sup>3</sup>Dept of Mechanical & Mechatronic Eng. Stellenbosch Univ, Stellenbosch 7600, South Africa

`olivier.cardin@ls2n.fr`

**Abstract.** The current holon structures that exist so far are built to take advantage of holon dynamism through self-reconfiguration, but not in case of unexpected situations when holon behavior is unpredicted and the dynamism is lost. In this paper, we propose a way to fill this gap, by adding a model layer and a KPI layer to the holon internal structure. The specificity of these layers is that they allow both dynamic and non-dynamic reconfigurations for RMS that use holonic control. The added layer could then be used as forecasting and previewing tool and could be considered as one more step in aid in control (e.g. for digital twin), as well as an additional tool in the reconfiguration process. An application on a learning factory shows the feasibility of the proposed concept, that brings perspectives on the notions of data and models aggregation.

**Keywords:** holon internal structure, model layer, KPI layer, RMS, HMS

- **Conférence internationale MOSIM 2020** <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03177750>

*13<sup>th</sup> International Conference on Modeling, Optimization and Simulation - MOSIM'20 – November 12-14, 2020- Agadir – Morocco "New advances and challenges for sustainable and smart industries"*

## MODULARITY OF RMS: WHAT ABOUT THE AGGREGATION?

Erica CAPAWA FOTSOH<sup>1,2</sup>, Pierre CASTAGNA<sup>2</sup>

Nasser MEBARKI<sup>2</sup>, Pascal BERRUET<sup>3</sup>

<sup>1</sup> IRT Jules Verne (French Institute in Research and Technology in Advanced Manufacturing), 44340 Bouguenais, France ([erica.fotsoh@irt-jules-verne.fr](mailto:erica.fotsoh@irt-jules-verne.fr), [erica.fotsoh@ls2n.fr](mailto:erica.fotsoh@ls2n.fr)).

<sup>2</sup> Nantes University, IUT of Nantes, LS2N, BP539 44475

Carquefou Cedex, France

[pierre.castagna@univ-nantes.fr](mailto:pierre.castagna@univ-nantes.fr)

<sup>3</sup> Lab-STICC Research Center, University Bretagne-Sud, BP

92116 56321 Lorient, France

[nasser.mebarki@univ-nantes.fr](mailto:nasser.mebarki@univ-nantes.fr)

[pascal.berruet@univ-nbs.fr](mailto:pascal.berruet@univ-nbs.fr)

**ABSTRACT:** *Modularity of Reconfigurable Manufacturing System (RMS) reduces the system complexity, both in design and evaluation of the system. In this paper we proposed a modular view of the system that considers a module regarding four aspects: physical, control logic, KPI and simulation model. The last two one allows an accurate diagnosis of the system in case of disturbances. Each module is evaluated and studied. Yet, the reconfiguration decision is made regarding the system level, thus, modules have to be aggregated. The lack of aggregation methods for simulation model and control logic, and the lack of aggregation functions for KPIs constitute the issue addressed by this paper. The aim of our study is to investigate the aggregation of these aspects of the modules in order to have accurate data at the system level for reconfiguration decision making. A case study in conducted to show how aggregation could be made. Far from proposing rigid models of aggregation, the aim of the paper is to provide opportunities of thinking about the notion of aggregation of simulation models, KPI and control logic within manufacturing context, especially within modular reconfigurable manufacturing system.*

