



**HAL**  
open science

# Démarche de conception d'un système de production industriel reconfigurable, dans un contexte de fortes variations de marché en volume et en diversité

Amélie Beauville Dit Eynaud

► **To cite this version:**

Amélie Beauville Dit Eynaud. Démarche de conception d'un système de production industriel reconfigurable, dans un contexte de fortes variations de marché en volume et en diversité. Génie mécanique [physics.class-ph]. HESAM Université, 2020. Français. NNT : 2020HESAE024 . tel-03019105

**HAL Id: tel-03019105**

**<https://theses.hal.science/tel-03019105>**

Submitted on 23 Nov 2020

**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.

**ÉCOLE DOCTORALE SCIENCES ET MÉTIERS DE L'INGÉNIEUR**  
**LISPEN - Campus de Lille**

**THÈSE**

*présentée par :* **Amélie BEAUVILLE DIT EYNAUD**

*soutenue le :* **24 juin 2020**

*pour obtenir le grade de :* **Docteur d'HESAM Université**

*préparée à :* **École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers**

*Discipline :* **Section CNU 61**

*Spécialité :* **Génie industriel**

**Démarche de conception d'un système de production industriel reconfigurable, dans un contexte de fortes variations de marché en volume et en diversité**

**THÈSE dirigée par :**  
**Olivier GIBARU et Lionel ROUCOULES**

**et co-encadrée par :**  
**Nathalie KLEMENT**

**Jury**

**Mme Elise VAREILLES**

**Mme Sylvie NORRE**

**Mme Catherine DA CUNHA**

**M. Olivier GIBARU**

**M. Lionel ROUCOULES**

**Mme Nathalie KLEMENT**

**M. Laurent DURVILLE**

Professeur, DISC, Isae-Supaero

Professeur, LIMOS, Université Clermont Auvergne

Professeur, LS2N, Centrale Nantes

Professeur, LISPEN, Arts et Métiers

Professeur, LISPEN, Arts et Métiers

MdC, LISPEN, Arts et Métiers

Ingénieur, Groupe PSA

Présidente

Rapportrice

Rapportrice

Examinateur

Examinateur

Examinatrice

Invité

**T  
H  
È  
S  
E**



# Remerciements

En premier lieu, je souhaite remercier Catherine Da Cunha et Sylvie Norre pour avoir accepté de rapporter ce travail de thèse. Je vous remercie pour la relecture de ce manuscrit, et vos remarques très précises et constructives, notamment sur les indicateurs de reconfigurabilité. Je remercie Élise Vareilles pour avoir accepté de présider ce jury de thèse.

Cette thèse n'aurait pas eu lieu sans la présence des quatre personnes qui m'ont suivie pendant ces trois années. Mes remerciements s'adressent à Olivier Gibaru, pour les éclairages que tu as pu m'apporter et ta relecture du manuscrit. Je remercie chaleureusement Lionel Roucoules, qui a co-dirigé cette thèse depuis le campus d'Aix-en-Provence. Cette distance géographique ne s'est pas ressentie car j'ai pu compter sur ta présence à mes côtés tout au long de la thèse. Merci pour ton temps, le recul que tu m'as permis de prendre et pour ta générosité. J'adresse un grand merci à Nathalie Klement, c'est toi qui m'a fait confiance et proposé ce sujet de thèse, alors que j'hésitais encore sur mon avenir professionnel. Je tiens à te remercier également pour ton écoute lors de nos points réguliers et la relecture méticuleuse de mes articles et de ce manuscrit. Enfin, je remercie Laurent Durville, qui m'a accueillie au sein du Groupe PSA dans le cadre de cette thèse CIFRE. Tu as permis un ancrage industriel des travaux de thèse, et tu m'as fait découvrir la vision de l'Usine du Futur de l'entreprise.

Au sein du Groupe PSA, je tiens à saluer mes collègues du plateau Factory Booster, pour l'ouverture industrielle que vous m'avez apportée, et aussi pour la bonne humeur et les moments de rigolade qui m'ont marquée pendant ces deux années passées à vos côtés.

J'ai une pensée également pour tous les doctorants du Groupe PSA dont j'ai croisé la route, et avec qui j'ai pu sympathiser au cours d'une journée poster ou d'un « Doc' After-work » : Anthony, Elise, Youna, Marie-Ange, Florence, Hasnaa, Gianluigi, Nolwenn, David, Julien, Thomas, Abdivall... Je vous souhaite le meilleur pour la suite.

Je remercie les doctorants et post-docs du campus des Arts et Métiers de Lille pour leur accueil au sein de leur joyeuse bande : Arthur, Eddy, Sebastian, Mathieu, Laurent, Vincent, François, Mouad, Michel, Zein, Martin, Jérôme, Pierre, Gabriel, Tiago... Je vous remercie pour les moments de partage, d'ouverture scientifique et culturelle, les soirées jeux passées avec vous. Bien sûr je n'oublie pas les ingénieurs du LISPEN : Adrien, Estelle, Anthony...

La musique a été pour moi une bouffée d'oxygène pendant ces trois années. Je remercie les orchestres qui m'ont accueillie au cours de cette thèse : l'orchestre Alborada de Versailles, l'orchestre Accords Majeurs de Chaville et l'Orchestre Universitaire de Lille. Merci pour tous ces bons moments partagés, qui m'ont permis d'être quelques instants plus violoniste que thésarde.

Je remercie mes amis proches qui m'ont soutenue dans ce parcours. Je suis heureuse d'avoir pu trouver auprès de certains une oreille attentive, vous avez été là dans mes moments de fatigue, de doutes, et c'est avec joie que je partage avec vous ma réussite.

Enfin, je remercie du fond du cœur ma mère pour son soutien sans faille depuis mes débuts sur les bancs de l'école.



# Table des matières

Liste des figures	xi
Liste des tableaux	xiii
Acronymes	xv
<b>1 Introduction</b>	<b>1</b>
1.1 Contexte . . . . .	2
1.2 Cadre industriel . . . . .	3
1.2.1 La diversité de production dans l'industrie . . . . .	3
1.2.2 Industrie automobile . . . . .	4
1.2.3 Cas d'étude : Assemblage moteur . . . . .	6
1.2.4 Besoin industriel : Aide à la décision . . . . .	8
1.3 Contexte scientifique . . . . .	9
1.4 Problématique . . . . .	9
1.5 Objet de la thèse . . . . .	9
1.6 Périmètre de l'étude . . . . .	12
1.7 Hypothèses . . . . .	13
1.8 Plan du mémoire . . . . .	13
<b>2 Évaluation de la reconfigurabilité</b>	<b>17</b>
2.1 Paradigme de la transformabilité . . . . .	19
2.1.1 Définitions . . . . .	19
2.1.2 Organisation des ateliers et flux . . . . .	23
2.1.3 Les familles de systèmes de production . . . . .	24
2.1.4 Systèmes reconfigurables . . . . .	24
2.1.5 Classification des RMS . . . . .	27
2.1.6 État de l'art des briques technologiques . . . . .	31
2.1.7 Concepts retenus . . . . .	32
2.2 État de l'art des indicateurs de reconfigurabilité . . . . .	32
2.2.1 Indicateurs qualitatifs . . . . .	33
2.2.2 Indicateurs quantitatifs . . . . .	34
2.2.3 Bilan de l'état de l'art . . . . .	37
2.3 Indicateurs de reconfigurabilité . . . . .	38
2.3.1 Scalabilité . . . . .	39

2.3.2	Convertibilité . . . . .	40
2.3.3	Modularité . . . . .	41
2.3.4	Intégrabilité . . . . .	41
2.3.5	Customisation . . . . .	42
2.3.6	Capacité de diagnostic . . . . .	42
2.3.7	Pondération et agrégation des indicateurs . . . . .	43
2.4	Conclusion . . . . .	44
<b>3</b>	<b>Méthodologie de conception du RMS</b>	<b>47</b>
3.1	État de l'art des démarches de conception des systèmes reconfigurables . . . . .	48
3.1.1	Démarches globales . . . . .	48
3.1.2	Stratégies de reconfiguration . . . . .	51
3.1.3	Limites et positionnement de la thèse . . . . .	53
3.2	Démarche proposée . . . . .	53
3.2.1	Identifier le besoin en reconfigurabilité . . . . .	54
3.2.2	Modéliser le système . . . . .	56
3.2.3	Détermination de la configuration . . . . .	56
3.2.4	Reconfigurer le système . . . . .	57
3.3	Conclusion . . . . .	58
<b>4</b>	<b>Outil d'aide à la décision</b>	<b>61</b>
4.1	Méthode outillée . . . . .	63
4.1.1	Définition du besoin et analyse fonctionnelle . . . . .	63
4.1.2	Diagrammes de flux de données . . . . .	63
4.2	Critères de décision . . . . .	66
4.2.1	Performance . . . . .	66
4.2.2	Indicateurs de reconfigurabilité . . . . .	67
4.2.3	Investissements . . . . .	67
4.2.4	Maturité technologique . . . . .	67
4.2.5	Synthèse des indicateurs retenus . . . . .	68
4.3	Simulation et optimisation . . . . .	69
4.3.1	État de l'art des méthodes d'optimisation et de simulation . . . . .	69
4.3.2	Structure de couplage mis en place . . . . .	79
4.4	Problème de décision dans l'incertain . . . . .	82
4.4.1	La conception du système reconfigurable, un problème complexe . . . . .	82
4.4.2	Théorie d'analyse des risques . . . . .	82
4.4.3	Modélisation du problème de décision . . . . .	83
4.4.4	Résolution . . . . .	84
4.4.5	Raccord à l'outil d'aide à la décision . . . . .	85
4.5	Conclusion . . . . .	85
<b>5</b>	<b>Application à un cas d'usage industriel</b>	<b>87</b>
5.1	Cas d'usage : Assemblage moteur . . . . .	90
5.1.1	Ligne pilote multi-produits . . . . .	90

5.1.2	Scénarios . . . . .	92
5.2	Identifier le besoin en reconfigurabilité . . . . .	93
5.2.1	Besoin en reconfigurabilité . . . . .	93
5.2.2	Leviers de reconfigurabilité . . . . .	94
5.2.3	Comparaison des critères de reconfigurabilité . . . . .	95
5.2.4	Modèle du système de production . . . . .	96
5.2.5	Briques technologiques implémentées . . . . .	97
5.3	Scénario de ramp-up - Première phase . . . . .	101
5.3.1	Scénario . . . . .	101
5.3.2	Application de la démarche . . . . .	102
5.3.3	Résultats . . . . .	104
5.3.4	Conclusion du scénario . . . . .	108
5.4	Scénario de ramp-up - Seconde phase . . . . .	109
5.4.1	Scénario . . . . .	109
5.4.2	Application de la démarche . . . . .	109
5.4.3	Résultats . . . . .	110
5.4.4	Conclusion du scénario . . . . .	112
5.5	Scénario de variation de ratio de mixte produit . . . . .	114
5.5.1	Scénario . . . . .	114
5.5.2	Résolution avec robots déplaçables . . . . .	114
5.5.3	Résolution avec robots mobiles . . . . .	118
5.5.4	Résultats . . . . .	119
5.5.5	Conclusion du scénario . . . . .	124
5.6	Scénario de variation de volume et ratio de mixte produit . . . . .	125
5.6.1	Scénario . . . . .	125
5.6.2	Résultats . . . . .	126
5.6.3	Conclusion du scénario . . . . .	129
5.7	Application de la théorie d'analyse des risques . . . . .	129
5.7.1	Scénarios . . . . .	129
5.7.2	Modèle . . . . .	130
5.7.3	Résultats . . . . .	131
5.7.4	Conclusion de l'analyse de risques . . . . .	133
5.8	Conclusion . . . . .	135
<b>6</b>	<b>Conclusion et perspectives</b>	<b>137</b>
6.1	Conclusion du travail de recherche . . . . .	138
6.2	Perspectives . . . . .	139
	<b>Glossaire</b>	<b>141</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>143</b>
	<b>Annexes</b>	<b>152</b>
	<b>A Questionnaire</b>	<b>153</b>

A.1	Questionnaire . . . . .	153
<b>B</b>	<b>Modèles Simul8</b>	<b>161</b>
B.1	Modèle EB . . . . .	161
B.2	Modèle du mixte produit EB-DVR . . . . .	161
<b>C</b>	<b>Théorie d'analyse des risques</b>	<b>165</b>
C.1	Flux de données . . . . .	165
C.2	Fonction d'utilité multi-attributs . . . . .	167

# Liste des figures

1.1	Démarche Usine du Futur (source : document interne du Groupe PSA) . . . . .	4
1.2	Situation actuelle du système de production PSA (source : document interne du Groupe PSA) . . . . .	5
1.3	Variabilité moteurs . . . . .	6
1.4	Implantation assemblage moteur : usine de Trémery (source : Groupe PSA) . . .	7
1.5	Capacité en volume par variante et reconfigurabilité des systèmes . . . . .	11
1.6	Contexte et objectif . . . . .	12
1.7	Plan du mémoire . . . . .	14
2.1	Objectifs du Chapitre 2 . . . . .	18
2.2	Caractéristiques de la reconfigurabilité issues de l'analyse de [Kor et al.10] . . . .	20
2.3	Cycle de vie du système d'assemblage et flexibilités associées [Pas93] . . . . .	20
2.4	Reconfigurabilité et Flexibilité [Nyh et al.10] . . . . .	21
2.5	Diagramme volume/variété [Bea et al.18] . . . . .	22
2.6	Reconfigurabilité et flexibilité en fonction de la certitude de l'environnement économique (adapté de [Rei00]) . . . . .	23
2.7	Configurations pour le système d'assemblage [Hu et al.11] . . . . .	25
2.8	Implantation de lignes parallèles en série (a) et ligne reconfigurable (b) [Kor et al.17] . . . . .	25
2.9	Configurations pour le système reconfigurable modulaire [AIG et al.15] . . . . .	26
2.10	Classification des RMS selon les niveaux de décision [Wie et al.07] . . . . .	27
2.11	Cadre d'évaluation pour le paradigme de flexibilité [Wie et al.04] . . . . .	28
2.12	Classes de changeabilité . . . . .	28
2.13	Catégorisation des outils clés de la reconfigurabilité. Adapté de [Haw et al.16] . .	31
2.14	Graphe capacité/Fonctionnalité des RMS selon l'étape de reconfiguration (adapté de [Kor et al.99]) . . . . .	33
2.15	Mesure de la capacité d'ajustement du système [Wey et al.11] . . . . .	35
2.16	Analyse AHP : Comparaison des critères . . . . .	43
2.17	Bilan du Chapitre 2 . . . . .	45
3.1	Chapitre 3 : Démarche de conception du RMS . . . . .	48
3.2	Processus de conception du système de production. Adapté de [Ben et al.14] . . .	49
3.3	Processus de conception du système reconfigurable. Adapté de [And et al.17b] . .	51

3.4	Diagramme SADT de la démarche de conception . . . . .	54
3.5	Reconfiguration selon le changement de contexte économique . . . . .	58
3.6	Conclusion du Chapitre 3 . . . . .	60
4.1	Chapitre 4 : Outil d'aide à la décision . . . . .	62
4.2	Diagramme de flux de données - Niveau 0 . . . . .	64
4.3	Diagramme de flux de données - Niveau 1 . . . . .	64
4.4	Diagramme de flux de données - Niveau 2 . . . . .	65
4.5	Chronologie d'utilisation de l'outil . . . . .	65
4.6	Comparaison d'approches d'optimisation selon leur performance selon différentes dimensions (adapté de [Chi et al.17]) . . . . .	75
4.7	Structures de couplage simulation-optimisation d'après [Fig et al.14] . . . . .	75
4.8	Arbre de scénarios avec 5 scénarios et 3 périodes temporelles [Col et al.18] . . . . .	77
4.9	Structure du couplage OptQuest - Simul8 . . . . .	80
4.10	Structure du recuit simulé [Has et al.19] . . . . .	81
4.11	Structure du couplage : Module d'optimisation externe - Simul8 . . . . .	81
4.12	Structure du processus de décision [Las et al.16] . . . . .	83
4.13	Nœuds d'un diagramme d'influences . . . . .	83
4.14	Arbre de décision : Exemple de stratégie de déploiement d'une marque . . . . .	84
5.1	Tâches d'assemblage du poste 2 . . . . .	90
5.2	Scénario de demande des moteurs EB et DVR . . . . .	93
5.3	Pondération des caractéristiques de la reconfigurabilité selon le domaine [Bea et al.19] . . . . .	95
5.4	Diagramme UML de classes du système fixe [Bea et al.18] . . . . .	98
5.5	Diagramme UML de classes du système reconfigurable [Bea et al.18] . . . . .	99
5.6	Robots collaboratifs sur plateforme mobile (à gauche)(source : projet ScalABLE 4.0) . . . . .	101
5.7	Convoyeur modulaire [Soh et al.14] . . . . .	102
5.8	Flux des produits sur AGV (source : Groupe PSA) . . . . .	102
5.9	Scénario de demande [Bea et al.20a] . . . . .	103
5.10	Représentation schématique des 20 postes de la ligne a) au début du scénario b) en fin de ramp-up [Bea et al.20a] . . . . .	104
5.11	Caractéristiques de reconfigurabilité pour le système fixe et le RAS [Bea et al.20a] . . . . .	105
5.12	Taux de charge des ressources pour le système fixe et le RAS [Bea et al.20a] . . . . .	107
5.13	Comparaison des investissements entre système fixe et système avec robots déplaçables (RAS) [Bea et al.20a] . . . . .	108
5.14	Taux d'utilisation de la capacité en fonction de la reconfigurabilité du système - Comparaison de solutions techniques [Bea et al.20a] . . . . .	109
5.15	Scénario de demande . . . . .	110
5.16	Baisse de taux de charge tolérée avant reconfiguration . . . . .	111
5.17	Taux de charge des ressources pour le système fixe et le RAS . . . . .	112

5.18	Comparaison des investissements entre système fixe et système avec robots déplaçables . . . . .	113
5.19	Taux d'utilisation de la capacité en fonction de la reconfigurabilité du système - Comparaison de solutions techniques . . . . .	113
5.20	Scénario de demande (variation de ratio de mixte produit) . . . . .	114
5.21	Valeur de la fonction objectif (temps d'assemblage) . . . . .	116
5.22	Fonction objectif (modèle multi-objectif) . . . . .	117
5.23	Fonction objectif (allocation des ressources) . . . . .	118
5.24	Implantation en I, U et S des 20 postes d'assemblage . . . . .	119
5.25	Comparaison des caractéristiques de reconfigurabilité . . . . .	120
5.26	Taux de charge des ressources pour le système fixe . . . . .	121
5.27	Taux de charge des ressources pour le RAS - Implantation en I . . . . .	121
5.28	Taux de charge des ressources pour le RAS - Implantation en U . . . . .	122
5.29	Taux de charge des ressources pour le RAS - Implantation en S . . . . .	123
5.30	Comparaison des investissements entre système fixe, système avec robots déplaçables et système avec robots mobiles pour une implantation en I, U et S . . . . .	124
5.31	Taux d'utilisation de la capacité en fonction de la reconfigurabilité du système - Comparaison de solutions techniques . . . . .	125
5.32	Scénario de demande - Variation en mixte produit et volume . . . . .	125
5.33	Taux de charge des ressources pour le système fixe . . . . .	126
5.34	Taux de charge des ressources du RAS . . . . .	127
5.35	Comparaison des investissements entre système fixe et système avec robots mobiles	128
5.36	Taux d'utilisation de la capacité en fonction de la reconfigurabilité du système - Comparaison des solutions techniques . . . . .	128
5.37	Nœuds de chance et probabilités . . . . .	130
5.38	Diagramme d'influence du cas industriel . . . . .	131
5.39	Arbre de décision avec deux scénarios sous DPL9 . . . . .	132
5.40	Décision suggérée . . . . .	132
5.41	Résultat de l'analyse de sensibilité sur l'indicateur de maturité du robot mobile .	133
5.42	Résultat après modification de l'indice de maturité du robot mobile . . . . .	134
5.43	Chapitre 5 : Démarche de conception appliquée à un cas industriel . . . . .	136
B.1	Modèle Simul8 de la ligne mono-produit EB . . . . .	162
B.2	Modèle Simul8 de la ligne multi-produits EB-DVR . . . . .	163
C.1	Diagramme de flux de données avec analyse des risques . . . . .	166



# Liste des tableaux

1.1	Quelques laboratoires traitant des systèmes reconfigurables . . . . .	10
2.1	Synthèse des systèmes reconfigurables . . . . .	30
2.2	Critères d'évaluation des RMS qualitatifs (adapté de [Hue et al.16]) . . . . .	34
2.3	Critères d'évaluation des RMS quantitatifs (adapté de [Hue et al.16]) . . . . .	36
2.4	Comparaison des indicateurs de reconfigurabilité . . . . .	38
2.5	Granularité du poste de travail . . . . .	41
2.6	Granularité de reconfiguration . . . . .	41
3.1	Comparaison des démarches . . . . .	59
4.1	Niveaux de TRL [Sta13] . . . . .	68
4.2	Indicateurs retenus . . . . .	68
4.3	Approches par optimisation pour le réglage du RMS . . . . .	70
4.4	Approches de conception et réglage du RMS par SED . . . . .	73
4.5	Approches de conception et réglage du RMS par couplage simulation - optimisation . . . . .	78
5.1	Description de l'objet d'étude . . . . .	91
5.2	Leviers et limites au regard de la reconfigurabilité [Bea et al.19] . . . . .	94
5.3	Scénario de la demande . . . . .	114
5.4	Meilleur ordonnancement des produits . . . . .	116
5.5	Nombre de robots . . . . .	117
5.6	Allocation des ressources pour le jour 1 . . . . .	118
5.7	Synthèse des résultats en performance du scénario de variation de ratio de mixte produit . . . . .	123



# Acronymes

<b>AGV</b>	Automated Guided Vehicle
<b>AHP</b>	Analytic Hierarchy Process - Analyse par hiérarchie multicritère
<b>DFD</b>	Data Flow Diagram (diagramme d'échange de données)
<b>DVR</b>	Moteur Diesel
<b>EB</b>	Moteur Essence pour le segment B (catégorie des citadines polyvalentes)
<b>MTBF</b>	Mean Time Between Failure
<b>MTTR</b>	Mean Time To Repair
<b>NRL</b>	Needed Reconfiguration Level - Niveau de reconfiguration nécessaire
<b>POC</b>	Proof Of Concept - Démonstration de faisabilité
<b>RAS</b>	Reconfigurable Assembly System (RAS)
<b>RMS</b>	Reconfigurable Manufacturing System (RMS)
<b>ROI</b>	Return On Investment - Retour sur investissement
<b>SED</b>	Simulation à évènements discrets
<b>TRL</b>	Technology Readiness Level
<b>TRE</b>	Taux de Rendement Economique
<b>TRG</b>	Taux de Rendement Global
<b>TRS</b>	Taux de Rendement Synthétique
<b>UML</b>	Unified Modeling Language



# Chapitre 1

## Introduction

### Sommaire

---

<b>1.1</b>	<b>Contexte . . . . .</b>	<b>2</b>
<b>1.2</b>	<b>Cadre industriel . . . . .</b>	<b>3</b>
1.2.1	La diversité de production dans l'industrie . . . . .	3
1.2.2	Industrie automobile . . . . .	4
1.2.3	Cas d'étude : Assemblage moteur . . . . .	6
1.2.4	Besoin industriel : Aide à la décision . . . . .	8
<b>1.3</b>	<b>Contexte scientifique . . . . .</b>	<b>9</b>
<b>1.4</b>	<b>Problématique . . . . .</b>	<b>9</b>
<b>1.5</b>	<b>Objet de la thèse . . . . .</b>	<b>9</b>
<b>1.6</b>	<b>Périmètre de l'étude . . . . .</b>	<b>12</b>
<b>1.7</b>	<b>Hypothèses . . . . .</b>	<b>13</b>
<b>1.8</b>	<b>Plan du mémoire . . . . .</b>	<b>13</b>

---

Ce chapitre présente le contexte scientifique et industriel à l'origine de la thèse. Des domaines industriels variés sont touchés par de fortes variations difficilement prévisibles de la demande client. Ces fluctuations ont des conséquences sur l'utilisation et l'occupation des lignes de production. En parallèle, les problèmes scientifiques liés à l'adaptation des systèmes de production font l'objet de nombreuses recherches. Dans ce chapitre, nous positionnons dans ce contexte les travaux de thèse. La problématique à résoudre et les hypothèses sur lesquelles reposent le travail sont présentées.