**KEYWORDS:** *Modularity, Aggregation methods-functions, simulation model, KPI, RMS, reconfiguration decision-making*

## Références

- Abdi, M Reza. 2005. "Selection of a Layout Configuration for Reconfigurable Manufacturing System Using the AHP." *International Journal of Manufacturing Technology and Management* 17 (Number 1-2/2009): 149–65. <https://doi.org/10.1504/IJMTM.2009.023783>.
- Abdi, M Reza. 2009. "Layout Configuration Selection for Reconfigurable Manufacturing Systems Using the Fuzzy AHP." *International Journal of Manufacturing Technology and Management* 17 (1–2): 149–65. <https://doi.org/10.1504/IJMTM.2009.023783>.
- Abdi, Mohammad Reza, and Ashraf W. Labib. 2003. "A Design Strategy for Reconfigurable Manufacturing Systems (RMSs) Using Analytical Hierarchical Process (AHP): A Case Study." *International Journal of Production Research* 41 (10): 2273–99. <https://doi.org/10.1080/0020754031000077266>.
- Adolphs, P., H. Bedenbender, D. Dirzus, M. Ehlich, U. Epple, M. Hankel, R. Heidel, et al. 2015. "Reference Architecture Model Industrie 4.0 (Rami4.0)." <http://www.zvei.org/Themen/Industrie40/Seiten/Das-%0AReferenzarchitekturmodell-RAMI-40-und-die-Industrie-40-%0AKomponente.aspx>.
- AFNOR. 1991. *Organisation et Gestion de La Production Industrielle - Concepts Fondamentaux de La Gestion de Production*.
- Al-Zaher, A., W. Elmaraghy, and Z. J. Pasek. 2013. "RMS Design Methodology for Automotive Framing Systems BIW." *Journal of Manufacturing Systems* 32 (3): 436–48. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2013.04.010>.
- Alsafi, Yazen, and Valeriy Vyatkin. 2010. "Ontology-Based Reconfiguration Agent for Intelligent Mechatronic Systems in Flexible Manufacturing." *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 26 (4): 381–91. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2009.12.001>.
- Andersen, Ann Louise, Thomas Ditlev Brunoe, Kjeld Nielsen, and Carin Rösiö. 2017. "Towards a Generic Design Method for Reconfigurable Manufacturing Systems: Analysis and Synthesis of Current Design Methods and Evaluation of Supportive Tools." *Journal of Manufacturing Systems* 42: 179–95. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2016.11.006>.
- Avikal, Shwetank, Rajeev Jain, P. K. Mishra, and H. C. Yadav. 2013. "A Heuristic Approach for U-Shaped Assembly Line Balancing to Improve Labor Productivity." *Computers and Industrial Engineering* 64 (4): 895–901. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2013.01.001>.
- Azab, A., H. ElMaraghy, P. Nyhuis, J. Pachow-Frauenhofer, and M. Schmidt. 2013. "Mechanics of Change: A Framework to Reconfigure Manufacturing Systems." *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 6 (2): 110–19. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2012.12.002>.
- Barbosa, José, Paulo Leitão, Emmanuel Adam, and Damien Trentesaux. 2015. "Dynamic Self-Organization in Holonic Multi-Agent Manufacturing Systems: The ADACOR Evolution."

*Computers in Industry* 66: 99–111. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2014.10.011>.

- Benderbal, Hichem Haddou, Mohammed Dahane, and Lyes Benyoucef. 2017. “Modularity Assessment in Reconfigurable Manufacturing System ( RMS ) Design : An Archived Multi-Objective Simulated Annealing-Based Approach.” *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0803-2>.
- Berruet, Pascal. 1998. “Contribution Au Recouvrement Des Systèmes Flexibles de Production Manufacturière: Analyse de La Tolérance et Reconfiguration.” Université des sciences et technologies de Lille. <https://hal.archives-ouvertes.fr/docs/00/68/46/88/PDF/These.pdf>.
- Berruet, Pascal. 2007. “Ingénierie de La Commande et Analyse Des Systèmes Reconfigurables.” Université bretagne Sud.
- Beskese, Ahmet, Cengiz Kahraman, and Zahir Irani. 2004. “Quantification of Flexibility in Advanced Manufacturing Systems Using Fuzzy Concept.” *International Journal of Production Economics* 89 (1): 45–56. [https://doi.org/10.1016/S0925-5273\(03\)00195-6](https://doi.org/10.1016/S0925-5273(03)00195-6).
- Blessing, Lucienne T.M., and Amaresh Chakrabarti. 2009. *DRM, a Design Research Methodology*. *DRM, a Design Research Methodology*. <https://doi.org/10.1007/978-1-84882-587-1>.
- Bortolini, Marco, Francesco Gabriele Galizia, and Cristina Mora. 2018. “Reconfigurable Manufacturing Systems: Literature Review and Research Trend.” *Journal of Manufacturing Systems* 49 (September): 93–106. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2018.09.005>.
- Bouyssou, Denis, Didier Dubois, Marc Pirlot, and Henri Prade. 2006. *Concepts et Méthodes Pour l'aide à La Décision, Volume 1, Outils de Modélisation*. Hermès. <http://www.eyrolles.com/Informatique/Livre/9782746212893/livre-concepts-et-methodes-pour-l-aide-a-la-decision-volume-1.php?xd=aaf52345a1d2961020198284312840ab>.
- Brandimarte, Paolo, and Agostino Villa. 2013. *Modeling Manufacturing Systems: From Aggregate Planning to Real Time Control*. *Journal of Chemical Information and Modeling*. Vol. 53. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>.
- Browne, J., D. Dubois, K. Rathmill, S.P. Sethi, and K.E. Stecke. 1984. “Classification of Flexible Manufacturing Systems.” *The FMS Magazine*, 1984. <https://doi.org/10.1080/00207548908942637>.
- Brussel, Hendrik Van. 1994. “Holonc Manufacturing Systems, The Vision Matching the Problem.” In *First European Conf. on Holonc Manufacturing Systems, Hannover*.
- Brussel, Hendrik Van, Jo Wyns, Paul Valckenaers, Luc Bongaerts, and Patrick Peeters. 1998. “Reference Architecture for Holonc Manufacturing Systems: PROSA.” *Computers in Industry* 37 (3): 255–74. [https://doi.org/10.1016/S0166-3615\(98\)00102-X](https://doi.org/10.1016/S0166-3615(98)00102-X).
- Buzacott, J A. 1985. “MODELLING MANUFACTURING SYSTEMS.” *Robotics & Computer-Integrated Manufacturing* 2 (1).