## 1.1 Contexte

Après une première révolution industrielle rendue possible grâce à l'utilisation de la vapeur, une deuxième a eu lieu avec l'intégration dans les usines du concept du travail à la chaîne. C'est à partir de cette période, au début du XXème siècle, que le transport automatisé des produits à travers l'usine, de type convoyeur, a été mis en place, afin de distribuer des postes de travail fixes, cadencés sur une même unité de temps. L'arrivée des ordinateurs dans les usines a permis, au tournant des années 1980, d'accroître la capacité de production, et d'automatiser les procédés en intégrant une flexibilité limitée du système de production. Ces dernières années, l'intégration des techniques de l'information dans les usines marque un quatrième tournant dans l'histoire de l'industrie [Jov et al.03].

Cette évolution historique du système de production traduit également l'évolution de la demande sociétale : des premiers ateliers produisant des composants très spécifiques en petit volume, le système de production a évolué vers une production de masse à bas coût. Puis l'introduction de l'informatique a permis d'introduire une première flexibilité traduisant une demande de variété de produits croissante. Enfin, le besoin actuel est de pouvoir fournir des produits personnalisés. Une illustration de cette évolution est le choix de la peinture du modèle C3 de Citroën : 36 combinaisons de peinture sont offertes au client, sur un véhicule produit en masse et à prix concurrentiel.

Les systèmes de production actuels font face à un besoin en transformation en rupture avec les dernières décennies. Le cycle de vie des produits ne suit pas forcément les prévisions faites. Dans un objectif d'efficience de l'entreprise et dans un contexte complexe de supply chain globalisée, l'usine doit se montrer de plus en plus réactive. La flexibilité et réactivité des moyens de production est un défi majeur pour la prochaine décennie, qui consiste à pouvoir changer le point de fonctionnement optimal d'un système [Wie et al.07 ; Rei00 ; Möl08]. Les derniers progrès en technique de l'information permettent d'imaginer un système de production cyber-physique, connecté de manière à suivre toutes les données de production en temps réel, et capable de se transformer rapidement afin d'usiner ou assembler le modèle demandé par le client. En effet, la demande actuelle du marché est de pouvoir produire des produits personnalisés, choisis parmi un panel d'options. Pour l'industriel, l'objectif est de lancer la production d'une variante de produit seulement une fois le produit commandé, afin d'éviter des stocks coûteux. Le défi technologique sous-jacent est d'avoir à disposition une ligne de production permettant de fabriquer une grande diversité de produits. Cette solution est considérée par les industriels, qui voient une manière de réduire leurs coûts par rapport à une usine avec une ligne dédiée à chaque produit. Le ratio de la demande pour chaque produit est difficile à prévoir sur les périodes futures, d'où un besoin de capacité de transformation du système de production. Par ailleurs, il est très intéressant de pouvoir également intégrer de nouveaux produits qui n'existaient pas au moment de l'installation du système de production. Ce dernier point est un challenge, car il implique une série de défis techniques : avoir des systèmes de préhension, de vision, de transport, et d'usinage capables de s'adapter à n'importe quelle configuration, afin de s'adapter à un produit d'une nouvelle sorte.

L'imprévisibilité du marché ne se retrouve pas seulement dans les types de modèles de produits souhaités par le consommateur, mais également dans la variation du volume de production. Les installations manufacturières doivent donc dans l'idéal être également transformables en volume. Dans le cas contraire, le risque est double : perte de parts de marché si le volume de production est inférieur à la demande, et frais engagés dans des investissements trop importants lorsque les installations ne sont pas utilisées à leur plein potentiel, dans le cas où le volume demandé par le marché est inférieur à la capacité de production du système. L'usine idéale serait donc en mesure de suivre les besoins variables du marché en cadence de production. La variation

en volume se fait notamment très fortement sentir lors du démarrage d'une nouvelle ligne. La période de montée en puissance de la production correspond à un laps de temps où les ressources ne sont pas utilisées à leur plein potentiel. Un des objectifs serait que l'investissement dans les installations suive au plus près la croissance du potentiel de production lors du ramp-up.

La conception d'un système reconfigurable nécessite d'optimiser également les coûts de la reconfiguration du système, qui implique un arrêt de la production. Le réglage du système de production est ainsi une forme de compromis, à définir, entre le besoin de reconfigurabilité et la limitation des coûts liés à la transformation. Ainsi, cette thèse s'appuiera sur les technologies existantes dans les domaines de la robotique, des préhenseurs, des moyens informatiques. Nous nous concentrerons sur la détermination de la maille juste nécessaire de reconfigurabilité au regard des coûts et sur le réglage juste et idéal du système de production.

## 1.2 Cadre industriel

### 1.2.1 La diversité de production dans l'industrie

Des secteurs variés sont concernés par la gestion de la diversité produit et des volumes changeants. Les industries les plus sensibles sont celles traitant des volumes importants.

A une échelle journalière ou hebdomadaire, l'industrie agroalimentaire fait face à des changements de recette ou de format des produits. Ces changements sont planifiés et nécessitent une certaine flexibilité du système de production, ainsi qu'un basculement rapide lors de ces changements. Par ailleurs, l'agroalimentaire subit des effets de saisonnalité importants, notamment sur les produits très marqués par la saison comme les crèmes glacées et la bière, pour lesquels la consommation augmente fortement l'été, ou certains types de fromages industriels ou les soupes en brique, pour lesquels la demande subit une hausse l'hiver. Les variations en volume sont gérées par le recours à des intérimaires en ce qui concerne les ressources humaines, mais se traduisent en production par une moindre utilisation des installations en basse saison. En effet, les machines sont dimensionnées pour les volumes maximaux atteints pendant l'année. Un autre exemple de perturbation des installations est l'entrée en vigueur d'une nouvelle norme environnementale, qui peut obliger les industriels à revoir le conditionnement des produits, et à acheter des machines neuves adaptées aux nouveaux emballages. Cela génère des investissements non prévus, qui pourraient être diminués avec des machines plus adaptables.

En aéronautique, les volumes sont moindres. Néanmoins, les fournisseurs des constructeurs aéronautiques font face à l'introduction régulière de nouveaux produits sur le marché, ce qui peut entraîner une réorganisation de l'atelier. Celle-ci est plus aisée si le système de production a été conçu pour être déplacé ou transformé, avec une conception de la ligne sous forme de sous-ensembles. Par ailleurs, les dimensions des pièces en aéronautique sont telles qu'il est plus aisé de déplacer les machines que le produit. Le coût d'une machine spéciale dans ce domaine est très élevée, et une telle machine n'est pas adaptable. Actuellement, des recherches sont menées sur l'intégration de ressources robotisées mobiles en aéronautique [Gko et al.19], ce qui permet de réaliser des opérations sur tout type de pièce et à tout endroit des pièces.

L'industrie automobile, avec des volumes de production importants et des objectifs élevés en terme de qualité et de coûts, est le domaine le plus étudié actuellement en ce qui concerne la recherche sur les systèmes de production reconfigurables. L'industrie automobile fait l'objet du cas d'étude de cette thèse car nous disposons de données d'entrées pertinentes dans ce domaine.

### 1.2.2 Industrie automobile

La conception d'une ligne flexible et reconfigurable s'inscrit dans la démarche Usine du Futur du Groupe PSA. A partir des ateliers actuels, le Schéma directeur de chaque usine est défini. Il s'agit de la feuille de route définissant l'évolution de l'usine sur les trois prochaines années, avec un budget et des résultats attendus chiffrés. En accord avec le schéma directeur, de nouvelles briques technologiques sont installées sur les lignes. Le stade "Usine Excellente" est une vision de l'atelier à un horizon temporel de trois ans, synthétisant une cible construite à partir des briques technologiques estimées matures dans trois ans et des bonnes pratiques capitalisées au sein de toutes les usines du Groupe PSA. Tous les sites ont pour objectif cette vision de l'Usine Excellente. Enfin, l'Usine du futur, qui donne une vision à dix ans, définit une cible avec des briques technologiques non matures, permettant d'avoir une vision à long-terme sur le développement de nouvelles solutions. Cette vision marque un bond technologique par rapport à l'existant et permet de prioriser les briques technologiques nécessaires. L'articulation entre ces différentes cibles est schématisée Figure 1.1.

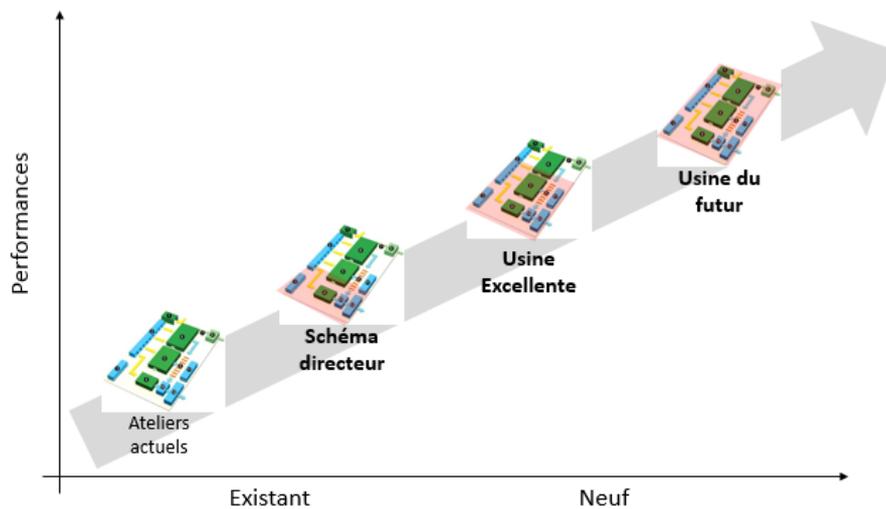


FIGURE 1.1 – Démarche Usine du Futur (source : document interne du Groupe PSA)

Actuellement, le système de production du Groupe PSA est configuré sous forme de lignes dédiées à une famille de produits, à cadence de production fixe. Les installations sont adaptées sur-mesure au produit, que ce soit au niveau de détail des préhenseurs et moyens de manutention des machines spéciales, spécifiquement conçus pour les produits manufacturés, ou au niveau macro du tracé du trajet du produit à travers les différentes stations de travail.

Les installations sont fixes, non reconfigurables, utilisant pour briques technologiques des convoyeurs pour le transport, des machines spéciales et robots sur les postes ou des postes manuels. Le système de production est prévu pour couvrir la demande des années à venir. Cela implique la construction d'une capacité de production qui ne sera pas utilisée à son plein potentiel avant plusieurs mois, étant donné le ramp-up du système. En effet, au démarrage, le volume de production augmente progressivement, suivant les aléas du démarrage de la production. Par ailleurs, l'introduction d'un nouveau produit implique l'arrêt de la production afin d'opérer aux changements nécessaires.

Cette situation est illustrée par la Figure 1.2, qui fait également apparaître la perte d'investissement en fin de vie du produit. L'ensemble de la ligne de production est alors encore

immobilisé, alors que le volume de production du produit en fin de vie décroît jusqu'à l'arrêt.

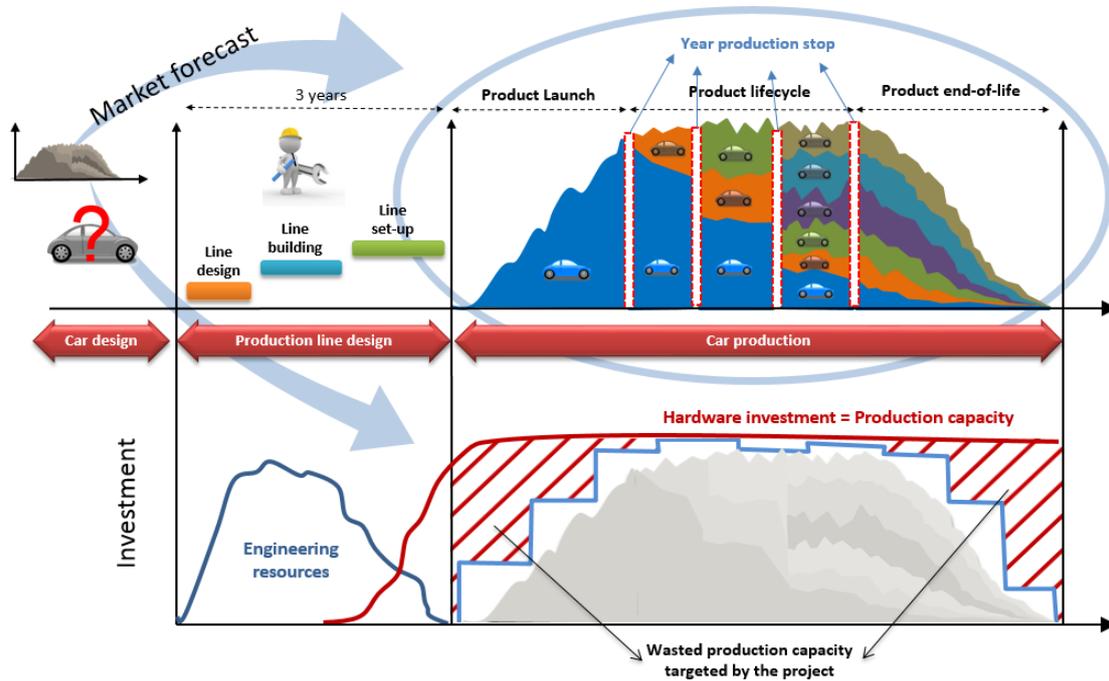


FIGURE 1.2 – Situation actuelle du système de production PSA (source : document interne du Groupe PSA)

La planification de la production se fait sur la base de prévisions. Les processus de planification, la préparation du calendrier de production et l'affectation des tâches au regard des échéances se font de manière consécutive sans boucle de rétroaction [Dem et al.17]. En effet, [And et al.17a] soulignent le défi de la prévision des ventes dans l'industrie, ce qui est d'autant plus difficile lorsque l'usine produit un catalogue de pièces variées. Afin d'optimiser la production, le travail de thèse se penche sur l'imbrication des différentes étapes : ramp-up, fonctionnement nominal, puis baisse d'activité.

Dans l'industrie automobile, l'étape de production qui doit faire face à la plus grande variabilité à une échelle court terme est l'assemblage final du véhicule en usine terminale. Cette différenciation entre les produits assemblés implique des différences de contenu de travail : selon le véhicule, un même poste nécessitera plus ou moins de temps d'assemblage. La planification procède donc à un lissage des véhicules dans un film de production ordonnancé, fixé 10 jours en avance dans le cas du Groupe PSA. Ce film est déterminé par un algorithme qui prend en compte des contraintes dues aux installations suivant leur niveau d'importance : super-majeures, majeures et mineures. La liste ordonnancée est construite dans un but de satisfaire un maximum de contraintes. Ces contraintes qui limitent la flexibilité de l'assemblage sont dues aux installations. Mais l'assemblage terminal étant majoritairement manuel, la réorganisation des opérateurs permet de transgresser certaines contraintes mineures. Au montage final, c'est la polyvalence des opérateurs qui permet de satisfaire la commande de véhicules variés. Une telle latitude n'est pas transposable à l'assemblage moteur, qui est bien plus automatisé. A moyen terme en assemblage terminal, le service qui gère le commerce et les usines conviennent ensemble des volumes approximatifs à produire pour les quatre mois à venir. Actuellement, lors de cette prévision, il n'est pas envisagé d'ajouter des éléments modulaires permettant d'augmenter la reconfigurabilité des lignes.

### 1.2.3 Cas d'étude : Assemblage moteur

Le cas d'usage dans le cadre de la thèse est plus précisément l'assemblage moteur au sein du Groupe PSA. Les usines dites « mécaniques », qui couvrent l'usinage et l'assemblage des moteurs, liaisons au sol et boîtes de vitesse se situent à Trémery (agglomération de Metz) et Douvrin (Hauts-de-France). Ce cas d'étude a l'intérêt de couvrir à la fois des postes très automatisés, au niveau de l'assemblage carter et culasse, et des postes manuels, sur l'habillage final. Par ailleurs, le constructeur automobile doit faire face à une diversité grandissante parmi les moteurs proposés.

Les moteurs thermiques assemblés sont alimentés en essence ou diesel, pour trois ou quatre cylindres selon les modèles. Ces caractéristiques définissent les familles de produits, assemblés sur des lignes distinctes. Ce type de diversité est défini comme un degré de variabilité non géré actuellement, comme illustré Figure 1.3. Au sein de ces familles de produits se distinguent des variantes, correspondant à des différences structurelles moins importantes qu'entre les types de familles moteur. Cette variabilité peut prendre la forme d'une différence sur la taille de cylindrée, présence d'un turbocompresseur ou non, nuance de forme de tête de piston correspondant à différents carburants ou une évolution des normes de pollution au sein de l'Union Européenne, etc.

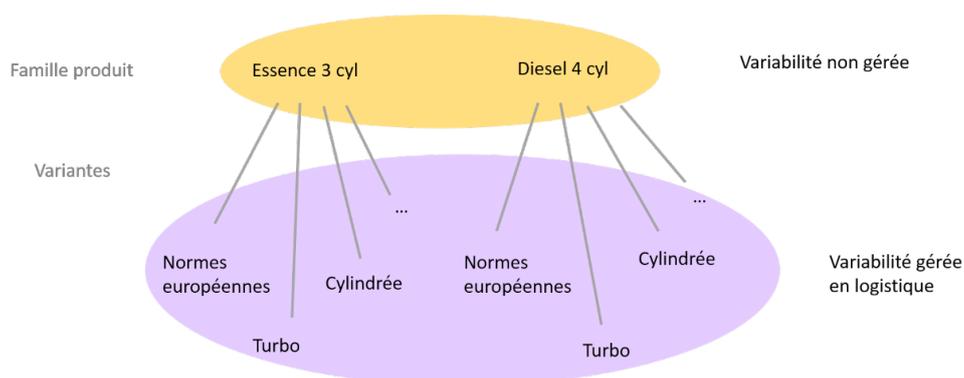


FIGURE 1.3 – Variabilité moteurs

La fluctuation des variantes ne nécessite pas de construire une ligne dédiée pour chacune, et il est possible de gérer cette flexibilité en logistique ou en ajoutant une dérivation de ligne, comme cela a été fait pour le montage du turbocompresseur sur le moteur essence 3 cylindres dans l'usine de Trémery (Figure 1.4). La gestion à travers la logistique peut se faire de deux manières. La première consiste à avoir un bac d'approvisionnement pour chaque variété, par exemple un bac par type de piston au poste de montage des pistons. L'opérateur choisit le piston dans le bac correspondant suivant le type de moteur qui se trouve devant lui. Il y a donc une nécessité de gestion de la diversité en bord de ligne, d'où une contrainte d'encombrement des postes par les stocks d'éléments à assembler. La deuxième approche résout en partie ce problème pour les pièces peu encombrantes. Afin de minimiser les stocks en bord de ligne et d'alléger la charge mentale de l'opérateur, des zones de « kitting » (voir définition dans le Glossaire) ont été créées dans l'usine. Sur des aires logistiques dédiées, des opérateurs constituent les kits de pièces correspondant à une variante de moteur. Puis les kits sont mis en circuit sur la ligne d'assemblage suivant le moteur auquel ils appartiennent. Les tâches d'assemblage consistent alors en la prise d'éléments du kit et leur fixation sur le moteur correspondant.

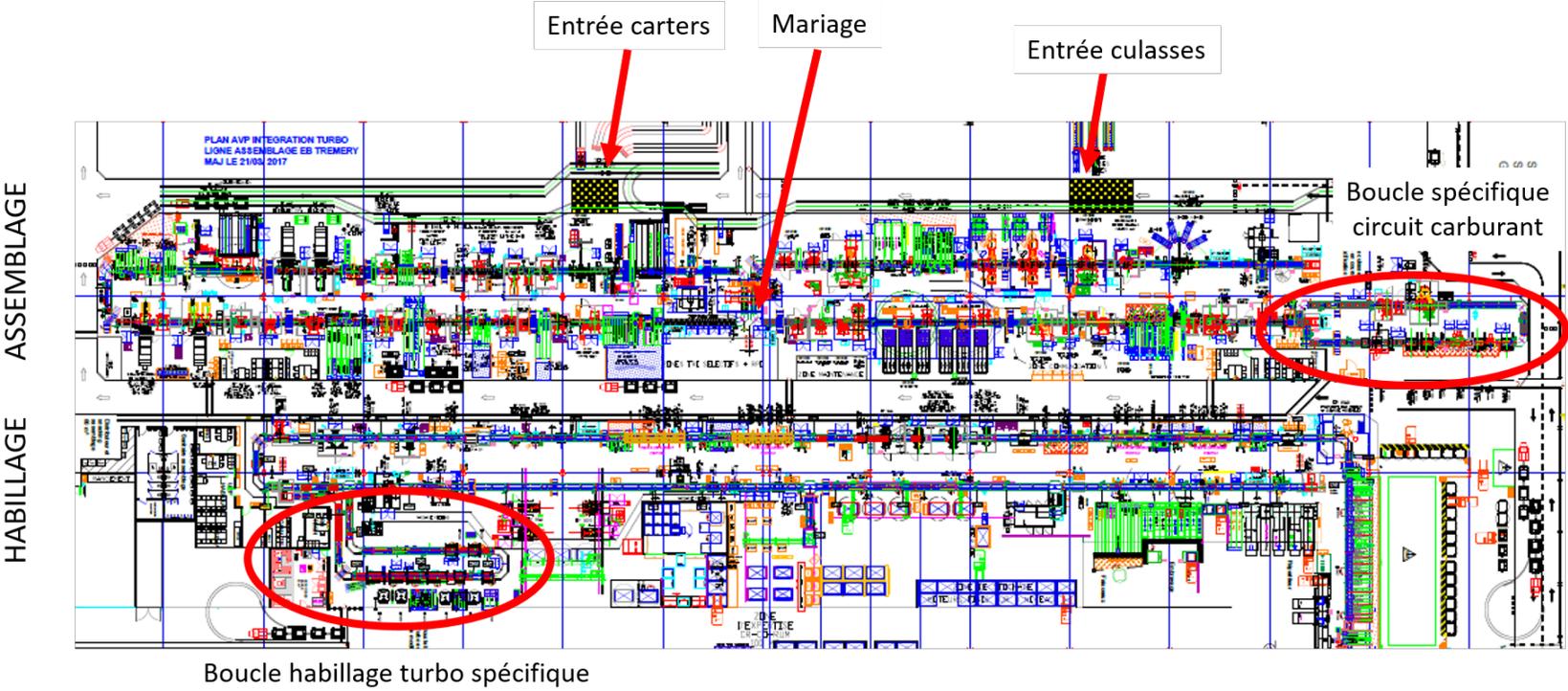


FIGURE 1.4 – Implantation assemblage moteur : usine de Trémery (source : Groupe PSA)

L'assemblage des moteurs thermiques se déroule comme suit : les carters et culasses usinés sur site entrent séparément sur deux lignes d'assemblage, qui se rejoignent lors du mariage du carter avec la culasse. Les moteurs arrivent ensuite sur la section habillage, très manuelle en comparaison avec la ligne d'assemblage. Une partie des postes d'habillage est en défilement continu. Pour le moteur essence 3 cylindres EB2FA, l'assemblage correspond à 35 postes pour le carter, 30 pour la culasse, et 32 en habillage. La vue d'ensemble est présentée Figure 1.4, faisant également apparaître les boucles spécifiques pour couvrir la diversité. Cependant cette solution avec boucles spécifiques ne peut pas être reproduite sans fin, car le plan met en évidence une limitation de place dans l'usine. Par ailleurs, la complexité du flux est augmentée par les boucles spécifiques et perturbe le respect du FIFO (First In First Out) ce qui génère des stocks de moteurs assemblés en bout de ligne.

A la fin de l'habillage et après une série de contrôles, les moteurs sont envoyés en usine terminale où le montage de l'ensemble du véhicule est effectué. L'usine terminale inclut également une ligne d'assemblage moteur d'une vingtaine de postes, sur laquelle les derniers composants du moteur sont assemblés.

Le moteur électrique justifie aussi le besoin d'un système de production ajustable. En effet, le ramp-up des moteurs électriques est difficile à prévoir. Il s'accompagnera d'un tassement des ventes de moteurs thermiques avec un ratio de mixte produit variable.

#### 1.2.4 Besoin industriel : Aide à la décision

Transformer le système de production d'un industriel tel que le Groupe PSA est un défi. Les volumes à fabriquer au quotidien sont très importants, ce qui implique une performance des installations laissant peu de place aux travaux de modification des lignes et aux expérimentations de nouvelles technologies.

Les équipes de recherche des industriels réalisent des démonstrateurs en laboratoire ou en environnement de production, afin de tester la robustesse des nouveaux process. C'est le stade de maturité attendu dans le cadre des projets européens H2020 par exemple. A ce stade cependant, la maturité technologique est évaluée, sans étude globale de l'impact financier et en terme de productivité de l'implémentation d'une telle technologie. Bien souvent, faute de compétences pour implémenter largement ces solutions dans l'équipement industriel, et l'avantage compétitif et économique n'étant pas démontré, les travaux ne sont pas poursuivis.

Les industriels sont donc demandeurs de méthodes pouvant leur permettre d'évaluer la pertinence d'une technologie pour leur moyens de production, puis des outils de dimensionnement des machines, et un support dans l'analyse de risque quant au choix de transformation du système existant.

Plus précisément, les besoins des industriels sont :

- réduire les délais entre les investissements dans des moyens de production et la fin de montée en cadence
- avoir un système incrémental en volume, en phase de croissance ou décroissance du marché
- assembler des produits variés sur une même ligne
- évaluer les avantages de la transformation du système de production en implémentant de nouvelles solutions
- avoir des outils de comparaison entre les systèmes actuels et les systèmes de nouvelle génération
- avoir des outils de comparaison de différentes implantations de l'atelier

Dans cette section, nous avons défini le contexte industriel et le cas d'application de la thèse. Les limites de l'appareil industriel actuel ayant été évoquées, la suite du chapitre a pour objectif de présenter la problématisation scientifique et les objectifs du travail de recherche.

### 1.3 Contexte scientifique

Les systèmes capables de s'adapter au contexte économique font actuellement l'objet de nombreuses recherches dans le domaine scientifique.

Les domaines de recherche académique couvrent au niveau opérationnel la recherche d'algorithmes efficaces pour les problèmes d'optimisation permettant de réorganiser les systèmes de production. Au niveau stratégique, l'étude de l'acceptabilité et de l'intégration de ces nouveaux concepts au sein des entreprises se base sur les caractéristiques de la reconfigurabilité définies par [Kor05], et sur leurs interactions dans le processus de conception du système transformable. Au niveau informatique, des outils de contrôle de l'installation industrielle, et des jumeaux numériques (Digital Twin) des usines, sont développés, avec également des développements de systèmes d'information permettant une circulation verticale des données captées sur les lignes et des ordres de fabrication envoyés vers les machines.

Sans être exhaustif, le tableau 1.1 liste certains laboratoires et universités dont les travaux se penchent sur les systèmes de production reconfigurables. Les publications citées seront détaillées dans les sections relatives à l'état de l'art dans les chapitres suivants.

Nos travaux se positionnent à l'interface entre l'état de l'art sur les systèmes flexibles et transformables et les besoins industriels actuels. Nous ne souhaitons pas nous limiter à un niveau de décision, et dans la continuité des recherches actuelles, nous ciblons une approche globale quantitative accessible au monde industriel.

### 1.4 Problématique

Dans ce contexte d'assemblage de moteurs variés, où la pression sur le coût du système de production est forte, le double objectif est de satisfaire la demande client tout en utilisant un moyen de production optimisé. D'où la question suivante : quelle est la meilleure stratégie de conception et de reconfiguration du système de production, afin de répondre à une demande fluctuante, dans un souci d'investissement incrémental ? Le travail de thèse couvre les deux types de variabilité : la variation en volume et en type de produit. La variabilité volume correspond au nombre de moteurs produits par année, qui fixe le takt time des lignes de production. La variabilité produit couvre, comme décrit précédemment, les différentes familles et variantes de produits. Dans le cadre de cette thèse, les produits seront considérés tels qu'ils sont conçus par l'ingénierie, sans travail de modularisation et reconception, qui ne font pas partie du périmètre de la thèse.

### 1.5 Objet de la thèse

Suivre la demande du marché et avoir un système de production optimisé en coût signifie avoir à tout moment du cycle de vie du système de production une installation idéale, s'adaptant au ramp-up et aux variabilités volume et produit. Les verrous scientifiques à lever sont l'identification d'une solution pour un système de production à forte variabilité dans un pays à coût de

<b>Laboratoire</b>	<b>Domaine de recherche</b>	<b>Publications</b>
Engineering Research Center for Reconfigurable Manufacturing Systems, University of Michigan, United States	Conception du système reconfigurable et contrôle de la production	[Kor et al.99] [Kor05] [Meh et al.00] [Kor et al.10]
Intelligent Manufacturing Systems Centre, University of Windsor, Canada	Systèmes de manufacturing reconfigurables et flexibles, Systèmes intelligents	[You et al.07] [EIM et al.16] [EIM et al.17]
Department of Materials and Production, Aalborg University, Danemark	Customisation de masse, Conception des systèmes reconfigurables	[And et al.17c] [And et al.17b]
Laboratory of Manufacturing Systems and Automation, University of Patras, Grèce	Robotique mobile, Planification intelligente, Digital twin	[Kou et al.19] [Gko et al.19]
School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Chine	Méthodes d'optimisation, analyse hiérarchique multicritères	[Wan et al.17]
Department of Industrial Engineering, University of Bologna, Italie	Conception, optimisation et simulation de systèmes reconfigurables	[Bor et al.18] [Bor et al.19]
Institute of Production Science, Karlsruhe Institute of Technology, Allemagne	Optimisation, planification agile	[Bue et al.17] [Bue et al.18b] [Bue et al.18a]
Department of Mechanical Engineering, University of Coimbra, Portugal	Implémentation industrielle de la reconfigurabilité, Optimisation	[Mag et al.18] [Mag et al.19]
Department of Industrial Engineering and Informatics, Aix-Marseille Université, France	Optimisation pour la conception et le réglage des systèmes reconfigurables	[Had et al.17] [Had et al.17]
Department of Automation, Production and Computer Sciences, IMT Atlantique, France	Optimisation pour la conception et le réglage des systèmes reconfigurables	[Cer et al.20]
Research Institute of Communication and Cybernetics of Nantes, Centrale Nantes, France	Smart Factory, Systèmes modulaires	[Bel et al.18]

Tableau 1.1 – Quelques laboratoires traitant des systèmes reconfigurables

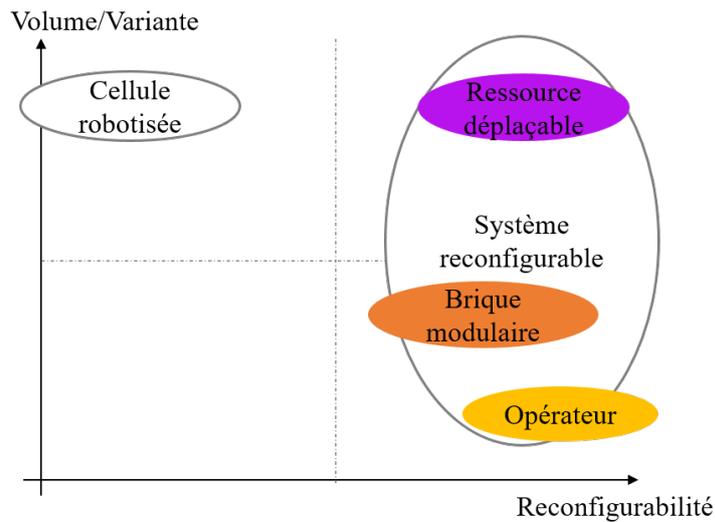


FIGURE 1.5 – Capacité en volume par variante et reconfigurabilité des systèmes

main d'œuvre élevée, et le développement d'un concept pour le chargement maximal des lignes dans un contexte de marché fluctuant en toute situation de charge et quel que soit le ratio de mixte produit.

Les livrables intermédiaires prendront la forme d'une modélisation du système de production, et d'un outil de décision avec un couplage entre un outil d'optimisation et de simulation. La solution finale consistera en une modélisation du système de production reconfigurable permettant de donner le réglage optimal en fonction des entrées en volume et ratio de mixte produit. La décision s'appuie sur les critères de productivité et de reconfigurabilité à définir.

Les données d'entrée sont le ratio de mixte des différents types de produits ainsi que le takt time nécessaire afin de satisfaire la demande du marché. Les gammes des produits, c'est-à-dire la séquence ordonnée du montage des différentes pièces, sont également considérées comme entrées du système et ne seront donc pas remaniées. L'étude se limite au système de production uniquement, sa configuration, son implantation et les briques technologiques mises en œuvre.

En sortie, l'étude doit fournir une proposition de solution technique pour le design d'un système reconfigurable, une proposition d'implantation des éléments du système de production, la répartition des produits sur les moyens d'assemblage et les paramètres (performance et reconfigurabilité) évalués. La solution est optimisée pour une demande du marché donnée et le processus d'optimisation pourra être réitéré selon une fréquence à définir afin de conserver une performance optimale.

Les travaux de thèse doivent donc permettre de passer de la situation actuelle, avec un système de production avec des cellules fortement automatisées et rigides, à un système composé de briques reconfigurables et flexibles. La Figure 1.5 met de manière qualitative en regard les composants du système de production, selon un axe reconfigurabilité en abscisse et volume par variante en ordonnée. Aujourd'hui, les installations dans les usines du Groupe PSA sont non reconfigurables mais permettent d'assembler de gros volumes grâce à un fort taux d'automatisation. L'objectif est de concevoir un système de production à la fois reconfigurable et capable de produire des volumes importants. Comme illustré Figure 1.5, au sein d'un système reconfigurable il est possible de transformer le système pour satisfaire des besoins variables en terme de volume.

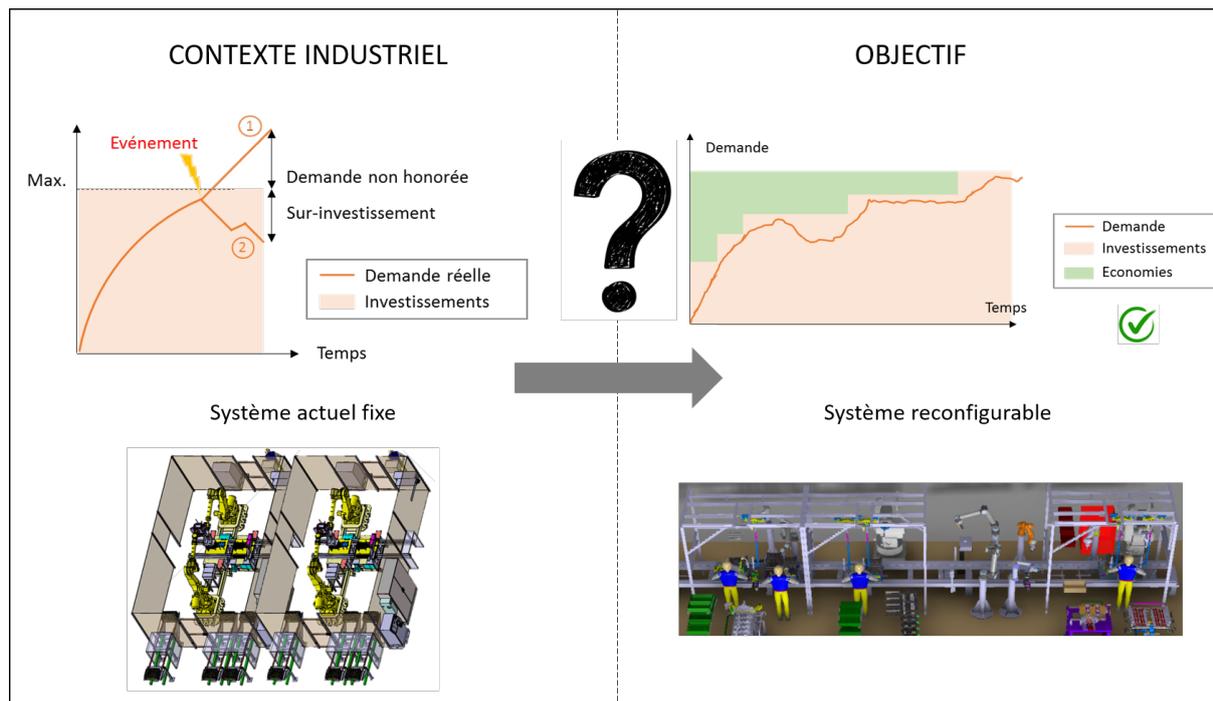


FIGURE 1.6 – Contexte et objectif

La Figure 1.6 résume l'objet de la thèse : permettre la conception d'un système reconfigurable, dans un souci d'investissement incrémental, permettant de répondre à une demande variable. Sur la gauche de l'image est présenté le système fixe actuel. Si un événement se produit et impacte fortement la demande, qui s'écarte alors des prévisions, le système sera sous-capacitaire (demande non honorée) ou sur-capacitaire (sur-investissement). Dans les deux cas, le fabricant subit des impacts financiers. L'objectif est d'être capable de concevoir un système reconfigurable et rapidement transformable. La capacité d'investissement incrémental désirée permettra de retarder les investissements, ce qui est illustré sur la Figure 1.6 par la surface en vert.

## 1.6 Périmètre de l'étude

Pour une compréhension de la suite de l'étude, il est nécessaire de définir les termes suivants : *Assemblage, Système d'assemblage, Planification de la production.*

L'*assemblage* couvre les tâches d'association des pièces détachées pour constituer un sous-ensemble, une structure, une machine, un équipement, un produit. Le résultat de l'activité d'assemblage est un produit [CIR14]. L'assemblage fait partie intégrante des étapes de la production, en dernière phase.

Par *système d'assemblage* est désigné l'ensemble des installations techniques pour effectuer le montage et l'assemblage d'ensembles et de produits finis, caractérisés par l'enchaînement rigide ou souple des unités de montage. Le terme désigne également l'arrangement de techniques dédiées à l'exécution d'une tâche de montage particulière d'un ou plusieurs produits différents ou personnalisés. Les installations d'assemblage sont soit des postes, soit des cellules, soit des lignes d'assemblage, qui s'inscrivent dans l'architecture de l'usine [CIR14]. L'objet étudié dans la thèse est le système dans son ensemble, incluant les éléments à l'échelle la plus petite du système de production comme les outils, et la considération d'un niveau macroscopique : cellule,

segment de ligne, ligne entière.

La *planification de la production* est l'application de la procédure choisie selon des règles précises pour la définition et l'exécution des tâches en rapport avec le montage [CIR14]. La planification s'appuie sur la gamme de montage produit, les précédences de montage, le principe du système de production sélectionné, en fonction de la demande du marché.

Dans le cadre de la thèse, seul le cas d'usage de l'assemblage moteur est considéré. Par abus de langage, le terme « système de production » sera utilisé de manière équivalente avec « système d'assemblage » dans le manuscrit.

Cependant, il est intéressant de noter quelles sont les principales différences entre un système de production et un système d'assemblage. Parmi les tâches de production, si l'on prend l'exemple de l'usinage, ce type de production couvre du fraisage, du tournage ou de l'abrasion sur des machines lourdes comme des machines-outils à commande numérique, l'assemblage regroupe les tâches de vissage, rivetage, collage, soudage, etc., sur des postes manuels, automatisés ou robotisés plus légers. Par ailleurs, le flux de matière se distingue : lors de l'usinage, la pièce usinée est transportée d'une machine à l'autre, et perd de la matière à chaque passage. Lors de l'assemblage, des éléments sont assemblés à un produit principal. La ligne d'assemblage, au contraire de la ligne d'usinage, doit gérer l'approvisionnement des pièces dont dépend la variabilité produit ce qui implique une logistique plus complexe. Dans un souci d'efficacité, la stratégie d'approvisionnement choisie est le just in time (JIT), just in sequence (JIS) ou le kitting [Hue et al.16].

## 1.7 Hypothèses

Les travaux de thèse s'appuient sur diverses hypothèses en terme de maturité technologique des éléments qui seront cités par la suite. L'étude de ceux-ci ne fait pas l'objet de la thèse.

Ces hypothèses peuvent être définies comme des risques vis-à-vis de la démarche proposée pour la conception du système de production reconfigurable. Un des verrous technologiques actuels concerne les normes de sécurité pour la collaboration homme-robot afin de permettre le mouvement du robot à proximité des opérateurs à vitesse suffisante pour réaliser les opérations nécessaires. En robotique, à la vue des travaux de recherche actuels, la programmation de la nouvelle génération de robots dits "collaboratifs" devrait s'universaliser et devenir plus simple. La baisse du prix des bras manipulateurs et des véhicules à guidage automatique (AGV) est supposée. La continuité numérique est également adressée. En effet, les entreprises visent une continuité à la fois dans la gestion des données concernant le produit mais également concernant les installations et le process.

Il serait intéressant d'aborder le niveau de maturité de ces différentes technologies afin d'aider au choix de la solution.

## 1.8 Plan du mémoire

Le travail qui suit est divisé en six chapitres, dont le premier est la présente introduction. Dans les sections précédentes, le contexte industriel et la problématique à l'origine du travail de recherche ont été présentés. L'objet de l'étude a été précisé, ainsi que les hypothèses qui cadrent le projet de recherche. La Figure 1.7 présente l'organisation du mémoire.

Les différents paradigmes de systèmes de production - systèmes fixe, flexible, et reconfigu-

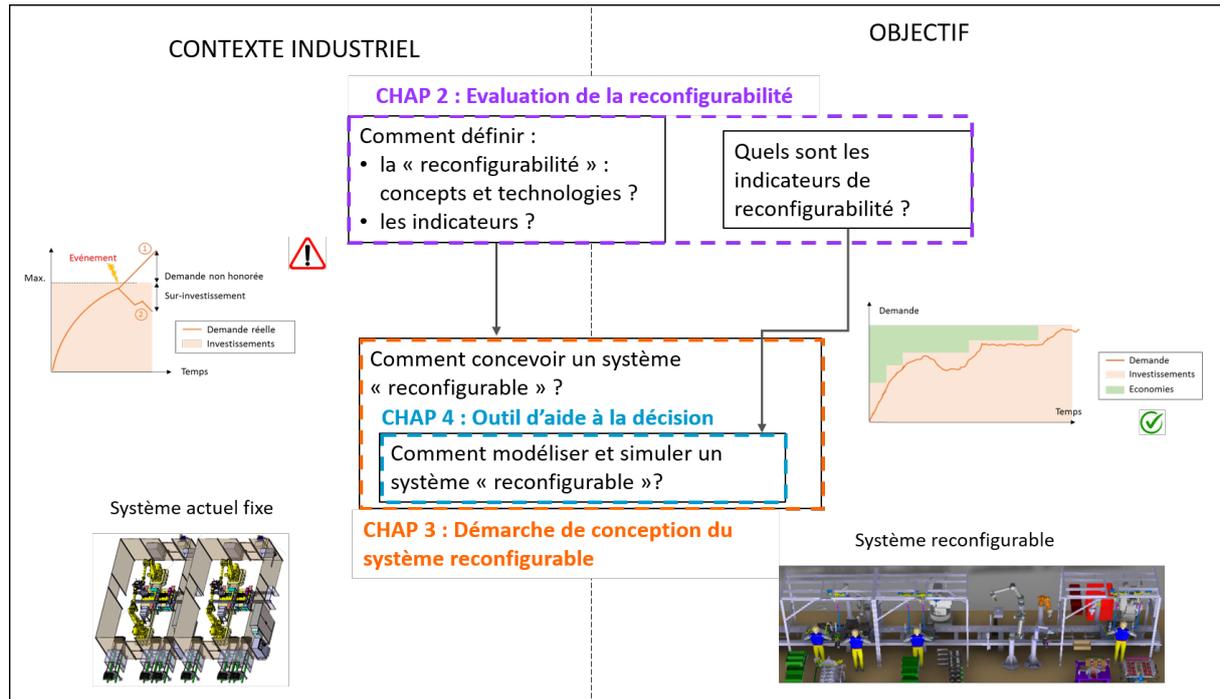


FIGURE 1.7 – Plan du mémoire

nable - sont détaillés au Chapitre 2, ce qui permet d'introduire un état de l'art sur les indicateurs de reconfigurabilité. Suite à l'identification des limites des indicateurs existants, nous proposons de nouveaux indicateurs pour l'évaluation de la reconfigurabilité du système de production.

Le Chapitre 3 présente une revue de bibliographie sur les méthodes de conception du système de production reconfigurable. Une fois les manques identifiés, la méthodologie de conception et d'évaluation du système reconfigurable faisant l'objet de la thèse est exposée de manière théorique. La méthode originale proposée se divise en quatre étapes, et utilise les indicateurs de reconfigurabilité définis au Chapitre 2 afin d'évaluer le système de production en terme de réactivité à un changement de la demande de production.

Le Chapitre 4 présente l'outil d'aide à la décision pour la conception du système reconfigurable. Cet outil met en jeu les critères de décision portant sur la performance, la reconfigurabilité et le coût des investissements. Les résultats sont présentés sous forme d'un tableau de bord, alimenté par les modèles de simulation et d'optimisation. L'outil principalement utilisé pour évaluer le système est la simulation à événements discrets (SED), afin d'obtenir les paramètres de performance du système sans avoir besoin de construire réellement la ligne d'assemblage. Le quatrième chapitre présente une revue de la littérature sur les techniques de simulation pour la conception du système de production reconfigurable, ainsi que d'optimisation, qui permet d'obtenir un réglage optimal du système. La simulation et l'optimisation étant complémentaires, les travaux portant sur le réglage du système de production par couplage simulation-optimisation sont également étudiés. La pertinence de cette approche nous amène à employer la combinaison de ces deux outils dans la démarche de conception proposée. Selon le type de problème à résoudre pour la conception du système reconfigurable, deux structures de couplage sont proposées. Enfin, une approche probabiliste est proposée par application de la théorie d'aide à la décision. Cette approche apporte une aide supplémentaire au choix du système de production dans un contexte économique incertain.

Le Chapitre 5 est consacré à l'application de la démarche à un cas d'étude, afin de montrer l'apport de la méthode proposée. Après une présentation du cas d'usage industriel, les étapes sont déroulées une à une sur plusieurs scénarios de demande du marché, et une proposition pour la transformation de la ligne existante en ligne reconfigurable est formulée à partir des résultats obtenus.

Une conclusion générale et la présentation de futurs axes de recherche, sur les plans scientifique et industriel, concluent ce mémoire avec le Chapitre 6.



# Chapitre 2

## Évaluation de la reconfigurabilité

### Sommaire

---

<b>2.1</b>	<b>Paradigme de la transformabilité</b>	<b>19</b>
2.1.1	Définitions	19
2.1.1.1	Flexibilité	19
2.1.1.2	Reconfigurabilité	19
2.1.1.3	Capacité de conversion	21
2.1.1.4	Transformabilité	22
2.1.1.5	Agilité	22
2.1.1.6	Périmètre retenu	22
2.1.2	Organisation des ateliers et flux	23
2.1.3	Les familles de systèmes de production	24
2.1.4	Systèmes reconfigurables	24
2.1.5	Classification des RMS	27
2.1.5.1	Niveaux de décision	27
2.1.5.2	Niveaux de changeabilité	28
2.1.5.3	Conclusion	29
2.1.6	État de l'art des briques technologiques	31
2.1.7	Concepts retenus	32
<b>2.2</b>	<b>État de l'art des indicateurs de reconfigurabilité</b>	<b>32</b>
2.2.1	Indicateurs qualitatifs	33
2.2.2	Indicateurs quantitatifs	34
2.2.2.1	Indicateurs basés sur la performance	34
2.2.2.2	Indicateurs basés sur les critères de reconfigurabilité	37
2.2.3	Bilan de l'état de l'art	37
<b>2.3</b>	<b>Indicateurs de reconfigurabilité</b>	<b>38</b>
2.3.1	Scalabilité	39
2.3.2	Convertibilité	40
2.3.3	Modularité	41
2.3.4	Intégrabilité	41
2.3.5	Customisation	42
2.3.6	Capacité de diagnostic	42
2.3.7	Pondération et agrégation des indicateurs	43
<b>2.4</b>	<b>Conclusion</b>	<b>44</b>

---

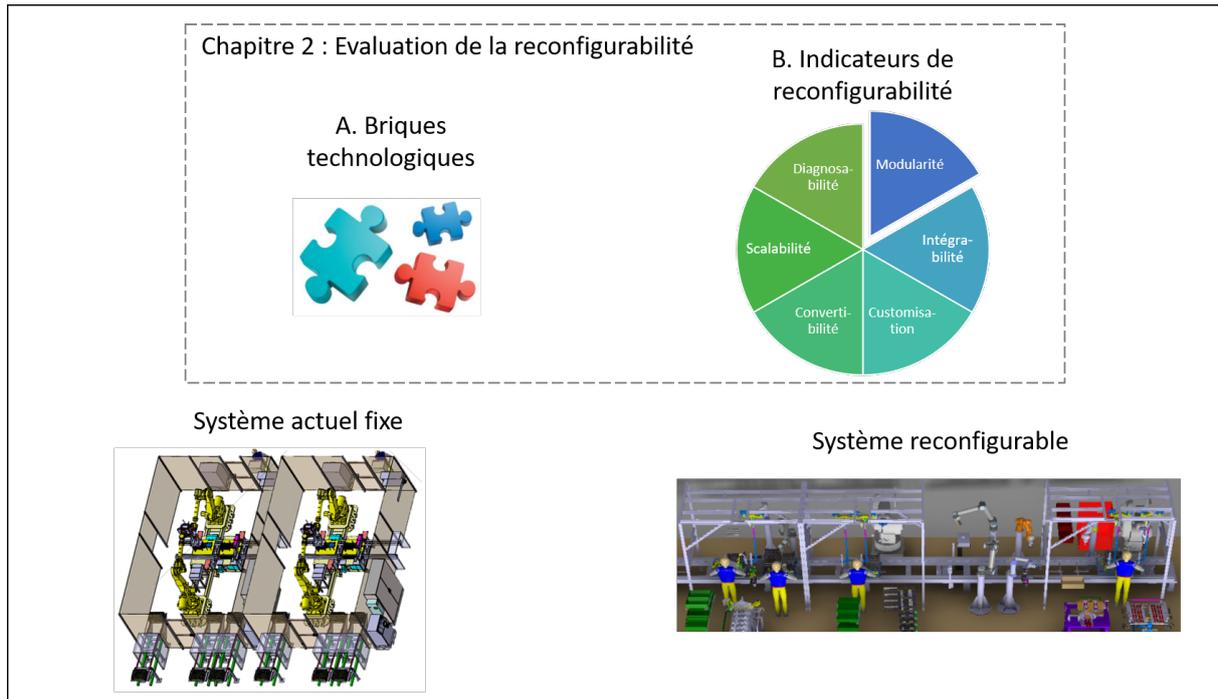


FIGURE 2.1 – Objectifs du Chapitre 2

L'objectif de ce chapitre est de définir les outils permettant d'évaluer la reconfigurabilité d'un système de production. Dans un premier temps, un rappel des définitions des termes employés pour définir les nuances de la transformabilité est présenté. Puis un état de l'art des systèmes reconfigurables permet une classification de ceux-ci. Les briques technologiques pertinentes pour la démarche de conception proposée au chapitre suivant sont présentées (point A. de la Figure 2.1).