- Campos Sabioni, Rachel, Joanna Daaboul, and Julien Le Duigou. 2021. “Concurrent Optimisation of Modular Product and Reconfigurable Manufacturing System Configuration: A Customer-Oriented Offer for Mass Customisation.” *International Journal of Production Research*, March, 1–17. <https://doi.org/10.1080/00207543.2021.1886369>.
- Capawa Fotsoh, E, N Mebarki, P Castagna, and P Berruet. 2020. “A Classification for Reconfigurable Manufacturing Systems.” In *Reconfigurable Manufacturing Systems: From Design to Implementation*, edited by Lyes Benyoucef, 11–28. Cham: Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-28782-5\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-030-28782-5_2).
- Capawa Fotsoh, Erica, Pierre Castagna, Olivier Cardin, and Karel Kruger. 2021. “Proposition of an Enrichment for Holon Internal Structure: Introduction of Model and KPI Layers.” In *Service Oriented, Holonic and Multi-Agent Manufacturing Systems for Industry of the Future: Proceedings of SOHOMA 2020*, 169–80. Springer International Publishing. [https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-030-69373-2\\_11](https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-030-69373-2_11).
- Capawa Fotsoh, Erica, Pierre Castagna, Nasser Mebarki, and Pascal Berruet. 2020. “Modularity of RMS: What about the Aggregation?” In *13ème Conférence Internationale de Modélisation, Optimisation et Simulation (MOSIM2020)*. hal-03177750.
- Capawa Fotsoh, Erica, Nasser Mebarki, Pierre Castagna, Pascal Berruet, and Francisco Gamboa. 2020. “Towards a Reference Model for Configuration of Reconfigurable Manufacturing System ( RMS ).” In *IFIP International Federation for Information Processing 2020*, 2:391–98. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-57993-7>.
- Cardin, Olivier, and Pierre Castagna. 2009. “Using Online Simulation in Holonic Manufacturing Systems.” *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 22 (7): 1025–33. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2009.01.006>.
- Cardin, Olivier, and Pierre Castagna. 2011. “Proactive Production Activity Control by Online Simulation.” *International Journal of Simulation and Process Modelling* 6 (3): 177–86. <https://doi.org/10.1504/IJSPM.2011.044766>.
- Cohendet, Patrick, Morad Diani, and Christophe Lerch. 2005. “Stratégie Modulaire Dans La Conception.” *Revue Française de Gestion* 158 (5): 121–43. <https://www.cairn.info/revue-francaise-de-gestion-2005-5-page-121.htm>.
- Contreras, Juan David, Jose Isidro Garcia, and Juan David Díaz Pastrana. 2017. “Developing of Industry 4.0 Applications.” *International Journal of Online Engineering* 13 (10): 30–47. <https://doi.org/10.3991/ijoe.v13i10.7331>.
- Daaboul, Joanna, Pierre Castagna, Catherine Da Cunha, and Alain Bernard. 2014. “Value Network Modelling and Simulation for Strategic Analysis: A Discrete Event Simulation Approach.” *International Journal of Production Research* 52 (17): 5002–20. <https://doi.org/10.1080/00207543.2014.886787>.
- Deif, Ahmed M., and Waguih Elmaraghy. 2007. “Investigating Optimal Capacity Scalability