Dans une deuxième partie, un état de l'art des indicateurs de reconfigurabilité est réalisé. Les nouveaux indicateurs développés dans le cadre de la thèse sont ensuite présentés (point B. de la Figure 2.1). Ceux-ci seront utilisés dans la suite des travaux pour évaluer le niveau de reconfigurabilité du système étudié.

## 2.1 Paradigme de la transformabilité

### 2.1.1 Définitions

L'objectif de cette section est de définir les termes employés dans la suite du manuscrit.

#### 2.1.1.1 Flexibilité

De manière générale, la flexibilité est la capacité à s'adapter aux circonstances particulières. En production, la flexibilité désigne cependant une capacité limitée d'adaptation. D'après [Meh et al.00], un système de production flexible est un système dont le matériel est fixe et le logiciel programmable afin de prendre en compte des changements : ordres de fabrication, calendrier de production, outils pour certains types de produits. Ces changements tactiques s'effectuent dans un laps de temps restreint et de manière réactive. La transformation peut avoir lieu en plusieurs points, à travers la modification des process de fabrication, des flux et des fonctions logistiques [Wie et al.04].

Un système flexible s'adapte à une gamme de variantes prédéfinies avant le démarrage de la ligne de production. La modification se fait rapidement, sans forte modification du système et avec peu de ressources financières [Ben et al.16 ; Møl08].

Pour la suite, la définition retenue pour le terme flexibilité est la suivante :

*Flexibilité* : Caractéristique de transformabilité d'un système fixe avec des capacités intrinsèques (technologiques ou logicielles) d'adaptation à plusieurs variantes de produits prédéfinies et prévues.

Le terme flexibilité est également utilisé pour désigner la flexibilité produit et la flexibilité en volume. La flexibilité produit, ou flexibilité de type de variante, est la capacité d'un système de fabrication ou d'assemblage à réaliser diverses variantes d'un produit sans nécessiter des travaux de rajustement importants [CIR14]. La flexibilité en volume concerne la capacité à modifier rapidement le takt time de la ligne.

#### 2.1.1.2 Reconfigurabilité

Un système de production reconfigurable est issu de procédés de base modulaires, à la fois logiciel et matériel, pouvant être redispesés ou remplacés rapidement et facilement. Il peut être amélioré, reconfiguré et mis à niveau plutôt que remplacé [Meh et al.00]. La reconfigurabilité repose sur six caractéristiques clés, définies par [Kor et al.99], qui sont : la modularité, l'intégrabilité, la capacité de diagnostic, la scalabilité, la convertibilité, et la customisation. Ces caractéristiques peuvent être classées selon deux catégories, présentées Figure 2.2 : les caractéristiques critiques pour la reconfiguration et les caractéristiques permettant une reconfiguration rapide [Kor et al.10]. [Nap et al.18] ont exploré les liens et influences entre les caractéristiques définies par Koren. Selon ces travaux, la modularité et l'intégrabilité posent les bases permettant la réalisation des autres caractéristiques. Concernant la scalabilité du système de production, elle peut être améliorée à travers l'intégration de postes de travail universels, l'ajout ou l'échange de briques modulaires grâce à la redondance des ressources [Nap et al.19].

D'après [Wie et al.04], la reconfigurabilité est la capacité pratique d'un système manufacturier ou d'assemblage à basculer réactivement et rapidement vers le mode de production d'un certain nombre d'unités ou sous-ensembles à travers l'ajout ou la suppression d'éléments fonc-

tionnels isolés. Finalement, la cible est de fournir exactement les fonctionnalités ou capacités de production souhaitées, au moment souhaité [Ben et al.16].

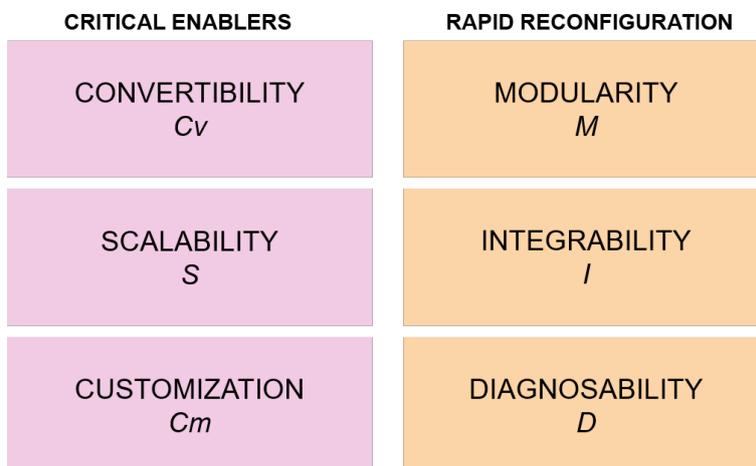


FIGURE 2.2 – Caractéristiques de la reconfigurabilité issues de l'analyse de [Kor et al.10]

Par ailleurs, [Pas93] propose une représentation du cycle de vie du système d'assemblage avec ses différentes phases : planification, démarrage (montée en cadence), production, changement de tâche, changement de système, démontage, présenté Figure 2.3. Selon [Pas93], la phase de démarrage nécessite une capacité d'ajustabilité, tandis que la production doit être robuste, c'est-à-dire insensible aux perturbations. Le basculement planifié entre tâches fait appel à la versatilité (flexibilité), et la transformation du système à la caractéristique d'adaptabilité à des tâches non planifiées (reconfigurabilité). Enfin, le démontage du système met en jeu la notion de réutilisation des équipements, à l'image du "carry-over" au sein du Groupe PSA.

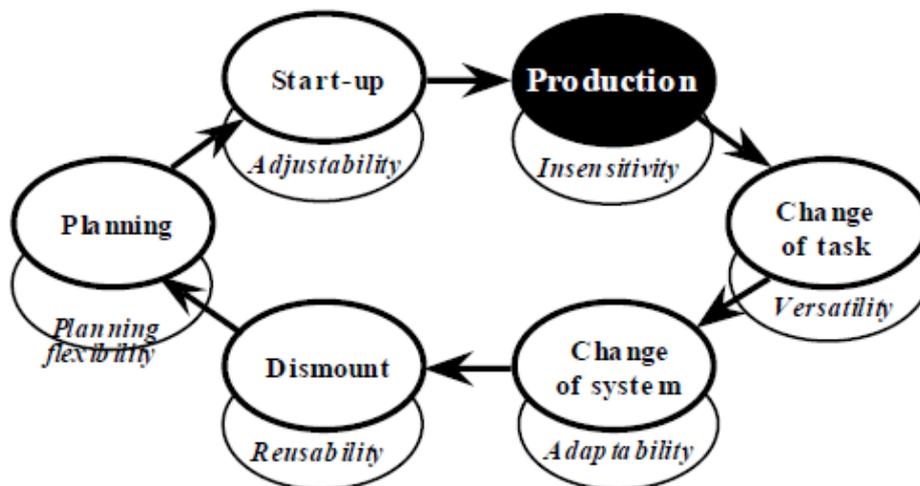


FIGURE 2.3 – Cycle de vie du système d'assemblage et flexibilités associées [Pas93]

La *modularité* correspond à des systèmes d'assemblage dans lesquels tous les sous-systèmes, c'est-à-dire les postes de montage, les dispositifs d'enchaînement, les dispositifs de rangement, la commande, etc., sont conçus de telle manière que chacun constitue une unité du système. Les différents modules peuvent être combinés de manières multiples. La modularisation consiste en la compartimentalisation d'opérations fonctionnelles et exigences en unités quantifiables [CIR14; Kor et al.99; Kor05].

L'*intégrabilité* est la capacité d'intégrer un nouvel équipement de manière rapide et simple [Kor05].

La *capacité de diagnostic* est la capacité de détection de pannes et défauts qualité [Kor05].

La *scalabilité* (scalability en anglais), ou capacité d'investissement incrémental, est la capacité à changer facilement la capacité de production en réarrangeant un système existant, et/ou en changeant la capacité de production de composants reconfigurables (machines) du système [Kor et al.99].

La *convertibilité* est la capacité du système à changer aisément les fonctionnalités du système pour répondre à de nouveaux besoins de production [Kor05].

La *customisation* est la capacité de réglage du système de production adapté à une famille de produits en particulier [Kor05].

Pour ce qui suit, la définition retenue pour le terme reconfigurabilité est la suivante :

*Reconfigurabilité* : qualité d'un système composé de sous-ensembles permettant un changement de production rapide non planifié en volume ou en type de produit, passant par une modification de la structure du système de production.

Dans la thèse, la reconfigurabilité décrit donc des modifications plus importantes que dans le cas de la flexibilité. Au regard du cas d'usage de l'assemblage moteur chez PSA, la flexibilité couvre la variabilité des variantes au sein des familles produit, tandis que la reconfigurabilité est la prise en charge de la variabilité entre les familles produit. De plus, la reconfigurabilité couvre à la fois les événements prévus et les imprévus. La Figure 2.4 illustre la différence de transformation entre les concepts de flexibilité et reconfigurabilité. Sur une échelle de temps, une configuration donnée d'un système de production flexible couvre une plage d'exigences, par exemple un certain nombre de variantes de produits. La transition entre deux réglages du système de production correspond à une étape de reconfiguration.

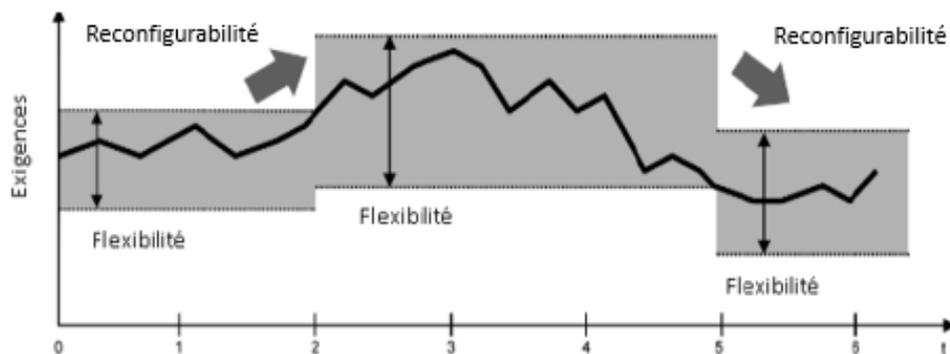


FIGURE 2.4 – Reconfigurabilité et Flexibilité [Nyh et al.10]

### 2.1.1.3 Capacité de conversion

La capacité de conversion, terme employé par [Wie et al.07], définit la capacité opérationnelle d'une machine à réaliser une opération ou un assemblage en particulier sur un produit, au moment désiré, avec un effort et un délai minimaux.

#### 2.1.1.4 Transformabilité

[Wie et al.07] définit la transformabilité au niveau tactique. Il s'agit du potentiel d'une usine à basculer sur la fabrication d'une nouvelle famille de produits. La transformabilité implique des changements de la structure du système, du transport des pièces au sein de l'usine, et du process.

#### 2.1.1.5 Agilité

Tandis que la flexibilité et la reconfigurabilité se rapportent au niveau le plus détaillé du système de production jusqu'à l'échelle de la ligne entière de montage, le terme agilité concerne la capacité stratégique d'une entreprise dans son ensemble, proactivement, à accéder à un nouveau marché, développer les produits et services requis, et mettre en place la capacité de production nécessaire. Il s'agit de garder de manière proactive la part de marché dans un contexte de forte compétitivité, et à être capable de changer le portfolio produit [Wie et al.04] [Wie et al.07; Has et al.12]. Dans le cadre de la reconfigurabilité ou de la flexibilité, il s'agit uniquement d'un changement structurel ou fonctionnel du produit ou sous-produit.

#### 2.1.1.6 Périmètre retenu

Avec des volumes de production de 200.000 à 640.000 produits assemblés par an par ligne, et des variabilités de l'ordre de 16 variantes par famille de produit, le cas d'étude s'inscrit dans un contexte de forte variabilité et fort volume (Figure 2.5). Il s'agit d'un cas plus complexe que dans le cas d'un fort volume avec forte variété, ou faible volume et grande variété de produits [Jin et al.97].

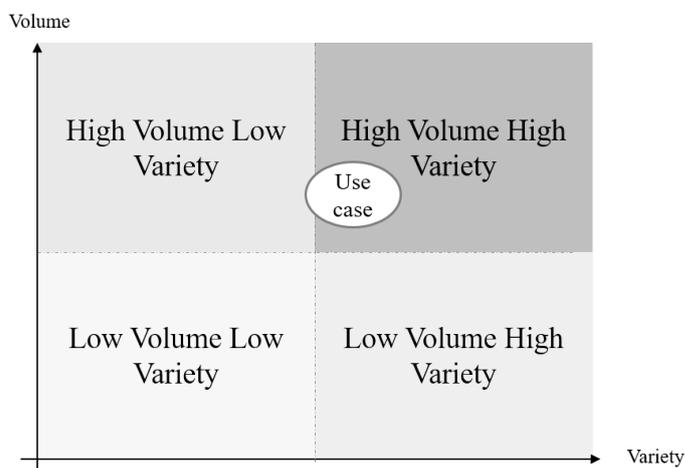


FIGURE 2.5 – Diagramme volume/variété [Bea et al.18]

Au sein du système de production souhaité, les changements de volume et de ratio de mixte produit (taux relatif de chaque famille produit sur une période de production) ne sont pas planifiés au démarrage de la ligne. La thèse s'inscrit dans un contexte économique incertain dans lequel les changements de produits doivent être rapides afin de suivre la demande du marché. En s'appuyant sur les définitions retenues dans la section précédente, la Figure 2.6 représente les fluctuations des besoins en reconfigurabilité et flexibilité en fonction de l'environnement économique. Sur ce graphe, la flexibilité, permettant moins de changements que la reconfigurabilité,

est présentée comme une composante de celle-ci. Pour un environnement économique certain, la flexibilité suffit pour s'adapter à des changements de production prévisibles. Plus l'environnement économique est imprévisible ("turbulent"), moins la flexibilité sera pertinente pour couvrir le besoin en capacité de changement. Le travail de recherche s'inscrit dans la partie gauche du graphe : dans un environnement économique incertain, le besoin en reconfigurabilité est maximal, afin d'adapter le système à des changements imprévus. La flexibilité ne suffit pas à couvrir la transformabilité nécessaire au système de production.

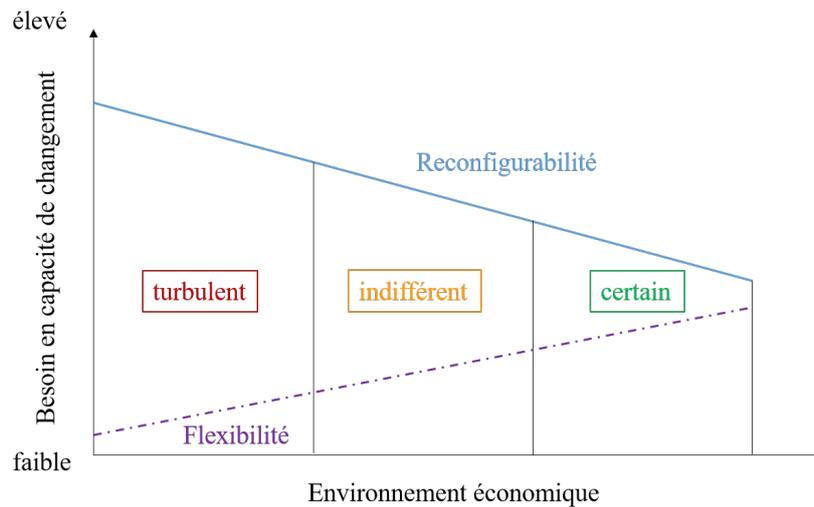


FIGURE 2.6 – Reconfigurabilité et flexibilité en fonction de la certitude de l'environnement économique (adapté de [Rei00])

### 2.1.2 Organisation des ateliers et flux

L'organisation classique des systèmes de production peut être catégorisée de la manière suivante :

- Organisation en chantier : le produit final est fixe et les moyens de production sont transportés auprès du produit. Ces moyens regroupent toutes les ressources employées pour la production : moyens de soudage, vissage, perçage, peinture, etc. Cette organisation se retrouve sur les chantiers navals ou en aéronautique.
- Job shop : les moyens de production sont regroupés par type. Les produits transitent entre les groupes de machines, ce qui peut impliquer des aller-retours du produit et un flux complexe. Cette organisation se voit surtout pour des centres d'usinage dans un atelier de production.
- Organisation en îlot de production : les machines sont regroupées par produit, réduisant le transport entre les ressources. Les ressources ne sont pas partagées, au contraire du job shop. Cette organisation est pertinente pour les fournisseurs directs, car elle permet d'éviter le croisement des flux de produits de clients différents.
- Organisation en flux de production ("flow shop") : les ressources sont organisées de manière linéaire et chaque produit transite par tous les postes dans le même ordre. Adapté pour un produit avec peu de variabilité et un fort volume, c'est l'implantation actuelle des usines dans l'industrie automobile.

Parmi ces organisations, l'organisation en chantier permet une grande reconfigurabilité, mais l'assemblage du produit est unitaire. Les îlots de production permettent une production flexible,

dans la limite d'un volume et d'une variabilité restreints. En effet, une grande variabilité de production et/ou un fort volume impliqueraient un flux de production complexe et source de ralentissements.

En revanche, l'organisation en flux est par nature non flexible. Dans le cadre de la thèse, c'est cette configuration de ligne qui est étudiée afin d'y introduire de la reconfigurabilité.

### 2.1.3 Les familles de systèmes de production

Le système de production dédié (DMS) a permis au XXème siècle de produire en grande quantité, de manière productive, des produits avec peu de variabilité. Le système est fixe à la fois en terme de spécificité produit et en terme de volume de production. Puis en cherchant à couvrir un nombre de produits plus large, le système de production flexible (FMS) a permis de produire, sur une même ligne, plusieurs variantes d'une même famille de produits, dont les caractéristiques sont connues et définies avant le démarrage de la ligne. Cependant, le FMS est limité par la plage de variabilité définie lors du démarrage [Möl08]. En effet, le système flexible est adapté à un environnement économique peu turbulent. Une transformation profonde du DMS ou du FMS nécessite un arrêt prolongé de la production, ce qui n'est pas souhaitable.

Enfin, le système manufacturier reconfigurable (RMS) et le système d'assemblage reconfigurable (RAS), introduits par [Meh et al.00] et [Kor et al.99], permettent d'avoir un système capable de s'adapter rapidement à des variations de marché ayant des conséquences sur les caractéristiques du produit ou les volumes à produire. Cette capacité est réalisée grâce à une structure modulaire du système de production qui permet une transition aisée entre familles de produits. La capacité incrémentale, définie par [Kor05] comme caractéristique de la reconfigurabilité, permet de s'adapter à des volumes variables, en phase de montée en cadence ou de fin de vie d'un produit. Le RMS possède une capacité intrinsèque à s'adapter à de nouvelles exigences, à la fois sur le plan physique et logiciel.

Les paragraphes suivants vont détailler les principes structurants des RMS et RAS.

### 2.1.4 Systèmes reconfigurables

L'étude de la bibliographie a permis de mettre en évidence les concepts de systèmes reconfigurables étudiés jusqu'ici. Les concepts proposés consistent principalement en des implantations flexibles pour le flux de production, des systèmes sous forme de briques modulaires et des installations incluant des ressources mobiles entre les postes de travail.

L'organisation des lignes en flux de production permet, comme vu dans la section précédente, de fabriquer un produit unique à une cadence élevée. [Hu et al.11 ; Wan et al.13 ; Nyh et al.10] présentent différentes configurations possibles en conception de système d'assemblage. Ces configurations, illustrées Figure 2.7, permettent à la fois de fabriquer des produits plus complexes, nécessitant des flux non linéaires, et d'intégrer de la flexibilité afin de produire différentes variantes. Il s'agit d'une organisation en flux de production flexible ou reconfigurable.

La Figure 2.7 présente des flux en parallèle, ce qui autorise la simultanéité des opérations. Les postes en parallèle peuvent être disposés en série, en série avec croisement des flux ou en asynchrone. Dans cette dernière configuration, les produits suivent des flux différents selon leur type. Selon [Hu et al.11], les systèmes asynchrones sont surtout employés pour les systèmes d'assemblage nécessitant le montage de sous-ensembles, tandis que les lignes synchrones symétriques sont plus adaptées à la fabrication.

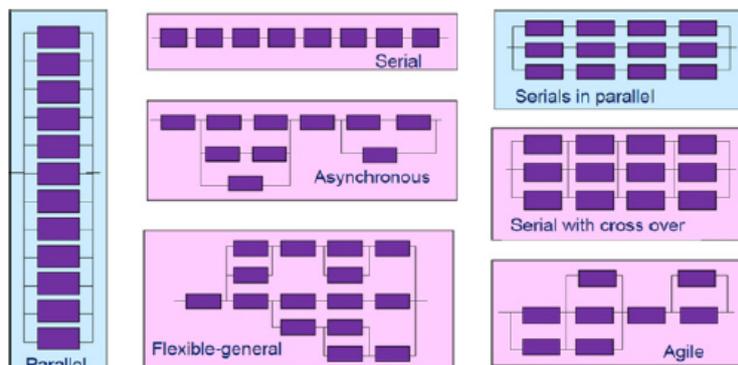


FIGURE 2.7 – Configurations pour le système d'assemblage [Hu et al.11]

Toujours selon un principe de combinaison du flow shop et du parallélisme des activités, des configurations similaires sont proposées par [Wan et al.13] et [Kor et al.17]. La Figure 2.8 représente ce schéma de ligne de fabrication reconfigurable. Le principe est d'avoir un flux principal qui croise des lignes dédiées sur lesquelles le transport des pièces est réalisé par un portique, avec un espace conservé en bout de ligne afin de pouvoir éventuellement ajouter de nouvelles machines ("Gantries"). Ce principe est également exposé par [Nyh et al.10] pour une ligne d'assemblage qui combine un flux principal automatisé commun à toutes les variantes de produit et des lignes dédiées avec un flux parallèle au flux principal. Il est possible de rajouter des postes dédiés en bout de ligne, soit pour augmenter la cadence, soit pour augmenter la complexité de l'assemblage, par exemple dans le cas de l'introduction d'un nouveau produit.

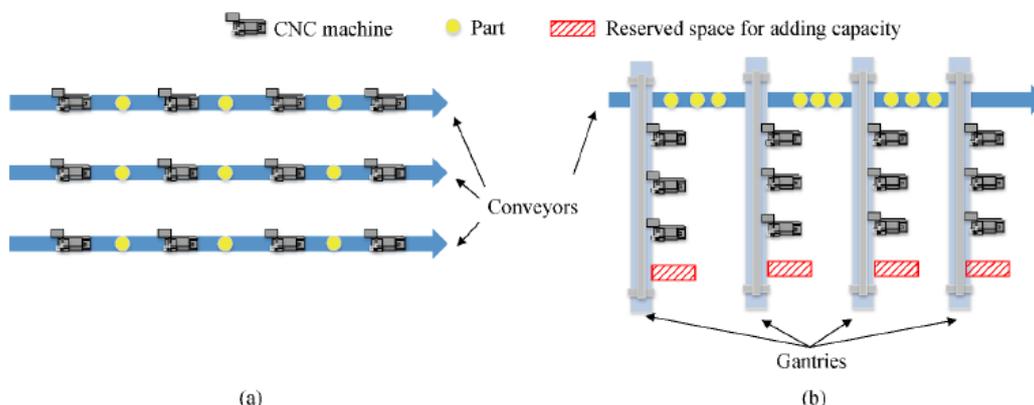


FIGURE 2.8 – Implantation de lignes parallèles en série (a) et ligne reconfigurable (b) [Kor et al.17]

Selon un tout autre principe, [AIG et al.15] présente un principe de cladistiques sur la base d'une analyse matricielle des étapes de production dans le but de déterminer la granularité et la configuration optimale d'un système composé de postes modulaires, incluant à la fois des stations automatiques et des postes manuels. En cas de démarrage de la production d'une nouvelle famille de produit, le système peut être réarrangé. La Figure 2.9 illustre un exemple de trois configurations prévues couvrant trois familles de produit avec les mêmes postes, réarrangés selon une nouvelle implantation. [Nyh et al.10] présentent un concept similaire composé de modules génériques qui peuvent être personnalisés pour les besoins spécifiques de la ligne de production. La commande logicielle des modules est également séparée entre les entités, ce qui

permet une intégration aisée de nouvelles fonctionnalités.

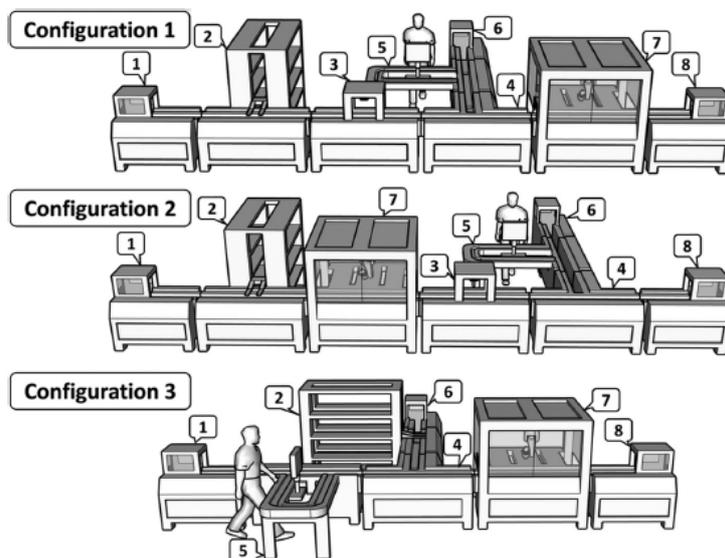


FIGURE 2.9 – Configurations pour le système reconfigurable modulaire [AIG et al.15]

Plus spécifiquement, [Ara et al.00] présentaient déjà en 2000 une approche "Plug and Produce" des ressources robotisées. Dans l'expérience relatée, l'introduction d'un nouveau produit nécessite l'ajout d'une ressource. L'intégration du robot supplémentaire est effectuée en 5 min et 8 s. Cette durée comprend l'intégration physique, la calibration, et le raccord du module de contrôle du robot avec le système d'information de l'installation.

Le concept d'intégration rapide de robot a été réutilisé de nombreuses fois depuis, notamment par [Mic et al.16] qui vont plus loin avec des robots sur plateforme mobile et un concept "Plug and Produce" automatique, sans intervention humaine nécessaire, pour un cas d'usage industriel en assemblage. Ce concept s'appuie sur la présence d'outils et préhenseurs échangeables en bout de bras de robot, et sur un système de contrôle intelligent commun. L'étude de cas présentée par [Mic et al.16] consiste en une simulation du système sur plusieurs années avec changement des produits assemblés, qui met en évidence un gain en productivité dû à la réduction de temps de changement entre les configurations.

[Zür et al.17] utilisent des plateformes robotiques déplaçables afin de transformer la capacité de production d'un système d'assemblage par échelons, avec pour objectif une capacité de reconfiguration en volume. Les tâches sont réparties entre les opérateurs et les robots collaboratifs déplaçables. L'étude de l'implantation de ce concept dans l'atelier de ferrage d'un constructeur automobile fournit une prévision de réduction du nombre de robots de manutention de 20%, une réduction du nombre de postes de travail, le remplacement de dispositifs d'approvisionnement par des postes collaboratifs et une réduction globale de la surface de 25%. L'approche présentée dans cet article permet sur ce cas d'usage d'améliorer à la fois la productivité du système et sa capacité à s'adapter à la cadence définie par la demande du marché.

Au niveau de l'outil, la littérature étudiée couvre également la conception d'outils reconfigurables. Au contraire de l'outil flexible, dont l'objectif est de couvrir la variabilité en produit la plus large possible, l'outil reconfigurable doit pouvoir être transformé mécaniquement. Ce concept a principalement été développé dans le cadre de cas d'usage en usinages et se base sur un principe d'outil modulaire [Lan et al.01].

## 2.1.5 Classification des RMS

### 2.1.5.1 Niveaux de décision

Les différents concepts présentés dans la Section 2.1.4 ont fait l'objet de classifications selon les échelles de production. Selon le niveau de l'entreprise, le système peut faire preuve soit de flexibilité, soit d'agilité, ou de reconfigurabilité. [Tho et al.98] définissent les niveaux de l'entreprise de la manière suivante : le niveau opérationnel couvre les décisions liées à la planification quotidienne ou hebdomadaire, le niveau tactique les décisions concernant la gestion des commandes, la planification afin de minimiser les temps de changements entre séries de production, la planification des opérations de maintenance. Au niveau stratégique, les décisions portent sur le business plan de l'entreprise et son positionnement sur le marché.

[Jov et al.03; Hue et al.16; Wie et al.04; Wie et al.07] proposent des représentations des niveaux de reconfiguration des lignes de production. La Figure 2.10 présente la correspondance entre les niveaux de production, qui peuvent être l'outil, la station, la cellule robotisée, le segment de ligne, la ligne, l'usine, le site, ou le réseau de sites de production. Sur un autre axe, les niveaux du produit, du portfolio au composant. Sur ces axes sont représentés les différents termes relatifs à la transformabilité de l'entreprise : capacité de conversion, reconfigurabilité, flexibilité, transformabilité, agilité.

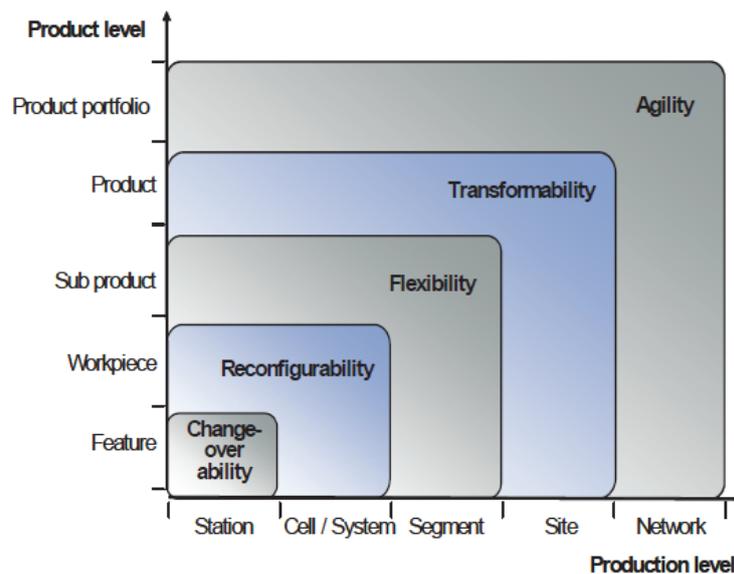


FIGURE 2.10 – Classification des RMS selon les niveaux de décision [Wie et al.07]

Dans une autre publication, [Wie et al.04] séparent le cadre d'évaluation de la flexibilité du système de production en deux axes : l'axe produit ("object") et l'axe du niveau de production. Selon ce cadre, les niveaux de production réseau d'usines et site font l'objet de décisions stratégiques, tandis que les niveaux plus bas - de la station de travail au segment de ligne - font l'objet de décisions à plus court terme (Figure 2.11). Cette représentation, qui contextualise les trois niveaux de décision de l'entreprise, est complémentaire de la Figure 2.10 qui place les termes définissant les différents niveaux de transformabilité de l'usine.

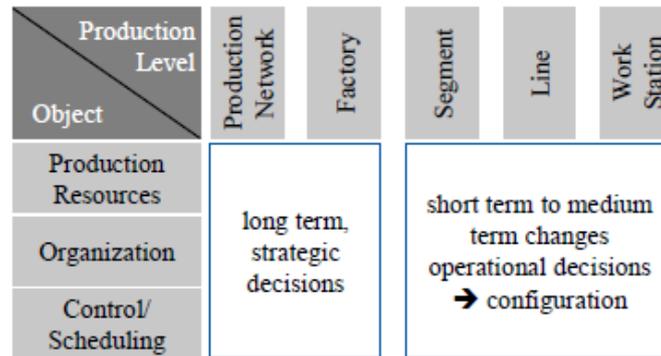


FIGURE 2.11 – Cadre d'évaluation pour le paradigme de flexibilité [Wie et al.04]

### 2.1.5.2 Niveaux de changeabilité

À partir des travaux de [Wie et al.04; Wie et al.07] présentés précédemment, la Figure 2.12 étoffe la Figure 2.10 en intégrant les trois niveaux de décision de l'entreprise, et retient uniquement les termes *agilité*, *reconfigurabilité* et *flexibilité*, que nous avons définis dans la Section 2.1.1 au début de ce chapitre.

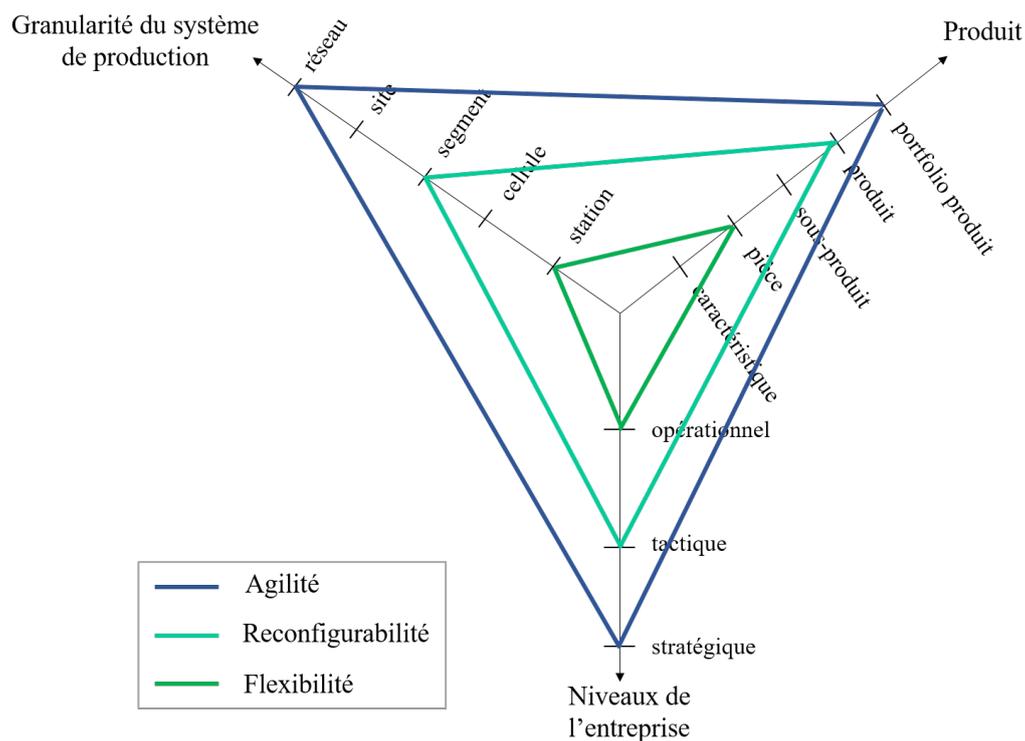


FIGURE 2.12 – Classes de changeabilité

Le niveau stratégique correspond à un horizon de décision supérieur à un an, lié aux problématiques de conception du système. De même, la caractéristique de l'agilité se rapporte à l'usine entière et décrit la capacité à se placer sur un nouveau marché, ce qui correspond à une problématique de conception. Le niveau tactique s'inscrit dans un horizon de quelques mois et permet de configurer le système pendant son cycle de fonctionnement. Le niveau opérationnel

est le pilotage du système de production à court terme pour les jours ou semaines à venir [Kle14]. Selon le niveau de reconfigurabilité de la ligne de production, la capacité de reconfigurabilité est donc tactique ou opérationnelle. La transformabilité, à travers des changements de structure est plutôt tactique tandis que la flexibilité intrinsèque au système permet des changements opérationnels à très court terme. Cependant, dans le cas d'un système dynamiquement reconfigurable en temps réel, il est possible que la reconfigurabilité s'inscrive dans l'axe opérationnel.

[Wie et al.07] ont proposé une structuration de l'usine en niveaux d'échelle de ressources, qui sont dans l'ordre croissant de périmètre : la station, la cellule, le segment, le site. Le réseau est l'ensemble des sites de l'entreprise reliés entre eux par des flux d'information et des flux logistiques. La modification du réseau implique la prise de décision de la modification éventuelle des lieux d'implantation, ce qui est une action stratégique. Le site se compose de plusieurs bâtiments et ateliers ou lignes de production, et leur modification à grande échelle reste dans le périmètre de la stratégie de l'entreprise. La reconfigurabilité, qui concerne la capacité à opérer un changement de production rapide, s'observe au niveau de la cellule, du segment de ligne et de la station de travail qui peuvent être composés de sous-ensembles modulaires afin d'être réagencés pour un changement de structure. La transformabilité couverte par la flexibilité se limite au périmètre de la station de travail.

En ce qui concerne le produit, on peut également placer l'agilité, la reconfigurabilité et la flexibilité à différentes échelles de la variabilité produit. La couverture d'une part de marché par un portfolio produit est stratégique, tandis que l'adaptation d'une ligne de production à la modification du produit, sous-produit ou bien d'une pièce constituant l'assemblage du produit est tactique. S'il s'agit seulement d'une différence de caractéristique (« feature ») entre deux produits sur la ligne alors il s'agit d'une capacité de flexibilité opérationnelle de l'installation.

Pour chaque niveau de décision, [Tol et al.19] définissent les objectifs du système adaptable. A court terme, au niveau opérationnel, le système doit pouvoir rester en fonctionnement en étant opérationnel. Sur le moyen terme, au niveau tactique, l'objectif est de définir des stratégies de régulation pour minimiser la conséquence des aléas sur la performance du système de production. Enfin sur le long terme, les auteurs soulignent la nécessité d'être capable de transformer les informations concernant le contexte économique turbulent en actions pro-actives pour être en mesure d'adapter rapidement la production au moment nécessaire, ce qui relève de l'agilité du système.

### 2.1.5.3 Conclusion

Le Tableau 2.1 résume et classifie les principes des RMS et RAS identifiés lors de la recherche bibliographique. Les travaux cités, présentés Section 2.1.4, peuvent à présent être classifiés selon le type de transformabilité et les niveaux de production présentés Sections 2.1.5.1 et 2.1.5.2.

Cette synthèse permet également de voir que les cas correspondent à la fois à des moyens d'usinage (manufacturing) et d'assemblage. Les outils de décision évoqués ici seront abordés au Chapitre 4. En ce qui concerne les domaines industriels des cas d'usage, on observe une forte présence de l'industrie automobile.

Publication	Type de transformabilité	Type de production	Niveau de production	Produit ou volume	Outil de décision	Cas d'usage
[Ara et al.00]	Reconfigurabilité	Assemblage	Segment de ligne		Holons	
[Lan et al.01]	Reconfigurabilité	Manufacturing et Assemblage	Outil	Produit et volume	Théorie des graphes	Assemblage moteurs V6 et V8
[Nyh et al.10]	Reconfigurabilité et Modularité	Manufacturing	Segment	Produit		
[Hu et al.11]		Manufacturing	Cellule	Famille de produit	Équilibrage de ligne	Industrie automobile
[Wan et al.13]	Capacité incrémentale	Manufacturing	Segment de ligne	Produit et volume	Optimisation (GA)	Implantation lignes machines CNC
[AlG et al.15]	Modularité	Manufacturing		Famille de produit	Cladistiques	iFactory
[Ade et al.16]	Reconfigurabilité	Manufacturing	Cellule	Produit	Simulation basée agent	Presse de pliage
[Fra et al.16]	Capacité de conversion	Manufacturing	Segment de ligne	Produit	Logique floue basée sur la probabilité d'évolution du produit	
[Gha et al.16]	Transformabilité	Manufacturing	Segment de ligne	Produit	Optimisation	
[Mic et al.16]	Reconfigurabilité	Assemblage	Segment de ligne	Produit	Simulation	Ferrage automobile
[Kor et al.17]	Reconfigurabilité	Manufacturing	Segment de ligne	Produit	Optimisation	
[Kor et al.17]	Reconfigurabilité	Assemblage	Segment de ligne	Produit	Équilibrage de l'implantation via optimisation	Équipementier automobile
[Zür et al.17]	Capacité incrémentale	Assemblage	Cellule	Volume	Simulation	Ferrage industrie automobile

Tableau 2.1 – Synthèse des systèmes reconfigurables

### 2.1.6 État de l'art des briques technologiques

La reconfigurabilité couvre un plus grand périmètre de transformabilité que la flexibilité. [Set et al.90] font les recommandations suivantes pour la conception d'un système flexible :

- Construire le système de production sur la base de petites unités qui peuvent être dupliquées,
- Avoir une infrastructure facilitant l'expansion du système de production,
- Concevoir le système de production afin qu'une expansion du système soit la plus simple possible.

[Haw et al.16] proposent une taxonomie des leviers clés de la reconfigurabilité, présentée Figure 2.13, s'appuyant sur les travaux de [Kor et al.99], aboutissant à des solutions techniques. Les concepts techniques découlent des outils clés primaires suivant un degré d'abstraction décroissant et une importance pratique industrielle progressive. Les outils primaires reprennent certaines caractéristiques de la reconfigurabilité définis par [Kor05] : on retrouve la modularité, la scalabilité, ainsi que l'universalité et la standardisation, qui permettent la modularité. A l'échelle de l'usine, les principes de conception sont la standardisation des zones de travail, la modularité des structures, les moyens de transport à capacité incrémentale et la mobilité des installations. La proposition de [Haw et al.16] est de couvrir ces besoins par une couverture accrue des surfaces par des ponts roulants afin d'assurer le transport des équipements de production et ainsi améliorer l'intégrabilité de nouveaux équipements, augmenter la mobilité en équipant les machines de roues et augmenter systématiquement la capacité des magasins afin de prévoir une éventuelle augmentation en volume.

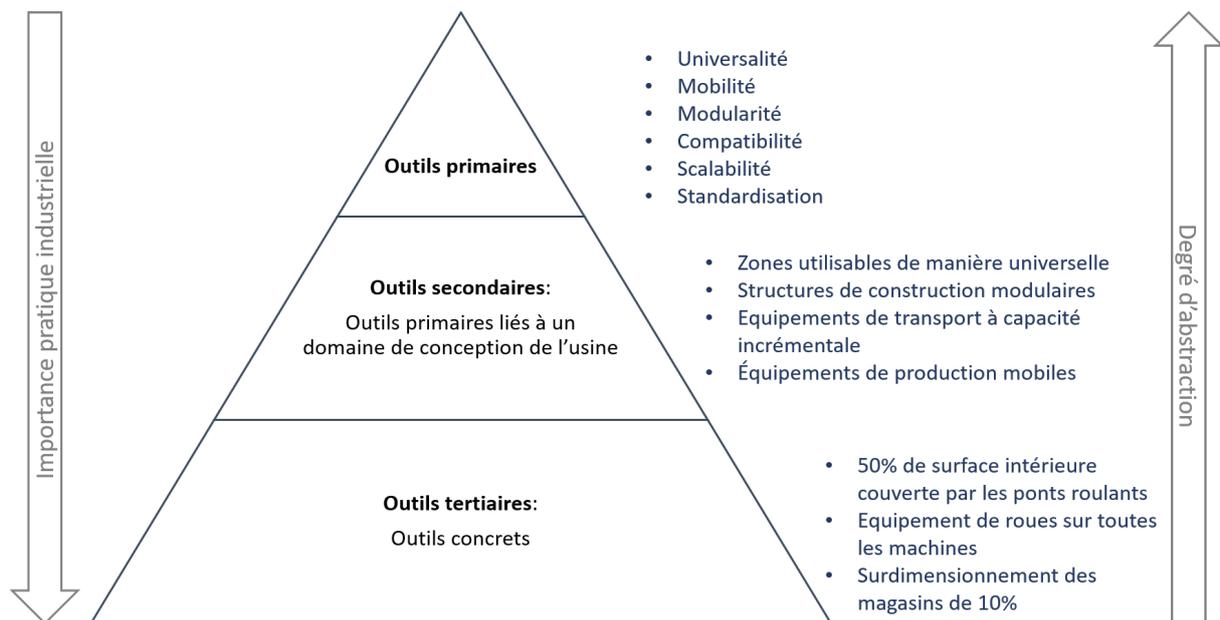


FIGURE 2.13 – Catégorisation des outils clés de la reconfigurabilité. Adapté de [Haw et al.16]

De même, [Nyh et al.10] soulignent les principes d'universalité, mobilité, capacité d'incrémentation, modularité, et compatibilité, à travers l'utilisation de machines et d'installations pouvant être reconfigurées avec peu d'efforts en peu de temps pour un travail spécifique. Les concepts mis en jeu sont les suivants :

- Machines simples à faible coût, composées de modules standards, pour les travaux très spécifiques sur un grand nombre de produits. Lors de changements de volume de produc-

tion, il suffit d'ajouter ou de retirer ces machines.

- Machines complexes mixtes combinant différentes technologies permettant l'usinage complet par combinaison de procédés, pertinent dans le domaine de l'usinage/la fabrication.
- Reconfigurabilité des interfaces : périphériques, préhenseurs, systèmes de mise en position.
- Simplification de la reprogrammation des machines ou robots ; Simplification de la transformation et de l'aménagement du hardware lors de la reconfiguration : concept « Plug and Produce ».
- Limite liée au manque de compatibilité logicielle, continuité des versions. Nécessité d'une flexibilité modulaire des commandes informatisées et des formats de données collectées pendant la production.

D'après [Nyh et al.10], de manière globale, les usines manquent fortement d'une transparence numérique qui permettrait un suivi des données concernant les produits et les machines elles-mêmes, informations qui sont indispensables afin de reconfigurer rapidement et efficacement un système existant. Enfin, [And et al.17a] soulignent la nécessité de réutiliser des composants déjà existants, ce qui permettrait de réduire le temps de transformation des lignes et ainsi les coûts.

### 2.1.7 Concepts retenus

Pour la démarche de conception du système reconfigurable, à partir de la bibliographie présentée dans le Tableau 2.1, trois axes ont été retenus : les **flux**, la **modularité** et la **mobilité**.

- Flux : Flux parallèles ou hybrides
- Standardisation et modularité :
  - Poste de travail modulaire standardisé
  - Interface standard
  - Outil flexible ou interchangeable
- Mobilité : AGV, Ressource déplaçable (opérateur ou robot)

En conclusion, la Section 2.1 a permis de définir les termes permettant de dénommer les nuances de la capacité d'un système de production à être transformé. La revue de la bibliographie sur les types de systèmes reconfigurables a permis d'identifier les briques technologiques prometteuses pour la suite des travaux.

La suite du chapitre se penche sur les moyens d'évaluer la reconfigurabilité d'un système de production. Après une revue de la bibliographie à ce sujet, nous exposerons les indicateurs développés dans le cadre de la thèse.

## 2.2 État de l'art des indicateurs de reconfigurabilité

Si les critères de performance des systèmes sont largement définis, ce n'est pas le cas pour l'évaluation de la reconfigurabilité et de la flexibilité des systèmes de production. Or, dans le cadre de l'évaluation du système de production, au regard de sa capacité à être transformé pour répondre à une demande changeante, il est nécessaire de disposer d'indicateurs permettant d'évaluer le système considéré à l'échelle de la ligne de production.

[Kor et al.99] montrent que le système reconfigurable peut être représenté sur un graphe, dont l'abscisse correspond à la diversité produit et l'ordonnée représente le volume (le volume correspond ici à la productivité du système). Au fur et à mesure des reconfigurations, les caractéristiques du système vont évoluer, avec pour objectif d'atteindre la productivité maximale ainsi qu'une variabilité la plus élevée possible. Ce graphe est présenté Figure 2.14.