- Scheduling in a Reconfigurable Manufacturing System.” *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 32 (5–6): 557–62. <https://doi.org/10.1007/s00170-005-0354-9>.
- Deif, Ahmed M., and Waguih H. ElMaraghy. 2006. “A Systematic Design Approach for Reconfigurable Manufacturing Systems.” In *Advances in Design*, edited by Hoda A. ElMaraghy and Waguih H. ElMaraghy, 219–28. [https://doi.org/10.1007/1-84628-210-1\\_18](https://doi.org/10.1007/1-84628-210-1_18).
- Derigent, William, Olivier Cardin, and Damien Trentesaux. 2020. “Industry 4.0: Contributions of Holonic Manufacturing Control Architectures and Future Challenges.” *Journal of Intelligent Manufacturing*. <https://doi.org/10.1007/s10845-020-01532-x>.
- Dieng-Kuntz, Rose, Jean-Marie Pierrel, Nicolas Balacheff, and Jean-Michel Salaiün. 2020. “Gestion Des Connaissances.” In *Communication et Connaissance*. <https://doi.org/10.4000/books.editions.cnrs.30828>.
- Eguía, Ignacio, Gabriel Villa, and Sebastián Lozano. 2017. “Efficiency Assessment of Reconfigurable Manufacturing Systems.” *Procedia Manufacturing* 11 (June): 1027–34. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.213>.
- Ermine, Jean-louis. 2003. “La Gestion Des Connaissances.” *Hermes Sciences Publications*, 166. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00997696>.
- Ermine, Jean-louis, Mathias Chaillot, Philippe Bigeon, Boris Charreton, and Denis Malavieille. 1996. “MKSM Méthode Pour La Gestion Des Connaissances.” *Ingénierie Des Systèmes d’information* 4 (4): 541–75.
- Foucher, Clément, and Vincent Albert. 2018. “Ingénierie Dirigée Par Les Modèles : Du Modèle Au Circuit Logique En Utilisant La Génération Automatique de Code Avec La Plateforme Project DEVS.” In *Colloque 2018 Du GDR SOC2*. Paris, France. hal-02103309.
- Frigant, Vincent. 2018. “L’automobile Modulaire : Objectifs , Enjeux et Conséquences.”
- Frigant, Vincent, and Bernard Jullien. 2014. “Comment La Production Modulaire Transforme l’industrie Automobile.” *Revue d’Economie Industrielle* 145 (1): 11–44. <https://doi.org/10.4000/rei.5721>.
- Giret, Adriana, and Vicente Botti. 2009. “Engineering Holonic Manufacturing Systems.” *Computers in Industry* 60 (6): 428–40. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2009.02.007>.
- Goyal, Kapil Kumar, P. K. Jain, and Madhu Jain. 2013a. “A Comprehensive Approach to Operation Sequence Similarity Based Part Family Formation in the Reconfigurable Manufacturing System.” *International Journal of Production Research*. <https://doi.org/10.1080/00207543.2012.701771>.
- Goyal, Kapil Kumar, Pramod Kumar Jain, and Madhu Jain. 2013b. “A Novel Methodology to Measure the Responsiveness of RMTs in Reconfigurable Manufacturing System.” *Journal of Manufacturing Systems* 32 (4): 724–30. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2013.05.002>.

- Haddou Benderbal, Hichem. 2018. “Développement d ’ Une Nouvelle Famille d ’ Indicateurs de Performance Pour La Conception d ’ Un Système Manufacturier Reconfigurable ( RMS ) : Approches Évolutionnaires Multicritères Hichem Haddou Benderbal To Cite This Version : HAL Id : Tel-01886887 Sou.”
- Hasan, Faisal, P. K. Jain, and Dinesh Kumar. 2013. “Machine Reconfigurability Models Using Multi-Attribute Utility Theory and Power Function Approximation.” In *Procedia Engineering*, 64:1354–63. Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.09.217>.
- Hatchuel, Armand, Pascal Le Masson, and Benoît Weil. 2002. “De La Gestion Des Connaissances à l’économie Des Connaissances.” *Revue Internationale Des Sciences Sociales* 1 (171): 29–42.
- Hibino, Hironori, Yoshiyuki Yura, Yoshiro Fukeda, and Keiji Mitsuyuki. 2002. “Manufacturing Adapter of Distributed Simulation Systems Using HLA.” In , 1220–28.
- Holvoet, Tom, and Paul Valckenaers. 2006. “Beliefs, Desires and Intentions through the Environment.” *Proceedings of the International Conference on Autonomous Agents 2006*: 1052–54. <https://doi.org/10.1145/1160633.1160820>.
- Huang, Sihan, Guoxin Wang, and Yan Yan. 2018. “Delayed Reconfigurable Manufacturing System.” *International Journal of Production Research*, 1–19. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1518605>.
- IEEE 1516. 2000. “IEEE Standard for Modeling and Simulation (M&S) High Level Architecture (HLA).”
- Jimenez Gordillo, Jose Fernando. 2017. “Dynamic and Hybrid Architecture for the Optimal Reconfiguration of Control Systems . Application to Manufacturing Control.” Pontificia Universidad Javeriana Calle, University of Valenciennes and Hainaut-Cambrésis (UVHC).
- Jimenez, Jose Fernando, Abdelghani Bekrar, Damien Trentesaux, Gabriel Zambrano Rey, and Paulo Leitão. 2015. “Governance Mechanism in Control Architectures for Flexible Manufacturing Systems.” *IFAC-PapersOnLine* 28 (3): 1093–98. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.229>.
- Kanso, Marwa. 2010. “Contribution à La Construction Des Configurations Des Systèmes Manufacturiers : Une Approche Basée Sur La Décision Multi-Critère.” Université Bretagne Sud.
- Kanso, Marwa, and Pascal Berruet. 2010. “RMS : Une Évolution Des Systèmes Manufacturiers RMS : Une Évolution Des Systèmes Manufacturiers” 33 (0).
- Kanso, Marwa, Pascal Berruet, and Jean Luc Philippe. 2010. “A Framework Based on a High Conception Level to Generate Configurations in Production Systems.” *ICINCO 2010 - Proceedings of the 7th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics* 1: 244–48. <https://doi.org/10.5220/0002943102440248>.