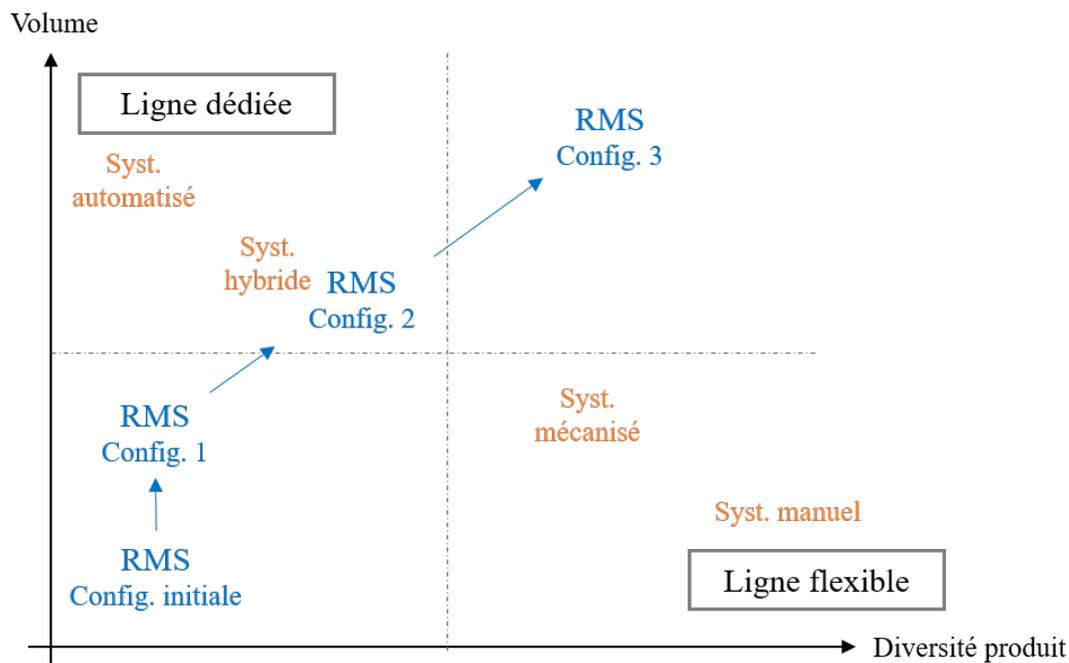


FIGURE 2.14 – Graphe capacité/Fonctionnalité des RMS selon l'étape de reconfiguration (adapté de [Kor et al.99])

### 2.2.1 Indicateurs qualitatifs

Dans le but d'évaluer la reconfigurabilité d'un système de production, une première possibilité est de soumettre un questionnaire à un panel d'experts afin de recueillir le niveau perçu de reconfigurabilité de la ligne dont ils ont la responsabilité.

[Mag et al.18] ont conduit une étude sur un panel d'une centaine d'entreprises portugaises. Pour cela, ils ont développé un questionnaire à questions fermées, évaluées sur une échelle de Likert (cf. questionnaire en Annexe A), structuré autour des caractéristiques de la reconfigurabilité. Les réponses ont permis de dresser un aperçu du niveau d'implémentation des caractéristiques de la reconfigurabilité au sein de ces entreprises. De cette manière, il est possible d'avoir un aperçu qualitatif du niveau de reconfigurabilité des lignes de production.

Au travers d'interviews construits à partir de questionnaires, [And et al.17c] ont construit une méthodologie de conception du RMS qui repose sur une participation de l'entreprise. La méthode a été appliquée à deux entreprises danoises, avec lesquelles des meetings réguliers ont été organisés afin de mener l'étude. Les besoins en reconfigurabilité et les limitations en terme de reconfigurabilité des lignes sont identifiés.

Ces deux approches, basées sur des questionnaires, ne donnent pas de mesure objective précise permettant de comparer différents systèmes de production entre eux. Cependant, les questionnaires développés par [Mag et al.18 ; And et al.17c] pourront être repris pour la "reconnaissance du terrain" en terme de reconfigurabilité. Ces analyses qualitatives peuvent permettre une découverte et une première analyse d'une installation à étudier, avant de passer à une évaluation à l'aide d'indicateurs quantitatifs.

[Hue et al.16] proposent des critères d'évaluation du système reconfigurable selon le niveau de production (segment, ligne ou poste de travail), et selon le domaine (ressources, organisation,

contrôle du système). Le Tableau 2.2 résume les critères qualitatifs d'évaluation du RMS présentés par les auteurs. Ces informations peuvent être collectées au cours d'interviews semblables aux interviews présentés dans la démarche de [And et al.17c], mais restent qualitatives. Leur défaut est de dépendre de l'appréciation de la personne qui porte le jugement, et de ne pas se référer à une échelle ou une unité précises. Par exemple, dans la colonne "Ligne" du Tableau 2.2, catégorie "Ressources techniques", un des critères proposés est la "Flexibilité du flux". Sans indication détaillée pour l'évaluation de ce critère, l'échelle de notation est laissée libre à l'interprétation. Ce manque de précision pose problème si l'on veut être en mesure de justifier les valeurs obtenues pour ces indicateurs.

[Rös et al.18] proposent d'évaluer les caractéristiques de la reconfigurabilité sur une échelle de quatre valeurs comprises entre 0 et 1, par jugement qualitatif de 10 personnes actives dans l'industrialisation. Pour chaque critère, une recherche bibliographique permet de définir les sous-critères associés ainsi que les paramètres ayant un impact sur ce critère. Par la suite, lors d'interviews, les personnes interrogées sont invitées à évaluer les caractéristiques de la reconfigurabilité du système existant dans l'entreprise. Les différents niveaux de reconfigurabilité distingués sont les suivants : aucune possibilité d'augmenter le niveau de reconfigurabilité, possibilité d'augmenter le niveau du critère avec un effort maximum, possibilité d'améliorer le critère avec peu d'efforts, et enfin niveau de reconfigurabilité élevé ne nécessitant pas d'amélioration sur ce critère. Les résultats obtenus sont approximatifs mais permettent de dresser une première ébauche de l'effort à fournir pour rendre la ligne reconfigurable. L'approche de [Rös et al.18] donne des résultats même si les participants ne sont pas familiers avec la notion de transformabilité de ligne, mais cette démarche nécessite d'être rendue plus précise.

## 2.2.2 Indicateurs quantitatifs

### 2.2.2.1 Indicateurs basés sur la performance

Dans un premier temps, on peut considérer que la reconfigurabilité est la capacité à être performant sur un ratio de mixte produit ou un volume changeant. Dans ce cas, une manière de mesurer la reconfigurabilité serait la capacité du système à rester performant avec une fréquence de changement de la demande en produits élevée. Une autre manière simple de mesurer la flexibilité d'un système est de mesurer la plage de variabilité, en volume ou en diversité de produit, couverte par l'installation, ce qui est représenté en abscisse sur la Figure 2.14. Si l'on considère la variabilité en volume, la largeur de la plage en volume couverte par le système de production renseigne le décideur sur la capacité du système à s'adapter à une augmentation ou une diminution du volume de la demande. En ce qui concerne les variations de ratio de mixte produit, une métrique peut être définie pour mesurer le nombre de familles de produits ainsi que le nombre de variantes couvertes au sein de chaque famille. Cependant, la flexibilité ne doit pas être mesurée uniquement selon l'intervalle de variations couvert et le nombre d'options de configurations disponibles, mais également selon le temps et le coût nécessaires au passage d'une configuration à une autre [Jai et al.13].

[Jai et al.13] proposent un état de l'art des techniques utilisées pour la mesure de la flexibilité, qu'ils définissent comme la capacité du système de production à s'adapter à l'incertitude du contexte économique. La mesure peut prendre la forme d'une formule, d'un algorithme ou d'une méthodologie, pour une approche quantitative, qui vise à obtenir une valeur numérique, ou qualitative.

Selon [Wey et al.11], la flexibilité en volume d'un système de production peut se mesurer soit de manière directe en obtenant la plage de variabilité couverte par le système comme décrit

précédemment, soit de manière indirecte en considérant la performance du système sur plusieurs volumes. Les auteurs développent deux indicateurs afin de mesurer la flexibilité de l'installation : le potentiel de flexibilité en volume  $pvf$  et le besoin de reconfigurabilité en volume  $rvf$ , représentés Figure 2.15. Cette figure illustre l'évolution de l'utilisation de la capacité du système en fonction du temps, qui permet de calculer  $pvf$  et  $rvf$ .

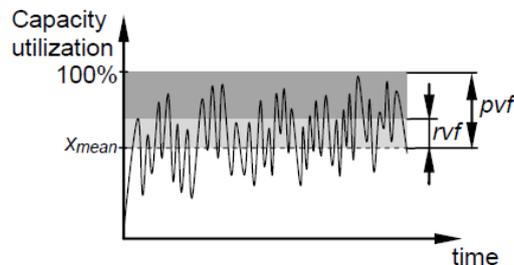


FIGURE 2.15 – Mesure de la capacité d'ajustement du système [Wey et al.11]

L'indicateur  $pvf$  représente la capacité d'un sous-ensemble du système à absorber une fluctuation du marché, se calculant à partir de  $n$  valeurs de la charge  $x_t$  du sous-ensemble (Équation 2.1). L'indicateur  $rvf$  est le degré d'utilisation de la capacité d'ajustement du système aux fluctuations, déterminé par les  $n$  valeurs de la charge  $x_t$  et de l'utilisation moyenne  $x_{mean}$  du sous-ensemble (Équation 2.2).

$$pvf = 1 - \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n x_t \quad (2.1)$$

$$rvf = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (x_t - x_{mean}) \quad \forall x_t > x_{mean} \quad (2.2)$$

Cependant, ces valeurs ne permettent pas de rendre compte de tous les aspects de la reconfiguration, comme le temps nécessaire pour passer d'une configuration du système à une autre. De plus, la distinction entre les familles produits et les variantes de produits sont subjectives en fonction du système, de l'industrie et de l'entreprise considérés. Il est donc nécessaire de choisir un moyen de mesurer la reconfigurabilité du système de production de manière plus robuste.

Le travail de [Hue et al.16], cité dans la section précédente, propose également des critères quantitatifs pour l'évaluation du système reconfigurable. Son approche, présentée dans le Tableau 2.3, correspond cependant plus à des critères de performance qu'à des critères de capacité de transformation en ce qui concerne les ressources à l'échelle de la station de travail, l'organisation à l'échelle du segment et de la ligne. En effet, les critères correspondent à des taux d'utilisation des ressources et cadence de production. En ce qui concerne les autres catégories, les critères cités peuvent permettre de rendre compte de la flexibilité ou de la reconfigurabilité du système de manière : type de solution technique pour le système de transfert et type de palette pour le produit, méthode d'approvisionnement de la ligne, divisibilité des process, traçabilité, etc. Ces indicateurs permettent d'évaluer la reconfigurabilité en fonction du niveau de production considéré.

Dans une approche de quantification de la flexibilité par détermination d'une fonction de transfert, par analogie avec un système mécanique, [Ale et al.07] déterminent un indicateur nommé *Fleximac* basé sur le temps de process comme donnée d'entrée et le temps de flux comme donnée de sortie du système. Selon les auteurs, l'indicateur *Fleximac* peut permettre de

	<b>Segment</b>	<b>Ligne</b>	<b>Poste de travail</b>
<b>Ressources techniques</b>		-type de système de transfert -flexibilité du flux -design du support produit	-type de système de manutention -approvisionnement
<b>Organisation</b>		-configuration -robustesse -surface utilisée -flux	-méthode d'approvisionnement
<b>Contrôle/ Ordonnancement</b>	-principe de planification -JIT/JIS -supervision du contrôle	-intégration/retrait de machines -contrôle des flux -supervision de l'état	-standardisation du process -traçabilité -intégration/retrait de modules

Tableau 2.2 – Critères d'évaluation des RMS qualitatifs (adapté de [Hue et al.16])

	<b>Segment</b>	<b>Ligne</b>	<b>Poste de travail</b>
<b>Ressources</b>			-taux d'utilisation des ressources -taux de changement d'outil
<b>Organisation</b>	-utilisation de la capacité -efficacité de la zone -taille des stocks	-makespan -taux d'utilisation -surface utilisée	-temps de cycle -divisibilité des process

Tableau 2.3 – Critères d'évaluation des RMS quantitatifs (adapté de [Hue et al.16])

comparer des systèmes de production différents soumis à une même excitation de l'environnement extérieur, c'est-à-dire une même demande de production. La valeur obtenue révèle la sensibilité du système aux sollicitations, et donc sa capacité à être transformé : moins il est sensible, plus il est flexible.

[Kap et al.18] mesurent l'efficacité du RMS à travers la performance du système de production. Pour cela, ils définissent le niveau de flexibilité potentielle du système comme la diversité de réactions du RMS divisée par le temps d'utilisation des ressources ; et le niveau de flexibilité comme le niveau réel de variabilité du système versus le lead time. Les auteurs définissent également un indicateur se rapportant au temps de changement entre deux configurations. Cependant, l'article ne présente pas d'application concrète des indicateurs à un cas d'usage, ce qui rend leur réutilisation difficile.

En se basant sur la disponibilité des machines, [Fra et al.20] définissent la flexibilité du système de production comme étant le quotient d'une grandeur relative à la disponibilité de chaque machine, en prenant en compte le temps de reconfiguration, et d'une grandeur relative à la disponibilité de toute la ligne de production en considérant le temps de reconfiguration. Plus l'indice est élevé, plus la ligne est flexible. Cet indicateur leur permet de confirmer l'augmentation de la reconfigurabilité d'un système de production en y intégrant des ressources mobiles robotisées.

Afin d'évaluer différents scénarios de production et la pertinence de la configuration des ressources du système, [Gyu et al.12] développent un indicateur de reconfigurabilité. Celui-ci montre l'efficacité de la ligne d'assemblage reconfigurable, en complément de résultats de performance obtenus par simulation à événements discrets. L'indicateur prend en compte le temps de setup, le temps de process, et le contenu de travail relatif de chaque ligne. Cette méthode permet de choisir la configuration d'une ligne d'assemblage. Les auteurs concluent à une corrélation entre le makespan nécessaire à la réalisation d'un scénario et l'indicateur proposé, ce qui les amène à suggérer que cet indicateur peut se soustraire aux simulations. Cet aspect est très intéressant étant donné le temps important nécessaire à la construction d'un modèle de simulation complexe. Cependant, si l'indicateur se soustrait à la simulation alors il n'apporte pas de valeur ajoutée en terme d'évaluation de la reconfigurabilité, et correspond bien simplement à une évaluation de la performance du système dans les conditions du scénario à évaluer.

### 2.2.2.2 Indicateurs basés sur les critères de reconfigurabilité

En s'appuyant, tout comme [Rös et al.18], sur les caractéristiques de reconfigurabilité, [Wan et al.17] définissent une méthode de calcul des six caractéristiques de la reconfigurabilité définies par [Kor05]. En s'appuyant sur le nombre de modules que contient le système, le temps nécessaire afin de passer d'une configuration à une autre, la plage de variabilité couverte, et d'autres facteurs, [Wan et al.17] présentent un modèle pour évaluer numériquement la customisation, la scalabilité, la convertibilité, la modularité, l'intégrabilité, ainsi que la capacité de diagnostic d'une ligne d'usinage. Sa méthode donne donc des valeurs quantitatives, plus précises que l'évaluation qualitative réalisée par [Rös et al.18]. Il serait très intéressant de partir de ce modèle pour l'appliquer à un cas d'assemblage, ainsi que de définir une méthode d'agrégation de ces critères afin d'éviter de comparer simultanément six critères entre différentes implantations ou configurations.

[Mit et al.14] évaluent la complexité d'une reconfiguration à l'aide d'un indicateur unique, l'effort de reconfiguration (RE), calculé à partir du nombre de modules à ajouter ou déplacer dans le système de production pour réaliser la reconfiguration. Cet indicateur, qui doit être le

Tableau 2.4 – Comparaison des indicateurs de reconfigurabilité

Référence	qualitatif	quantitatif	basé performance	basé sur les critères de reconf.	RMS	RAS
[Mag et al.18]	X		X		X	X
[And et al.17c]	X		X		X	X
[Hue et al.16]	X	X	X		X	X
[Rös et al.18]	X			X	X	X
[Wey et al.11]		X	X		X	X
[Ale et al.07]		X	X		X	X
[Kap et al.18]		X	X		X	
[Fra et al.20]		X	X		X	X
[Gyu et al.12]		X	X			X
[Wan et al.17]		X		X	X	
[Mit et al.14]		X			X	
<b>[Bea et al.20a]</b>		<b>X</b>		<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>

plus bas possible, permet d'aider la décision pour le choix d'une séquence de produits, lorsque l'ordre d'arrivée des produits impacte directement des reconfigurations des installations.

A travers un état de l'art sur les RMS, [Bor et al.18] identifient les axes de recherche nécessitant d'être approfondis concernant les RMS : la définition d'une méthode de validation du système reconfigurable et un indicateur de référence. En effet, il est nécessaire d'établir une référence de comparaison pour l'évaluation de la reconfigurabilité d'un système, à travers une méthode de décision multi-critères la plus objective et rigoureuse possible afin de pouvoir l'appliquer à de multiples cas d'usage. Les auteurs soulignent la nécessité de disposer d'un indicateur précis et quantitatif de reconfigurabilité du système de production.

### 2.2.3 Bilan de l'état de l'art

Ce chapitre a présenté des indicateurs de reconfigurabilité variés, afin d'aider la conception et le réglage des systèmes de production reconfigurables. Le tableau 2.4 résume les indicateurs cités précédemment et les classe selon leur aspect qualitatif, quantitatif, construits à partir d'indicateurs de performance ou de reconfigurabilité, et leur applicabilité à l'évaluation du RMS ou du RAS. Nous avons vu précédemment que les indicateurs qualitatifs manquent de précision dans le cadre d'une démarche à destination des industriels. Concernant les indicateurs de reconfigurabilité quantitatifs basés performance, l'analyse de la bibliographie a permis de relever des indicateurs précis et facilement calculables. Cependant, le choix de mesurer la reconfigurabilité d'un système à travers sa performance est critiquable. En effet, il semble possible d'améliorer la reconfigurabilité d'un système tout en baissant le niveau de productivité du système, ce que ces indicateurs ne permettent pas de mettre en lumière. Les six caractéristiques de la reconfigurabilité définies par [Kor et al.10] étant largement reconnues et partagées par la communauté scientifique étudiant les RMS, la proposition de [Wan et al.17] de construire des indicateurs de reconfigurabilité à partir de ces six caractéristiques semble particulièrement pertinente. A partir des travaux de [Wan et al.17] que nous avons enrichis, nous proposons des indicateurs quantitatifs, prenant en compte les critères de reconfigurabilité, et applicables au système d'assemblage [Bea et al.20a].

## 2.3 Indicateurs de reconfigurabilité

Afin d'aider les décideurs à connaître le degré de facilité de transformation de leur système de production à l'aide d'indicateurs quantitatifs, des indicateurs de reconfigurabilité sont requis. Comme décrit dans la section 2.2, les indicateurs présents dans la littérature ne sont pas satisfaisants au regard de leur précision et de leur applicabilité à un système d'assemblage. En s'appuyant sur les indicateurs définis par [Wan et al.17], conçus pour mesurer la reconfigurabilité d'un système de manufacturing (machines d'usinage), six nouveaux indicateurs sont développés dans ce travail de thèse pour calculer la capacité incrémentale, ou *scalabilité*, la *convertibilité*, la *modularité*, l'*intégrabilité*, la *customisation*, et la *capacité de diagnostic*. En comparaison avec le travail de [Wan et al.17], les formules de calcul des indicateurs sont partiellement ou totalement changées afin d'être applicables aux systèmes d'assemblage, mais peuvent toujours être employées pour mesurer la reconfigurabilité des RMS.

La *capacité de diagnostic* n'a pas été conservée pour mesurer la reconfigurabilité dans cette étude et peut être calculée directement à partir de la formule proposée par [Wan et al.17]. Pour la suite des travaux, cet indicateur n'est pas employé. Au contraire de la convertibilité, de la capacité incrémentale, et de la customisation, la capacité de diagnostic ne fait pas partie des caractéristiques-clés critiques de la reconfigurabilité [Kor05 ; Nap et al.18]. Par ailleurs, les caractéristiques du diagnostic, comme le nombre de capteurs servant au diagnostic sur la ligne ou la précision des tests de qualité et le ratio de produits passés au test de qualité, sont en dehors du périmètre des modèles de systèmes de production employés ici.

Le calcul des indicateurs est présenté par [Bea et al.20a] et les indicateurs sont détaillés dans les sections suivantes. Pour chacun, plus l'indicateur sera élevé et proche de 1, meilleur sera le taux de reconfigurabilité. En revanche, un indicateur proche de 0 montrera la difficulté à transformer un système de production construit à partir de cette brique technologique.

### 2.3.1 Scalabilité

La scalabilité est définie dans la littérature comme la plus petite incrémentation possible en terme de volume, en nombre de produits [Wan et al.13]. Ainsi, un système non reconfigurable ayant une capacité de production d'un volume de  $V$  produits par an, aurait une scalabilité égale à ce volume  $V$ , car il n'est pas possible d'avoir un incrément inférieur en terme de volume. Cependant, cette définition ne permet pas de prendre en compte le temps nécessaire à reconfigurer le système, ni le coût engendré. Or par définition, transformer un système reconfigurable doit être rapide, incrémental et peu coûteux [Cer et al.20].

C'est pourquoi nous avons souhaité développer un indicateur qui couvre ces notions. Une des difficultés est de prendre en compte le ratio Temps de reconfiguration/Takt time qui varie très fortement entre un système fixe et un système reconfigurable. Le temps de reconfiguration est l'intervalle de temps entre l'arrêt de la production et le redémarrage (début du ramp-up) de la ligne après transformation.

L'indicateur  $S$  que nous proposons pour mesurer la *scalabilité* du système s'exprime comme le produit entre un facteur représentant la plage de reconfiguration et la taille de l'échelon d'incrément en volume, des facteurs de temps et coût, et un paramètre correspondant au nombre de modules ajoutés dans le système pour réaliser l'incrément. Pour des raisons de simplicité, l'indicateur présenté ici correspond au cas d'une augmentation en volume, ce qui explique que seuls les modules ajoutés soient pris en compte dans le calcul de la scalabilité.

$S$  est composé des paramètres suivants :  $\lambda_T$ ,  $\lambda_C$ , et  $\alpha$ , définis respectivement par les équations

tions (2.3), (2.4), and (2.5). Dans ces expressions,  $T_{cycle}$  correspond au temps de cycle après reconfiguration,  $T_{reconf}$  est le temps de reconfiguration nécessaire afin de réaliser l'échelon de reconfiguration  $\Delta$ ,  $C_c$  est le coût de la construction du système si la ligne était construite à partir d'un atelier vide au lieu d'une reconfiguration,  $C_r$  est de coût de reconfiguration,  $N_r$  est le nombre de ressources ajoutées et  $N$  correspond au nombre de ressources avant reconfiguration. Enfin, l'équation (2.6) donne la valeur finale de la scalabilité.

$$\lambda_T = 1 + 0.1 \ln\left(\frac{T_{cycle}}{T_{reconf}}\right) \quad (2.3)$$

$$\lambda_C = 1 - \frac{C_r}{C_c} \quad (2.4)$$

$$\alpha = \frac{N_r}{N} \quad (2.5)$$

Enfin,

$$S = \frac{\Delta_{max} - \Delta_{min}}{\Delta} \lambda_T \lambda_C \alpha \quad (2.6)$$

Plus l'indicateur de capacité incrémentale  $S$  est élevé, plus il sera aisé d'augmenter ou diminuer la capacité de production du système en volume.

### 2.3.2 Convertibilité

La *convertibilité* est définie comme la capacité du système à basculer rapidement entre la production de différents produits au sein d'une même famille de produits ou entre familles de produits [Wan et al.17]. D'après les auteurs, la convertibilité peut être calculée en combinant la convertibilité entre variantes de produits au sein d'une même famille, et la convertibilité entre familles de produits. Les coefficients  $\omega_1$  et  $\omega_2$ , associés respectivement à la convertibilité au sein d'une famille et entre familles de produits, sont tous les deux fixés à 0,5.