- Ketfi, Abdelmadjid. 2005. “Une Approche Générique Pour La Reconfiguration Dynamique Des Applications à Base de Composants Logiciels.” Université Joseph Fourier.
- Koestler, Arthur. 1968. *The Ghost in the Machine. The Ghost in the Machine*. Oxford, England: Macmillan.
- Koren, Yoram, Ann Arbor, and Galip A. Ulsoy. 2002. “Reconfigurable Manufacturing System Having a Production Capacity Method for Designing Same and Method for Changing Its Production Capacity” 1 (12).
- Koren, Yoram, U Heisel, F Jovane, T Moriwaki, G Pritschow, G Ulsoy, and H Van Brussel. 1999. “Reconfigurable Manufacturing Systems: Introduction.” *CIRP Annals* 48 (2). [https://doi.org/doi:10.1016/S0007-8506\(07\)63232-6](https://doi.org/doi:10.1016/S0007-8506(07)63232-6).
- Koren, Yoram, S Jack Hu, and Thomas W Weber. 1998. “Impact of Manufacturing System Configuration on Performance” 47 (1): 369–72.
- Koren, Yoram, and Moshe Shpitalni. 2010. “Design of Reconfigurable Manufacturing Systems.” *Journal of Manufacturing Systems* 29 (4): 130–41. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2011.01.001>.
- Kravchenko, Mariia, Daniela CA Pigosso, and Tim C. McAloone. 2019. “Towards the Ex-Ante Sustainability Screening of Circular Economy Initiatives in Manufacturing Companies: Consolidation of Leading Sustainability-Related Performance Indicators.” *Journal of Cleaner Production* 241: 118318. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118318>.
- Kruger, Karel. 2018. “Development and Evaluation of an Erlang Control System for Reconfigurable Manufacturing Systems.” Stellenbosch University.
- Kruger, Karel, and Anton Basson. 2017. “Erlang-Based Control Implementation for a Holonic Manufacturing Cell.” *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* 30 (6): 641–52. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2016.1195923>.
- Lafou, Meriem, Luc Mathieu, Stéphane Pois, and Marc Alochet. 2014. “Convertibility Indicator for Manual Mixed-Model Assembly Lines.” *Procedia CIRP* 17: 314–19. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.03.113>.
- Lameche, Khaled. 2018. “Proposition d’une Méthodologie Pour La Conception Des Systèmes de Production Reconfigurable et d’un Outil Associé d’aide à La Décision Par Simulation de Flux.” Université Bretagne Loire, Université de Nantes.
- Lameche, Khaled, Najib M. Najid, Pierre Castagna, and Khalid Kouiss. 2017. “Modularity in the Design of Reconfigurable Manufacturing Systems.” *IFAC-PapersOnLine* 50 (1): 3511–16. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.939>.
- Lamotte, Florent Frizon De, Pascal Berruet, and Jean Luc Philippe. 2007. “Using Model Engineering for the Criticality Analysis of Reconfigurable Manufacturing Systems