[Wan et al.17] ont défini deux indicateurs distincts pour la convertibilité dans une même famille et la convertibilité entre familles produits. Ainsi, il est possible de renseigner des montants différents pour le coût de la reconfiguration. Plus les produits diffèrent, ce qui est accentué s'ils n'appartiennent pas à la même famille, plus le coût de reconfiguration sera élevé.  $C_1$ , défini par l'équation (2.7), correspond à la convertibilité du système au sein d'une famille.  $N_p$  est le nombre de produits au sein d'une famille,  $2N_p - 1$  le nombre de conversions entre produits, et  $N_t$  le nombre de machines/postes nécessitant un changement d'outil ou de ressource.

$$C_1 = \frac{2N_p - 1}{N_t} \quad (2.7)$$

$S_c$ , établi par l'équation (2.8), représente le coefficient de similarité entre familles de produits.  $C_2$ , défini par l'équation (2.9), correspond au coefficient de convertibilité entre familles de produits, et  $N_w$  au nombre de postes de travail qui doivent être ajoutés ou retirés pour la conversion du système d'une famille à l'autre.

$$S_c = \frac{N_{ij}}{x_i + y_i + N_{ij}} \quad (2.8)$$

$N_{ij}$  : nombre de postes de travail utilisés pour les deux produits  $i$  et  $j$

$x_i$  : nombre de postes de travail servant uniquement pour le produit  $i$

$y_i$  : nombre de postes de travail servant uniquement pour le produit  $j$

$$C_2 = \frac{S_c}{N_w} \quad (2.9)$$

La convertibilité du système complet peut être calculée grâce à l'équation (2.10).

$$C_v = \omega_1 \frac{2N_p - 1}{N_t} + \omega_2 \frac{S_c}{N_w} \quad (2.10)$$

Plus l'indicateur de convertibilité  $C_v$  est élevé, plus il est aisé de basculer la production d'un produit à l'autre.

### 2.3.3 Modularité

La *modularité* correspond à la propriété du système à être divisé entre sous-unités et à en intégrer de nouvelles. L'équation (2.11) présente le calcul de la modularité du système, où  $G_i$  correspond à la granularité modulaire du  $i$ -ème poste de travail,  $N_{ij}$  est le nombre d'interfaces entre le  $j$ -ème module du  $i$ -ème poste de travail et la ligne,  $N_{kl}$  représente le nombre d'interfaces au niveau du système après la  $k$ -ème reconfiguration, et  $G_k$  est la granularité modulaire de la  $k$ -ème reconfiguration.

$$M = \omega_1 \frac{G_i}{N_{ij}} + \omega_2 \frac{G_k}{N_{kl}} \quad (2.11)$$

Plus l'indicateur de modularité  $M$  est élevé, plus le système d'assemblage a une capacité modulaire élevée.

Les valeurs des granularités modulaires du poste et de la reconfiguration sont définies dans les tableaux 2.5 et 2.6.  $G_i$  et  $G_k$  sont compris entre 0 et 1. Plus la valeur de la granularité du poste de travail  $G_i$  est élevée, plus la granularité sur la ligne de production est fine. De manière analogue, une valeur de la granularité de reconfiguration  $G_k$  élevée indiquera la possibilité de reconfigurer le système au niveau d'une maille fine du système de production.

Tableau 2.5 – Granularité du poste de travail

Division modulaire	Valeur de $G_i$
aucune	0
poste de travail	0.3
ressource	0.5
outil	0.7
module d'outil	0.9

Tableau 2.6 – Granularité de reconfiguration

Division modulaire	Valeur de $G_k$
aucune	0
réseau d'usines	0.2
flux des produits	0.4
ligne modulaire	0.6
changement de ressource	0.8
changement d'outil	1

### 2.3.4 Intégrabilité

L'*intégrabilité* correspond à la capacité à inclure sur la ligne de nouveaux composants à l'aide d'interfaces adaptées. [Wan et al.17] définissent l'intégrabilité à l'aide des équations (2.12), (2.13) et (2.14), qui n'ont pas été modifiées dans nos travaux.  $P$  est le nombre de machines-outil (postes d'assemblage dans notre cas d'étude),  $N_i$  est le nombre de modules que contient le  $i$ -ième poste de travail,  $\omega_1$  et  $\omega_2$  sont respectivement les pondérations des paramètres d'ajustement des installations et des programmes informatiques (fixés à 0,5),  $T_j^h$  est le temps d'installation et de réglage des équipements physiques, et  $T_j^s$  le temps d'installation et de réglage du logiciel du  $j$ -ème module du  $i$ -ème poste de travail.

$$\alpha_j = -0.1 \ln(T_j^h) + 1 \quad (2.12)$$

$$\beta_j = -0.08 \ln(T_j^s) + 1 \quad (2.13)$$

$$I = \sum_{i=1}^P \sum_{j=1}^{N_i} (\omega_1 \alpha_j + \omega_2 \beta_j) \quad (2.14)$$

Plus la valeur de l'intégrabilité  $I$  est élevée, plus le système a une bonne capacité à accueillir de nouveaux composants.

### 2.3.5 Customisation

La *customisation* permet d'évaluer la facilité de passer de la production d'un produit à un autre grâce à la sélection d'éléments appropriés du système [Wan et al.17]. La customisation  $C_m$  peut être calculée grâce à la formule (2.15), où  $P$  est le nombre de types de produits dans une famille,  $T_{cycle}$  correspond au temps de cycle,  $T_{reconf}$  au temps de reconfiguration,  $N_i$  est le nombre de postes de travail nécessaires pour le  $i$ -ième produit, et  $N$  est le nombre total de postes sur la ligne.

$$C_m = (1 + 0.1 \ln \frac{T_{cycle}}{T_{reconf}}) \sum_{i=1}^P \frac{1}{P} \frac{N_i}{N} \quad (2.15)$$

Un indicateur  $C_m$  élevé montre une facilité de conversion entre types de produits.

### 2.3.6 Capacité de diagnostic

La *capacité de diagnostic*  $D$  correspond à la rapidité de détermination d'une panne sur le système ou d'un défaut de qualité et de sa cause racine. L'objectif est de réduire le temps de ramp-up après une phase de reconfiguration.

Le calcul de  $D$  est présenté dans la Formule 2.16, où  $N^{d0}$  est le nombre total de postes de travail après la reconfiguration,  $N^d$  est le nombre de capteurs sur la ligne contrôlant la qualité des produits après la reconfiguration,  $N^{s0}$  est le nombre de produits assemblés,  $N^s$  le nombre de produits prélevés sur la ligne après la reconfiguration pour être soumis à des tests de qualité,  $T^p$  le temps de cycle et  $T^r$  le temps de ramp-up après la reconfiguration.

La capacité de diagnostic est calculée après chaque reconfiguration, et plus la valeur de  $D$  est élevée, meilleure est capacité de diagnostic.

$$D = \frac{N^{d0} N^{s0} T^p}{N^d N^s T^r} \quad (2.16)$$

Contrairement aux autres indicateurs de reconfigurabilité,  $D$  n'est pas normalisé, et ne sera pas utilisé dans l'application numérique présentée dans nos travaux. En effet, nos modèles ne prennent pas en compte la présence des capteurs permettant de contrôler la qualité, ni la taille des échantillons testés. Sans données numériques viables, nous ne présenterons pas de valeurs numériques pour cet indicateur.

### 2.3.7 Pondération et agrégation des indicateurs

A ce stade de l'évaluation de la configuration du système de production au regard de la reconfigurabilité, le décideur dispose de cinq valeurs pour la reconfigurabilité. Les résultats, normalisés, peuvent être représentés sous la forme d'un diagramme radar afin de permettre une lecture rapide du degré de reconfigurabilité de la solution. Le décideur pourra mettre en regard des indicateurs de performance et de coûts. Dans le but de l'aider dans ce processus, nous lui proposons une comparaison objective non-biaisée entre les indicateurs de reconfigurabilité.

L'analyse par hiérarchie multicritère (AHP), introduite par [Saa80], permet l'aide à la décision dans un environnement multi-critères. Cette méthode permet de diminuer les biais dans la classification des critères. La proposition de Saaty est, dans le cas de problèmes complexes, de hiérarchiser les alternatives en fonction des critères partagés. Chaque alternative est comparée avec une autre alternative au regard d'un critère partagé. Dans notre cas, nous avons un unique critère, la reconfigurabilité, et les alternatives que nous allons comparer deux à deux sont la modularité, l'intégrabilité, la customisation, la convertibilité, la scalabilité, et la capacité de diagnostic ("diagnosabilité").

Au cours du processus de conception du RMS ou RAS, les décideurs seront invités à classer les critères par ordre d'importance au regard de la reconfigurabilité. Les critères sont comparés par paire selon une échelle allant de 1, si les deux critères ont une importance identique, à 9 si l'un a une forte prévalence sur l'autre. Pour cette étude, nous avons utilisé l'outil d'AHP développé par [Goe13], qui inclut une vérification de la cohérence de la solution. La Figure 2.16 montre un extrait de la matrice d'évaluation : la modularité est comparée successivement à l'intégrabilité, la customisation, la convertibilité, la scalabilité et la diagnosabilité.

Une fois les valeurs renseignées pour chaque paire de critères, on obtient un poids  $\omega$  mesurant l'importance de chaque caractéristique de la reconfigurabilité.

		Criteria		more important ?	Scale
i	j	A	B	A or B	(1-9)
1	2	Modularité	Intégrabilité		
1	3		Customisation		
1	4		Convertibilité		
1	5		Scalabilité		
1	6		Diagnosabilité		
1	7				
1	8				

FIGURE 2.16 – Analyse AHP : Comparaison des critères

Ces résultats apportent un éclairage de trois manières :

- indiquer aux décideurs les axes à privilégier dans l’implémentation de la reconfigurabilité sur le système de production étudié
- pondérer les valeurs des indicateurs de reconfigurabilité du système de production obtenues grâce aux formules présentées Section 2.3
- construire un indicateur unique pour mesurer la reconfigurabilité  $R$  du système, par pondération des valeurs des indicateurs par les résultats de l’analyse AHP, puis somme des indicateurs pondérés (Equation 2.17).

$$R = \omega_S.S + \omega_{C_v}.C_v + \omega_M.M + \omega_I.I + \omega_{C_m}.C_m + \omega_D.D \quad (2.17)$$

$\omega_S$  : poids de la capacité incrémentale (scalabilité)  $S$

$\omega_{C_v}$  : poids de la convertibilité  $C_v$

$\omega_M$  : poids de la modularité  $M$

$\omega_I$  : poids de l’intégrabilité  $I$

$\omega_{C_m}$  : poids de la customisation  $C_m$

$\omega_D$  : poids de la capacité de diagnostic

Suivant l’objectif de l’étude faisant l’objet de l’emploi des indicateurs : conception d’un système à partir d’une feuille blanche, transformation d’un système fixe en système reconfigurable, augmentation des capacités d’un système flexible, etc. ; la pondération d’un décideur ou d’un autre peut être privilégiée. Par exemple, dans le cas où les flux seraient remis en cause, il serait pertinent de favoriser la vision du responsable logistique/flux, et dans le cas d’une transformation de la capacité afin de répondre à un nouveau besoin, il est intéressant de prendre en compte la pondération du responsable amélioration continue.

## 2.4 Conclusion

Dans ce chapitre, les termes-clés de la transformabilité et les paradigmes de systèmes de production ont été définis. En s’appuyant sur une étude de la bibliographie, les composantes structurelles des systèmes reconfigurables ont été identifiées et les systèmes rencontrés lors de la lecture de la bibliographie classés. A partir de cette étude, les briques technologiques clés du système reconfigurable à implémenter dans notre démarche de conception ont été identifiées.

Par la suite, un état de l’art des moyens de mesurer la capacité de transformation d’un système a été effectué. De nouveaux indicateurs ont été définis, et employés pour noter la reconfigurabilité des briques technologiques identifiées précédemment. Nous avons également proposé

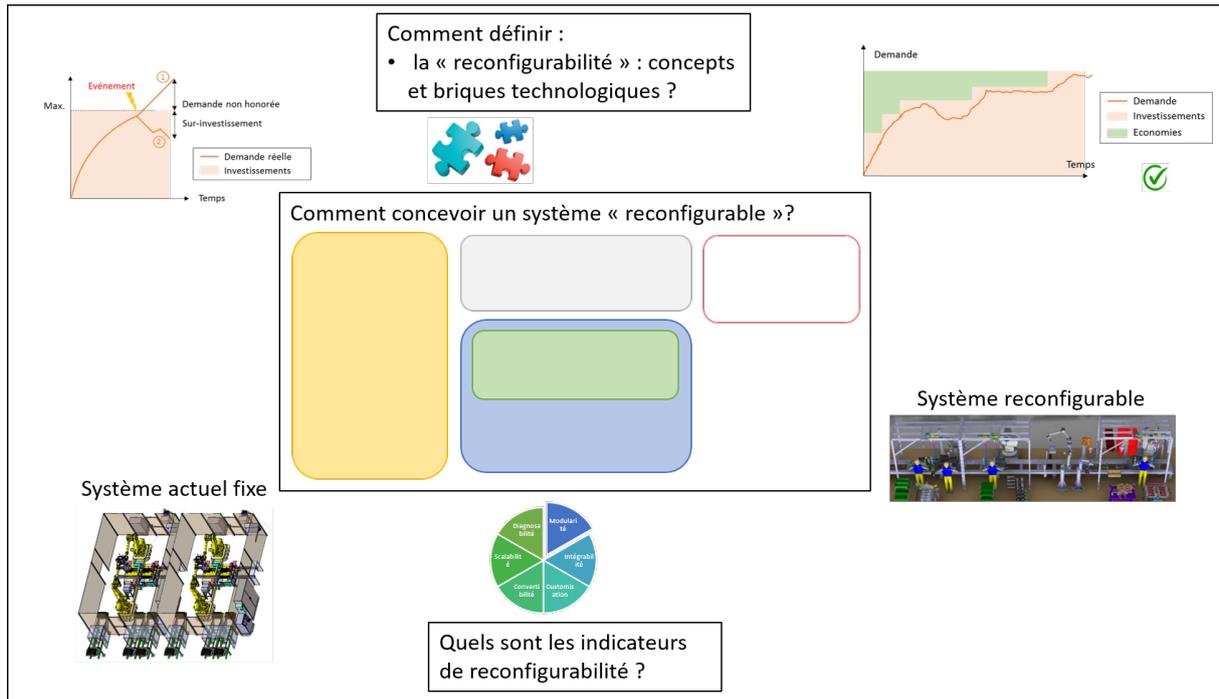


FIGURE 2.17 – Bilan du Chapitre 2

une méthode de calcul d'un indicateur de reconfigurabilité unique, à partir des indicateurs calculés en amont.

Le périmètre et les moyens de mesurer la reconfigurabilité étant définis, le chapitre suivant se concentre sur la démarche de conception des systèmes reconfigurables, ce que résume la Figure 2.17.



## Chapitre 3

# Méthodologie de conception du RMS

### Sommaire

---

<b>3.1</b>	<b>État de l’art des démarches de conception des systèmes reconfigurables . . . . .</b>	<b>48</b>
3.1.1	Démarches globales . . . . .	48
3.1.2	Stratégies de reconfiguration . . . . .	51
3.1.3	Limites et positionnement de la thèse . . . . .	53
<b>3.2</b>	<b>Démarche proposée . . . . .</b>	<b>53</b>
3.2.1	Identifier le besoin en reconfigurabilité . . . . .	54
3.2.2	Modéliser le système . . . . .	56
3.2.3	Détermination de la configuration . . . . .	56
3.2.4	Reconfigurer le système . . . . .	57
<b>3.3</b>	<b>Conclusion . . . . .</b>	<b>58</b>

---

Ce chapitre définit une démarche générique pour la conception du système de production reconfigurable. Dans un premier temps, une revue de la bibliographie sur les méthodes de design des systèmes de production et systèmes reconfigurables est présentée. Une méthode originale est ensuite proposée sous forme de quatre grandes étapes séquentielles, comme présenté Figure 3.1.

En partant du système actuel fixe, l’objectif est d’arriver à un système adapté à la demande du marché et rapidement reconfigurable. Le système de production constitue l’objet d’étude. Les caractéristiques de la démarche à définir sont la structuration des étapes, les outils employés et les parties prenantes. La performance de la démarche dépend de la capacité à obtenir un optimum global concernant le réglage du système de production, et la possibilité du monde industriel de s’approprier et appliquer la démarche.

Les outils employés seront présentés au Chapitre 4, et la méthode sera appliquée à un cas d’usage industriel au Chapitre 5.

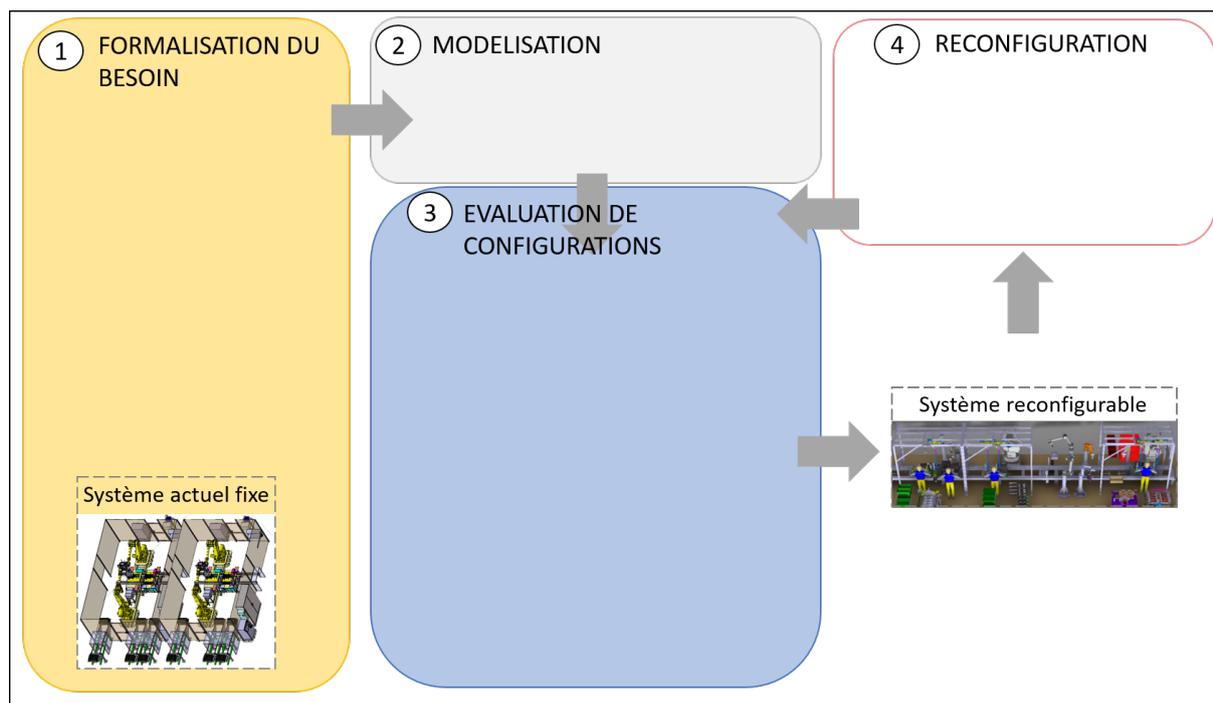


FIGURE 3.1 – Chapitre 3 : Démarche de conception du RMS

### 3.1 État de l'art des démarches de conception des systèmes reconfigurables

#### 3.1.1 Démarches globales

Le design d'un système de production, qu'il soit fixe ou transformable, s'articule autour de quatre étapes fondamentales : l'analyse du besoin et la clarification de la tâche de conception, puis la conception fonctionnelle, suivie de la conception physique, et enfin la définition du processus détaillé (programmes machines, etc.) [Ben et al.14; And et al.17b]. Néanmoins, la différence entre la conception du DMS et du RMS réside dans la prise en compte, dans le cas du système reconfigurable, de l'évolution du portfolio de produits, et la nécessité de transformations rapides du système dans le futur.

La démarche de [Ben et al.14], applicable à la conception d'un RMS ou d'un RAS, est présentée figure suivante (Figure 3.2).

La première activité du processus de conception est l'analyse des besoins, qui permet l'analyse et la prise en compte du contexte dans lequel se place le design du système de production. Cette étape permet de définir les exigences afin de procéder à la conception fonctionnelle. [Ben et al.14] proposent en effet une décomposition entre la définition des composants, et la définition de l'architecture fonctionnelle, qui correspond à l'agencement des composants modulaires fonctionnels sélectionnés, et les composants physiques. Cette phase fait appel à des outils de matrice de couplage (DSM : Dependency Structure Matrix) ou des méthodes de classification comme la conception axiomatique. Si besoin, il peut y avoir un processus itératif à ce niveau, avec un retour à la définition des composants fonctionnels. Il est ensuite possible de se concentrer sur la conception de l'architecture physique, ce qui permet de faire le lien entre les solutions fonctionnelles et physiques. Les moyens employés afin de trouver la solution idéale optimisée peuvent

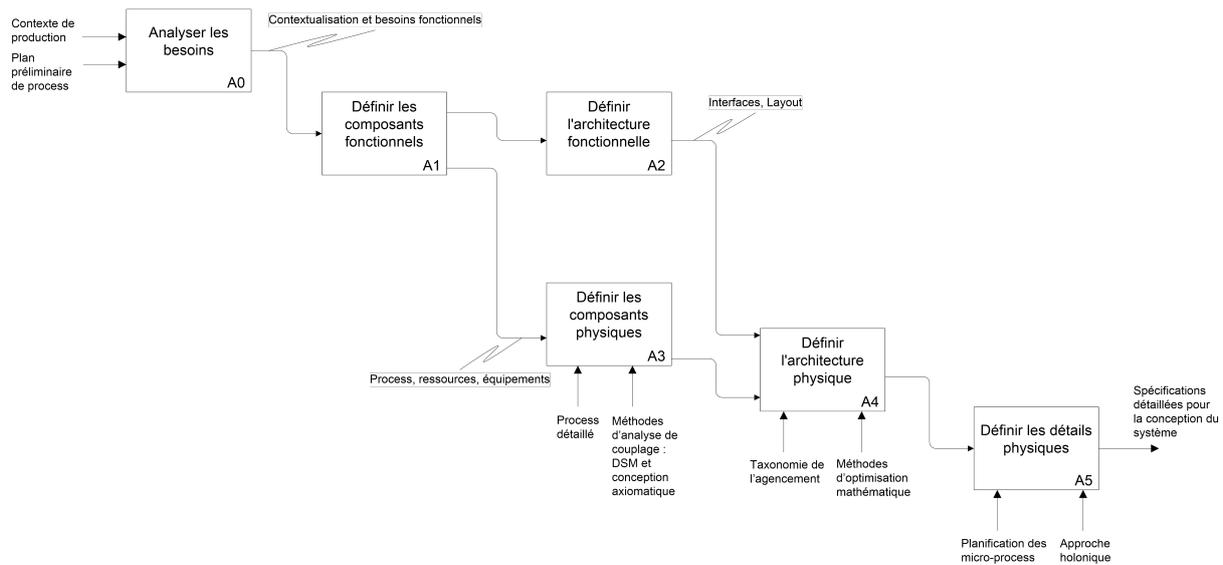


FIGURE 3.2 – Processus de conception du système de production. Adapté de [Ben et al.14]

prendre la forme d'une optimisation mathématique des sous-problèmes, comme la planification du process pour un type de machine, le layout, etc., ou une méthode de taxonomie des solutions. Enfin, le processus A5 Figure 3.2 correspond à la conception détaillée du processus de fabrication, au niveau opérationnel et à l'échelle de la machine, comme la définition des instructions et paramètres nécessaires à l'opération de la commande.

Le processus de conception d'un système de production reconfigurable se distingue de la conception d'un système classique par la prise en compte de la durée de vie du système sur le long terme, ainsi que la considération du portfolio produit actuel et futur. La conception comprend la définition des outils, des machines, de l'implantation, et de la commande du système.

Deux approches sont possibles : la conception à partir de la page blanche, nécessitant de définir tous les éléments mais permettant une grande liberté de conception ; ou bien la conception à partir d'un système existant, entraînant une transformation du système. En réalité, la première démarche est rare car la reconception à partir de l'existant permet de ne pas réinvestir entièrement dans des systèmes neufs, ce qui serait plus coûteux. Cependant, la conception à partir de la feuille blanche fait sens dans le cas d'une nouvelle entreprise, ou dans le cas de la conception d'un système de production pour un produit innovant [And et al.17b], et permet une plus grande liberté en terme de sélection des ressources et choix du layout. La transformation d'un DMS ou FMS en RMS implique des limites en ce qui concerne la compatibilité physique et logicielle des nouveaux équipements avec les machines et systèmes de contrôle déjà présents sur la ligne. Dans les deux cas, les activités et les décisions liées au processus de conception sont similaires. Les décisions portent principalement sur la définition de la fonctionnalité et la capacité du système [Wu92].