- Architectures.” *International Journal of Manufacturing Technology and Management* 11 (3–4): 315–37. <https://doi.org/10.1504/IJMTM.2007.013322>.
- Lateef-Ur-rehman, Ateekh. 2013. “Manufacturing Configuration Selection Using Multicriteria Decision Tool.” *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 65 (5–8): 625–39. <https://doi.org/10.1007/s00170-012-4201-5>.
- Leitão, Paulo. 2004. “An Agile and Adaptive Holonic Architecture for Manufacturing Control.” University of Porto.
- Leitao, Paulo, and Francisco Restivo. 2003. “Identification of ADACOR Holons for Manufacturing Control.” *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)* 36 (3): 95–100. [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)37743-1](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)37743-1).
- Leitão, Paulo, and Francisco Restivo. 2006. “ADACOR: A Holonic Architecture for Agile and Adaptive Manufacturing Control.” *Computers in Industry* 57 (2): 121–30. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2005.05.005>.
- Leo Kumar, S. P. 2019. “Knowledge-Based Expert System in Manufacturing Planning: State-of-the-Art Review.” *International Journal of Production Research* 57 (15–16): 4766–90. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1424372>.
- Mabkhot, Mohammed M., Ali M. Al-Samhan, and Saber Darmoul. 2016. “An Information Model to Support Reconfiguration of Manufacturing Systems.” In *IFAC-PapersOnLine*, 49:37–42. Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.07.086>.
- Maganha, Isabela, Cristovao Silva, and Luis Miguel D.F. Ferreira. 2018. “Understanding Reconfigurability of Manufacturing Systems: An Empirical Analysis.” *Journal of Manufacturing Systems* 48 (May): 120–30. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2018.07.004>.
- Maier-Sperdelozzi, Valerie, and S. Jack Hu. 2002. “Selecting Manufacturing System Configurations Based on Performance Using AHP.” *Technical Paper Society of Manufacturing Engineers MS*, no. MS02-179: 1–8. <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-0036300907&partnerID=40&md5=9c626532220edfae6e8665340a066dcd>.
- Maraghy, Hoda El. 2006. “Flexible and Reconfigurable Manufacturing Systems Paradigms.” *International Journal of Flexible Manufacturing Systems* 17 (4 SPECIAL ISSUE): 261–76. <https://doi.org/10.1007/s10696-006-9028-7>.
- Mehrabi, M. G., A. G. Ulsoy, and Y. Koren. 2000. “Reconfiguration Manufacturing Systems: Key to Future Manufacturing.” *Journal of Intelligent Manufacturing* 11: 403–19.
- Michalos, George, Platon Sipsas, Sotiris Makris, and George Chryssolouris. 2016. “Decision Making Logic for Flexible Assembly Lines Reconfiguration.” *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 37: 233–50. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2015.04.006>.

- Monticolo, Davy, Julien Badin, Samuel Gomes, Eric Bonjour, and Dominique Chamoret. 2015. "A Meta-Model for Knowledge Configuration Management to Support Collaborative Engineering." *Computers in Industry* 66: 11–20. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2014.08.001>.
- Moulahi, Bilel. 2015. "Définition et Évaluation de Modèles d'agrégation Pour l'estimation de La Pertinence Multidimensionnelle En Recherche d'information." <http://thesesups.univ-tlse.fr/2977/%0Ainternal-pdf://0.0.0.70/2977.html>.
- Muller, Pierre-Alain, and Nathalie Gaertner. 2000. *Modélisation Objet Avec UML*. Eyrolles. Vol. 514. Paris.
- Napoleone, Alessia, Alessandro Pozzetti, and Marco Macchi. 2018. "A Framework to Manage Reconfigurability in Manufacturing." *International Journal of Production Research*. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1437286>.
- Nguyen, Dang Trinh, Quoc Bao Duong, Eric Zamai, and Muhammad Kashif Shahzad. 2016. "Fault Diagnosis for the Complex Manufacturing System." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability* 230 (2): 178–94. <https://doi.org/10.1177/1748006X15623089>.
- Padayachee, J., and G. Bright. 2012. "Modular Machine Tools: Design and Barriers to Industrial Implementation." *Journal of Manufacturing Systems* 31 (2): 92–102. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2011.10.003>.
- Pedrielli, Giulia, Paola Scavardone, Tullio Tolio, Marco Sacco, and Walter Terkaj. 2011. "Simulation of Complex Manufacturing Systems via HLA-Based Infrastructure." In *Proceedings - Workshop on Principles of Advanced and Distributed Simulation, PADS*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/PADS.2011.5936772>.
- Petroodi, S. Ehsan Hashemi, Amélie Beauville Dit Eynaud, Nathalie Klement, and Reza Tavakkoli-Moghaddam. 2019. "Simulation-Based Optimization Approach with Scenario-Based Product Sequence in a Reconfigurable Manufacturing System (RMS): A Case Study." *IFAC-PapersOnLine* 52 (13): 2638–43. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.11.605>.
- Pichard, Romain, Michel Combacau, Philippot Alexandre, Ramla Saddem, and Bernard Riera. 2017. "SEDMA-Un Outil Pour La Modélisation , l'Analyse et La Génération Automatique de Programme Pour Les SEDs." In *11e Colloque Sur La Modélisation Des Systèmes Réactifs*. Marseille, France. hal-01882579.
- Qasim, Lara, Andreas Makoto Hein, Marija Jankovic, Sorin Olaru, and Jean Luc Garnier. 2019. "Towards a Reconfiguration Framework for Systems Engineering Integrating Use Phase Data." *Proceedings of the International Conference on Engineering Design, ICED 2019-Augus (August)*: 2617–26. <https://doi.org/10.1017/dsi.2019.268>.
- Redelinghuys, AJH, AH Basson, and K Kruger. 2019. "A Six-Layer Digital Twin Architecture for a Manufacturing Cell." In *Service Orientation in Holonic and Multi-Agent Manufacturing*,

1:273–84. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-03003-2>.

- Rösiö, Carin, Tehseen Aslam, Karthik Banavara Srikanth, and Savin Shetty. 2019. “Towards an Assessment Criterion of Reconfigurable Manufacturing Systems within the Automotive Industry.” *Procedia Manufacturing* 28: 76–82. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.12.013>.
- Sallez, Yves, Thierry Berger, and Thérèse Bonte. 2020. “The Concept of ‘Safety Bubble’ for Reconfigurable Assembly Systems.” *Manufacturing Letters* 24: 77–81. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2020.03.015>.
- Saxena, Lokesh Kumar, and Promod Kumar Jain. 2012. “A Model and Optimisation Approach for Reconfigurable Manufacturing System Configuration Design.” *International Journal of Production Research*. <https://doi.org/10.1080/00207543.2011.578161>.
- Sethi, Andrea Krasa, and Suresh Pal Sethi. 1990. “Flexibility in Manufacturing: A Survey.” *International Journal of Flexible Manufacturing Systems* 2 (4): 289–328. <https://doi.org/10.1007/BF00186471>.
- Simon, Herbert A. 1962. “The Architecture of Complexity.” *Proceedings Of the American Philosophical Society* 106 (6): 467–82. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-27922-5\\_23](https://doi.org/10.1007/978-3-642-27922-5_23).
- Singh, Ashutosh, and D Jha. 2018. “Development and Future Trends in Reconfigurable Manufacturing System.” *International Journal of Engineering & Scientific Research* 6: 47–56.
- Son, Sung-Yong, Tava Lennon Olsen, and Derek Yip-Hoi. 2001. “An Approach to Scalability and Line Balancing for Reconfigurable Manufacturing Systems.” *Integrated Manufacturing Systems* 12 (7): 500–511. <https://doi.org/10.1108/09576060110407815>.
- Spicer, P., Y. Koren, M. Shpitalni, and D. Yip-Hoi. 2002. “Design Principles for Machining System Configurations.” *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 51 (1): 275–80. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)61516-9](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)61516-9).
- Tan, C.F, L. S. Wahidin, S. N. Khalil, N. Tamaldin, J. Hu, and G. W.M. Rauterberg. 2016. “The Application of Expert System: A Review of Research and Applications.” *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences* 11 (4): 2448–53.
- Tang, Li, Yoram Koren, Derek M. Yip-Hoi, and Wencai Wang. 2016. “Computer-Aided Reconfiguration Planning: An Artificial Intelligence-Based Approach.” *Journal of Computing and Information Science in Engineering* 3 (6). <https://doi.org/10.1115/1.2218369>.
- Toguyeni, A.K.A., E. Craye, and J.C. Gentina. 1993. “An Approach for the Placement of Sensors for On-Line Diagnostic Purposes.” *IFAC Proceedings Volumes* 26 (2): 5–10. [https://doi.org/10.1016/s1474-6670\(17\)48211-5](https://doi.org/10.1016/s1474-6670(17)48211-5).
- Tolio, T., D. Ceglarek, H. A. Elmaraghy, A. Fischer, S. J. Hu, L. Laperrière, S. T. Newman, and J. Váncza. 2010. “SPECIES-Co-Evolution of Products, Processes and Production Systems.”

*CIRP Annals - Manufacturing Technology* 59 (2): 672–93.  
<https://doi.org/10.1016/j.cirp.2010.05.008>.

Tolio, Tullio. 2009. *Design of Flexible Production Systems*. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-85414-2>.

Trentesaux, Damien. 2002. “Pilotage Hétérarchique Des Systèmes de Production.” Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis.

Tzeng, Gwo Hshiong, and Jih Jeng Huang. 2011. *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications*. *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications*.

Valckenaers, Paul. 2019. “ARTI Reference Architecture -- PROSA Revisited.” In *Service Orientation in Holonic and Multi-Agent Manufacturing*, edited by Theodor Borangiu, Damien Trentesaux, André Thomas, and Sergio Cavalieri, 1–19. Cham: Springer International Publishing.

Wang, Fang, Zeng Guang Hou, De Xu, and Min Tan. 2005. “An Agent-Based Holonic Architecture for Reconfigurable Manufacturing Systems.” *Lecture Notes in Computer Science* 3612 (PART III): 622–27.

Wang, Guo Xin, Si Han Huang, Yan Yan, and Jing Jun Du. 2017. “Reconfiguration Schemes Evaluation Based on Preference Ranking of Key Characteristics of Reconfigurable Manufacturing Systems.” *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 89 (5–8): 2231–49. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9243-7>.

Wang, Wencai, and Yoram Koren. 2012. “Scalability Planning for Reconfigurable Manufacturing Systems.” *Journal of Manufacturing Systems* 31 (2): 83–91. <https://doi.org/10.1016/J.JMSY.2011.11.001>.

Wang, Wencai, and Yoram Koren. 2013. *Design Principles of Scalable Reconfigurable Manufacturing Systems*. *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)*. Vol. 46. IFAC. <https://doi.org/10.3182/20130619-3-RU-3018.00185>.

Wiendahl, H. P., H. A. ElMaraghy, P. Nyhuis, M. F. Zäh, H. H. Wiendahl, N. Duffie, and M. Brieke. 2007. “Changeable Manufacturing - Classification, Design and Operation.” *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 56 (2): 783–809. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2007.10.003>.

Youssef, Ayman M. A., and Hoda A. ElMaraghy. 2007. “Optimal Configuration Selection for Reconfigurable Manufacturing Systems.” *International Journal of Flexible Manufacturing Systems* 19 (2): 67–106. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s10696-007-9020-x>.

---

**Titre :** Contribution à la reconfiguration des lignes de production : définition et démarche de choix de configurations alternatives.

**Mots clés :** configuration, modularité, modèle de données, capitalisation de données, RMS

**Résumé :** Dans cette thèse nous proposons un formalisme de définition des configurations des RMS basé sur la modularité du système, incluant à la fois les aspects physique et logique (jusqu'ici considérés séparément dans la littérature), et les aspects performance (KPI) et modèle (simulation de flux) répondant aux exigences de l'industrie 4.0 (l'architecture RAMI 4.0). La vision modulaire permet une description et une analyse précise et conduit à une meilleure connaissance du système pour conduire une reconfiguration. Un modèle de données de référence émerge de cette vision modulaire et est utilisé pour générer la base de données de configurations, socle de la démarche de choix de nouvelles configurations proposées. Cette démarche vise la capitalisation des données de configurations passées, présentes et potentiellement futures du système, afin de répondre aux besoins de proactivité, réutilisation de données et plus généralement de gestion des connaissances dans un processus de reconfiguration. Une métrique permettant d'évaluer l'incidence de la reconfiguration est proposée afin d'assurer un choix de configuration judicieux. Un exemple illustratif et deux cas d'étude industriels ont été conduits. Ils permettent de valider la pertinence de l'approche proposée et aussi de montrer que l'approche est valable tant pour des systèmes matures que pour des systèmes encore en conception. L'approche ouvre de nouvelles perspectives pour des RMS holoniquement contrôlés. Cependant, la notion d'agrégation (données, logiques de contrôle, modèles) ainsi que le manque d'automatisation de la démarche de choix constituent des limites à la proposition mais représentent aussi des axes de réflexions pour de futurs travaux.

---

**Title:** Contributing to the reconfiguration of production lines: definition and selection process of alternative configurations.

**Keywords:** configuration, modularity, reference data model, data capitalization, RMS

**Abstract:** In this thesis we propose a formalism for defining RMS configurations, based on the modularity of the system, including both physical and logical aspects (so far considered separately in the literature), and performance (KPI) and model (flow simulation) aspects to align the proposal with the requirements of Industry 4.0 (the RAMI 4.0 architecture). The modular vision allows a precise description and analysis and leads to a better knowledge of the system to drive a reconfiguration. A reference data model emerges from this modular vision, and is used to generate the configuration database, which is the foundation of the proposed selection process for new configurations. This approach aims at capitalizing on past, present and potentially future configuration data of the system, in order to meet the needs of proactivity, data reuse and more generally of knowledge management in a reconfiguration process. A metric to evaluate the impact of a reconfiguration is proposed, in order to ensure a relevant configuration choice. An illustrative example and two industrial case studies have been conducted. They allow to validate the relevance of the proposed approach, and have also allowed to show that the approach is valid under design. The approach offers new perspectives for RMS controlled with holons. Nevertheless, the notion of aggregation (data, control logics, models) as well as the lack of automation of the selection process are some drawbacks of the proposal, but also represent promising topics for future works.