Dans un deuxième article, les auteurs se penchent sur un cadre d'aide à la décision pour la conception du système reconfigurable [Ben et al.15]. Ils proposent un système expert qui met en relation la sélection d'éléments physiques du système avec la conception de l'architecture et des relations entre entités du système. Il s'agit d'un environnement de conception collaboratif pour une aide à la conception à partir d'une feuille blanche. L'outil est utilisé comme un assistant et les concepteurs gardent un rôle décisionnaire dans le processus. Au contraire du processus de conception en V, linéaire depuis la définition du projet jusqu'à son implémentation, [Ben16]

propose un processus itératif impliquant les partenaires économiques, l'ingénieur des exigences, l'expert conception et l'architecte système. Des pistes de développement d'une solution logicielle intégrée sont présentées.

[And et al.17b] présentent une méthode systématique de design pour l'usine flexible et reconfigurable. Deux méthodes de conception se distinguent : une approche progressive, qui consiste en une succession d'étapes consécutives, et une approche cyclique, dont le principe est la répétition de la méthode jusqu'à l'obtention d'une solution satisfaisante. Dans le second cas, le processus peut être poursuivi tout au long de la vie du système. Il est possible d'identifier des étapes génériques au sein de la méthode progressive dans le but de définir une méthode universelle de conception du RMS [And et al.17b].

La méthode générale de [And et al.17b] s'articule en cinq étapes. Avant la conception, il est important d'avoir une perspective à long terme sur la durée de vie du système et les investissements associés. La première étape est la planification stratégique du système, dont le livrable est un plan de développement. Les procédures de cette opération englobent de l'optimisation financière, de la processus d'analyse hiérarchique afin d'analyser qualitativement la solution de reconfigurabilité adaptée au regard de critères tels la réactivité, les coûts, les compétences des opérateurs. Une fois le modèle économique justifié, et le système optimal sélectionné, la phase suivante est la clarification de la tâche de conception, au travers de l'identification plus précise des scénarios de reconfiguration et des besoins en convertibilité. Après avoir identifié les outils clés du changement, il est possible de procéder à la conception primaire du système. Cette première étape permet la définition des types de produits, du degré de modularité nécessaire pour le système et le type de reconfigurabilité à implémenter. Cette étape permet de retenir le concept de design, avant de procéder au choix des spécifications techniques. Les outils de conception avancée se fondent sur des techniques de modélisation et d'optimisation, et permettent de détailler les modules constituant le système, leurs interfaces, tous les constituants du système en détail, ainsi que le système de contrôle. La robustesse de la conception est vérifiée par une étude de faisabilité ainsi que des simulations. A ce stade, on dispose des spécifications détaillées pour le système de production. La dernière étape, la reconfiguration, peut être reconduite tout au long du cycle de vie du système, en fonction du besoin. Il s'agit de la sélection de la configuration du système adaptée au contexte économique à un instant donné, et de la décision de la date idéale de reconfiguration. La procédure décrite ci-dessus est résumée Figure 3.3 [And et al.17b].

Selon une autre approche, [Gau et al.19] développent une méthode de conception du système reconfigurable par une approche modulaire du système de production. Il s'agit d'une méthode descendante, dont l'objectif est le développement de machines modulaires au lieu du remplacement des installations existantes comme ce qui est réalisé habituellement. Le design modulaire du RMS couvre les trois premières phases de conception de l'ingénierie : la planification, le développement et la conception au niveau système.

[Sal et al.19] se penchent spécifiquement sur la modularité et proposent un outil de conception semi-algorithmique, dont l'objectif est d'intégrer précocement dans le processus de conception le concept de modularité du système. Quant à [Hua et al.18], les auteurs se penchent sur l'application de la théorie des systèmes vivants (Living System Theory - LST) à la conception des RMS. La méthode de conception multi-échelles prend en compte trois niveaux de l'entreprise : le système de production, la cellule de production et la machine-outil. Les sous-entités (processus élémentaires) du LST permettent de construire le modèle, dont le modèle de conception universel peut être utilisé pour les différentes phases de reconfiguration.

Cependant, comme souligné par [And et al.17b], malgré les travaux de recherche actuels sur la conception du RMS, les industriels manquent d'outils concrets pour concevoir et construire

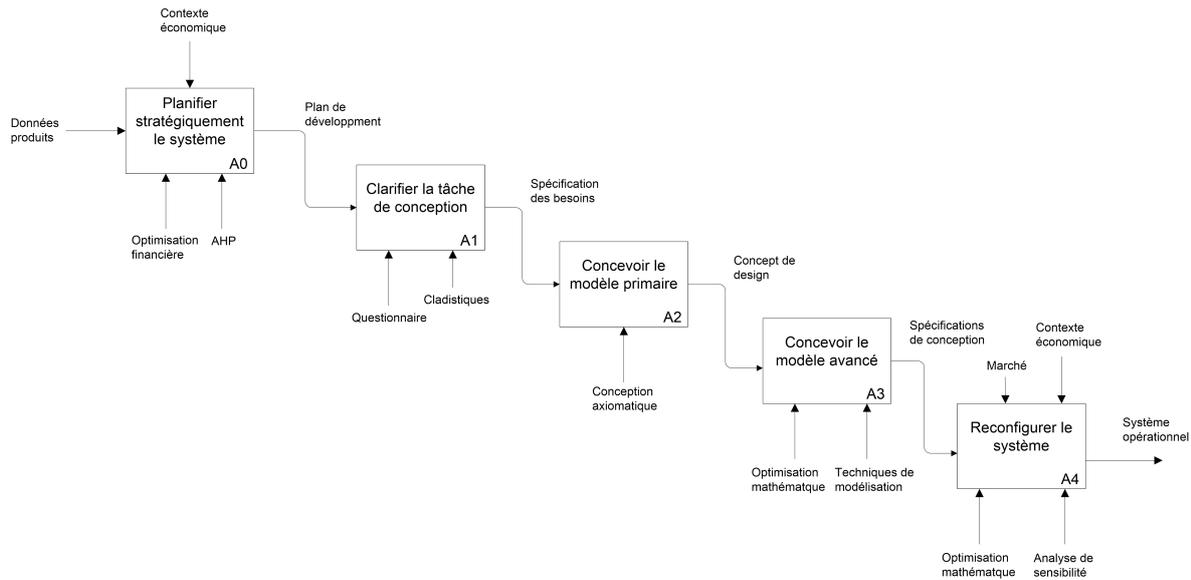


FIGURE 3.3 – Processus de conception du système reconfigurable. Adapté de [And et al.17b]

des lignes de production reconfigurables. Les décideurs des entreprises ne sont pas familiers avec le paradigme de reconfigurabilité, et des freins technologiques limitent l'installation de nouveaux modules transformables.

Les travaux cités ne permettent pas d'évaluer la performance du système de production obtenu en appliquant les démarches citées, à moins de construire physiquement le système. Il paraît donc judicieux d'intégrer des étapes itératives de tests de scénarios de production et d'implantations via des simulations. Les outils de simulation apportent un bon compromis entre une simplification du système réel nécessaire à la modélisation, et son coût réduit comparé à la construction d'une ligne réelle de production. Pour cela, il sera nécessaire de construire des modèles sur lesquels nous pourrons lancer des simulations.

De plus, le processus de [Ben16] ne couvre pas le choix des technologies à implémenter et ne propose pas d'outil concret pour implémenter la démarche, tandis que la démarche proposée par [And et al.17b], qui couvre ces technologies, se base uniquement sur des outils qualitatifs (interviews, réunions et entretiens avec les équipes industrielles), là où [Ben et al.14] proposent des outils d'analyse et d'optimisation mathématiques.

### 3.1.2 Stratégies de reconfiguration

Une fois le RMS construit, le système de production est adapté pour répondre à la demande du marché actuel. De manière à rester au plus près de la demande client en terme de volume et variabilité produit, des reconfigurations consécutives devront avoir lieu. Les reconfigurations sont nécessaires tout au long de l'exploitation de la ligne de production, notamment en phase de montée en cadence, tout comme en phase de fin d'exploitation du système et de décroissance du volume de production. Selon [Bru et al.17], si la littérature sur les RMS reconnaît l'importance de la reconfigurabilité en phase de montée en cadence, il n'existe pas à ce jour de méthodologie afin de déterminer le meilleur compromis de configuration d'une ligne de production dans cette phase.

En régime permanent, une fois le système de production en place, il est nécessaire d'avoir défini une stratégie de reconfiguration, afin de connaître la fréquence ou l'occurrence impliquant la nécessité de reconfigurer le système. Ainsi, le RMS reste productif malgré les fluctuations de la demande. Un déclencheur est nécessaire comme point de départ d'une nouvelle reconfiguration. [And et al.17b] relèvent le besoin de définir une méthode afin de connaître le moment opportun pour reconfigurer le RMS. Selon les auteurs, il est nécessaire de formuler un indicateur permettant d'exprimer le besoin de reconfigurer.

[Hee et al.15] proposent une approche pour la planification du système reconfigurable, où le changement de configuration doit avoir lieu lorsqu'un écart se creuse entre la configuration en place et les besoins en rendement ou le type de produit. Un indicateur correspondant à la capacité du système, en heures, est calculé, et comparé avec la capacité requise pour couvrir la demande du marché. De cette manière, il est possible de prévoir et d'anticiper le besoin d'augmenter la capacité.

Dans [Aza et al.13], les auteurs définissent un cadre pour la reconfiguration du système de production, basé sur une approche de boucle de contrôle. Les auteurs mesurent la différence entre la valeur réelle et la valeur désirée d'un indicateur de pérennité du système au regard de la variabilité de production. A partir de ce résultat, la procédure décrite accompagne la planification d'actions afin de compenser l'erreur et reconfigurer le système. Cette approche est présentée sur trois niveaux de reconfiguration : au niveau du système entier, de la machine, et au niveau de la flexibilité intrinsèque des installations. Néanmoins, en raison d'un manque de précisions sur l'indicateur à calculer, il n'est pas possible d'appliquer la méthode décrite par [Aza et al.13].

[Pui et al.17] proposent deux indicateurs relatifs à la reconfigurabilité : l'un souligne les moyens mis en œuvre afin de reconfigurer le système, et le second met en relief le temps nécessaire à réaliser une reconfiguration. Par ailleurs, les plans de reconfiguration sont catégorisés entre les reconfigurations consistant à reproduire un module déjà existant, les transformations qui nécessitent une adaptation d'un élément déjà connu, et enfin les reconfigurations nécessitant d'étendre un concept. A travers un cas d'étude, [Pui et al.17] montrent que les efforts nécessaires pour un changement de configuration peuvent être réduits si une stratégie de reconfiguration est développée sur le long-terme. En effet, si plusieurs reconfigurations sont nécessaires au long de la vie du système de production, il sera avantageux d'investir dans un système plus coûteux, mais possédant des caractéristiques de transformabilité et de modularité.

[And et al.17b] soulignent l'importance de reconfigurer le système de production au moment opportun. Cette étape consiste à répéter certaines étapes de la conception du RMS (sélection des briques technologiques, choix de la configuration). Des travaux portent sur la définition d'indicateurs permettant de mesurer la facilité de conversion entre deux configurations [Wan et al.17 ; You et al.06]. Pour ce faire, [You et al.06] définissent des scénarios de production sur des périodes de configuration. Si plusieurs scénarios sont possibles pour une même période, ils seront pondérés par des probabilités d'occurrence. Cependant, la notion de durée des périodes de planification n'est pas traitée. Elle est prise comme donnée d'entrée du problème de reconfiguration.

La fréquence de reconfiguration est abordée dans les travaux de [Bru et al.17]. Les auteurs ont identifié que la fréquence des reconfigurations est a priori plus importante dans les petites et moyennes entreprises que dans les grands groupes. Dans le premier cas, elles sont attendues selon un planning journalier, dans le second cas, les reconfigurations interviennent sur une base mensuelle voire annuelle. Cette différence est perçue comme étant due au volume de production plus important dans les grandes structures. Bien que cet article soit l'un des rares à introduire la notion de fréquence de reconfiguration, les éléments cités ne sont pas suffisamment précis pour

définir une stratégie de reconfiguration sur le long-terme.

[Gar13] définit une méthodologie dont l'objectif est de couvrir le manque de méthode concernant la reconfiguration des installations de production. L'auteur propose un nouvel indicateur, le Niveau de Reconfiguration Nécessaire (Needed Reconfiguration Level - NRL). Au-delà d'une certaine valeur de NRL, le système de production doit être reconfiguré afin de mieux correspondre aux exigences de production. S'il est nécessaire de reconfigurer le système, la méthode décrite par [Gar13] peut être employée afin de déterminer les modifications à apporter en fonction de la demande du marché. Cet article donne un moyen précis et chiffré de connaître le moment opportun de reconfiguration, et apporte une première réponse quant à une stratégie de reconfiguration. Le revers de la proposition de [Gar13] est la difficulté à l'implémenter. En effet, certains indicateurs laissent une grande place à l'interprétation du décideur, ce qui soulève la question de la robustesse de la méthode. Par ailleurs, les calculs intermédiaires pour obtenir la valeur du NRL sont fastidieux ce qui limite une utilisation régulière. La stratégie de reconfiguration basée sur le calcul du NRL se décompose en 30 étapes, ce qui peut constituer un désavantage pour un déploiement de la méthode dans un contexte industriel.

L'état de l'art sur le sujet montre donc un manque en ce qui concerne la définition d'une stratégie de reconfiguration adaptée aux industriels ainsi que le niveau de reconfiguration nécessaire. Nous abordons donc dans la suite des propositions sur ces sujets.

### 3.1.3 Limites et positionnement de la thèse

Comme vu précédemment, les méthodes de conception présentes dans la littérature ne permettent pas de couvrir la conception du système reconfigurable de manière exhaustive, et elles ne sont pas facilement compréhensibles et ni applicables pour les industriels. Cependant, la structuration en une première phase d'analyse des besoins, puis définition des composants, et définition du système global, que l'on retrouve dans les démarches identifiées lors de la revue de la bibliographie, sera conservée.

La revue de la bibliographie sur les stratégies de reconfiguration démontre que les entreprises ne disposent pas de méthode de reconfiguration basée sur des métriques quantitatives précises. Néanmoins, deux stratégies émergent afin d'informer le manager de production du moment opportun où il doit reconfigurer. La première est la définition d'une fréquence de reconfiguration, et la deuxième possibilité est le choix d'une métrique qui amorce le processus de reconfiguration lorsqu'une valeur limite de performance ou de réponse à la demande est atteinte.

## 3.2 Démarche proposée

Suite au besoin identifié dans la section précédente en ce qui concerne une méthode globale pour la conception du RMS, et en se basant sur les méthodologies existantes dans la littérature, nous proposons une démarche de conception du système reconfigurable, applicable au système de manufacturing comme aux lignes d'assemblage. Cette approche a pour objectif d'assister les industriels dans la conception d'une ligne devant répondre au besoin d'un contexte économique turbulent, dans une stratégie d'investissement à long-terme. La méthode est applicable au cas de la conception à partir d'une feuille blanche tout comme dans le cas de la transformation d'une ligne existante.

Suite aux éléments identifiés au travers de l'analyse de la littérature, la démarche proposée, présentée Figure 3.4, se divise en quatre étapes : identification des besoins en terme de recon-

figurabilité pour le système de production, choix des briques technologiques et modélisation, choix de la configuration, et enfin reconfiguration [Bea et al.19; Bea et al.20a]. La reconfiguration correspond à un bouclage de la démarche, et la reconfiguration a lieu plusieurs fois au cours de la vie du système de production. Chaque étape est détaillée dans les sections suivantes. Le diagramme SADT présente, pour les quatre activités, les données de contrôle, les outils et logiciels employés, et le résultat obtenu en sortie d'activité.

Dans cette démarche, l'objet d'étude est le système industriel. Au début de la démarche, le système étudié est celui en place dans l'entreprise. L'objet en sortie de la démarche est une installation reconfigurable adaptée aux données d'entrée.

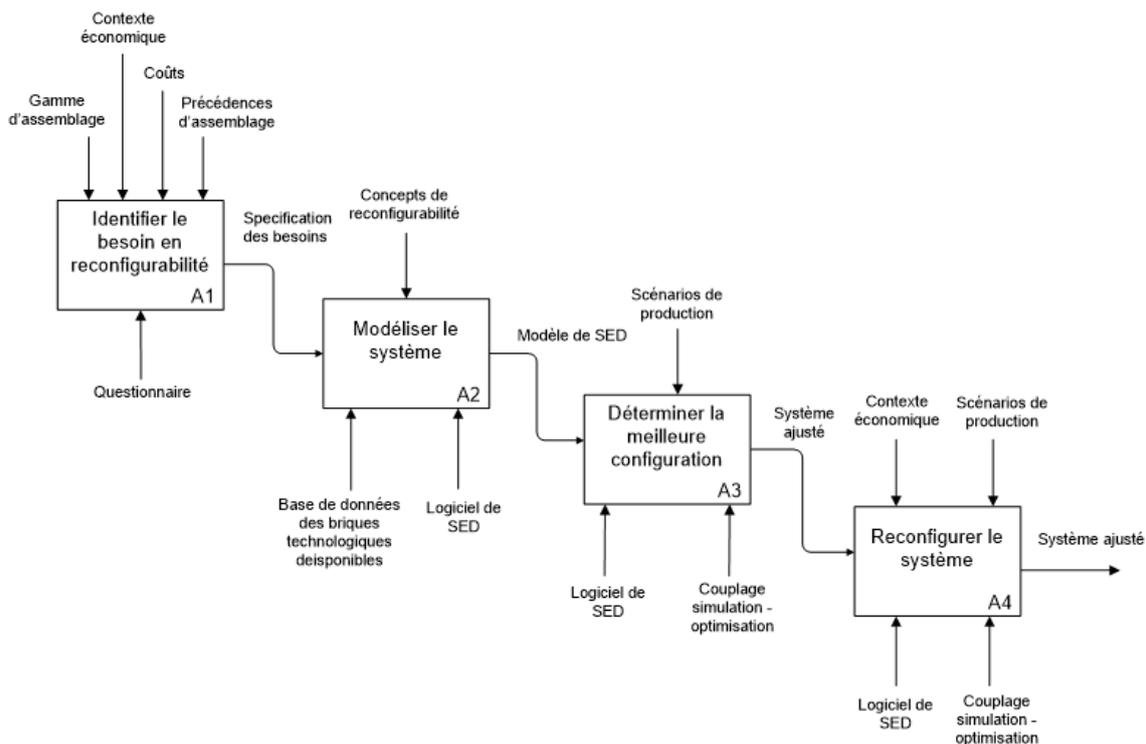


FIGURE 3.4 – Diagramme SADT de la démarche de conception

### 3.2.1 Identifier le besoin en reconfigurabilité

La première étape du cadre de conception est la définition des besoins en terme de flexibilité, reconfigurabilité et agilité spécifiques de la ligne de production étudiée. La réactivité que doit posséder le futur système est évaluée en fonction des exigences dues à la demande de production passée, présente et à la demande évaluée pour le futur, selon les caractéristiques des produits et les volumes à produire. Il est essentiel de planifier l'infrastructure initiale pour des transformations futures, en terme de fonctionnalité et de capacité en volume, afin de garder des espaces dans le but d'ajouter ultérieurement des éléments, et de concevoir dès le début une architecture logicielle capable d'accueillir de nouveaux équipements [Kor et al.17].

Cette étape prospective de reconnaissance du terrain est effectuée par [And et al.17b] à travers un questionnaire. Les questions sont conduites lors d'interviews avec des experts et des décideurs de l'entreprise. Plusieurs réunions sont organisées pour discuter des raisons de motivation pour la construction d'un système reconfigurable dans l'entreprise étudiée. Les questions

sont formulées sous forme ouverte et attendent des réponses précises en terme de volumes de production attendus, de nombre de types de produits, de la durée du cycle de vie de produits, etc. Les questions sont divisées en section selon leur portée sur le produit, la production, les installations physiques ou les technologies à implémenter. Le but est de spécifier et formuler les exigences et de déterminer le paradigme de production approprié. D'une manière similaire, [Mag et al.18] propose un questionnaire qui permet d'explorer la perception et la compréhension de la reconfigurabilité par les entreprises. Le questionnaire prend la forme d'affirmations, à évaluer sur une échelle de Likert, ce qui permet une analyse statistique si le nombre de réponses est suffisant. Les résultats présentés donnent des informations sur le niveau de flexibilité et reconfigurabilité des usines des entreprises interrogées, ainsi que sur les actions planifiées pour améliorer la capacité de leurs moyens de production à répondre à une demande fluctuante.

Le résultat attendu est un axe de recherche pour guider le choix des concepts de reconfigurabilité retenus et les briques technologiques associées, afin d'alimenter le modèle de la ligne dans un environnement de simulation.

A partir des travaux cités précédemment, le questionnaire employé dans notre méthode reprend des éléments des questionnaires conçus par [Mag et al.18] et [And et al.17b]. Ce questionnaire est présenté en Annexe A. Les réponses sont soit évaluées sur une échelle de Likert, soit à réponse ouverte, et concernent les caractéristiques des produits, le process et les caractéristiques des installations [Bea et al.19]. Si le questionnaire n'est seulement appliqué qu'au sein d'une unique entreprise pour un cas d'étude précis, il est probable que le nombre de personnes interrogées ne pourra pas garantir un résultat statistique. Par conséquent, le questionnaire doit être utilisé comme un moyen d'ouvrir la discussion et de sensibiliser à l'intégration des questions de reconfigurabilité dès les premières phases de conception du système de production. Finalement, une considération plus importante devrait être apportée à la discussion engendrée par le questionnaire plutôt qu'aux réponses exactes sur l'échelle de Likert. Cette approche permet de récolter des informations pertinentes quant aux chances de développement de la reconfigurabilité dans l'usine. Ce point dépend du degré de similitude entre les produits assemblés sur la même ligne, de l'ordonnancement des produits, des contraintes de précédences entre les tâches d'assemblage, du contexte économique et du coût des installations.

A ce stade, les informations récoltées sont de deux sortes : d'un côté les besoins pour la conception du RMS, et les leviers et limites actuels en terme de reconfigurabilité dans l'usine de l'autre. La spécification des besoins et les limitations causées par les caractéristiques des installations, l'architecture et la nature des ressources sont recueillies. Les besoins se classifient selon la customisation nécessaire, les similarités entre les types de produits, et les conséquences sur le process, l'introduction de nouveaux produits, la durée du cycle de vie des produits, le ratio de mixte produit, la montée en version des machines, et la potentielle mobilité géographique des installations. Les freins et leviers de reconfigurabilité se catégorisent selon l'architecture, la taille de lot, l'implantation, les machines, le moyen d'approvisionnement des pièces, le moyen de transport des produits entre les postes, le besoin d'agrandissement en surface et le niveau d'automatisation des ateliers [And et al.17b].

Dans cette étude, les caractéristiques des produits, la constitution des familles de produits, la séquence d'assemblage et l'équilibrage des ressources ne sont pas considérés comme variables d'ajustement, mais comme données d'entrée non modifiables. Plus précisément, l'hypothèse choisie est de considérer toutes les contraintes liées directement au produits comme des données d'entrée de la démarche de conception.

Après l'identification du besoin de conception et du niveau de reconfigurabilité requis, les briques technologiques pertinentes sont désignées. La solution dépend des caractéristiques du

système de production, de l'architecture dans le cas de d'adaptation d'un système déjà existant. Ainsi, on dispose d'une spécification du besoin pour la modélisation de la future ligne.

### 3.2.2 Modéliser le système

A partir des besoins identifiés dans la première étape de la démarche, les briques technologiques nécessaires pour construire le RMS sont identifiées. Le choix de la solution technologique pour implémenter la reconfigurabilité sur la ligne va être une donnée d'entrée du modèle de simulation. Il est nécessaire de modéliser le système de production afin de construire le modèle de la ligne dans un environnement de simulation à événements discrets (SED). En lançant des simulations, il est possible d'évaluer les paramètres de performance (KPIs - Key Performance Indicators) du modèle sur des scénarios de production variés. En parallèle, il est possible de chiffrer les investissements correspondants et de calculer la valeur des indicateurs de reconfigurabilité correspondant aux briques technologiques sélectionnées.

D'après l'analyse de la littérature sur les systèmes reconfigurables et la maturité technologique des concepts de l'usine du futur, les briques technologiques pertinentes ont été identifiées dans le Chapitre 2. Le principe choisi pour notre approche de conception du RMS et de proposer au décideur un domaine de solutions limité. La démarche ne va donc pas permettre d'aider à la conception d'une nouvelle brique technologique, mais sera un support pour le choix d'une technologie parmi un panel de technologies identifiées. L'utilisateur pourra sélectionner les ressources entre une liste de ressources à implémenter proposées et pourra les tester grâce aux outils qui accompagnent la démarche. L'outil développé devra guider dans le choix de la configuration idéale selon les types de produits, le ratio de mixte produit, et le volume de production.

Les briques identifiées qui seront proposées pour la conception du RMS couvrent les trois axes : la façon dont le produit est transporté à travers l'atelier, la modularité et la standardisation des postes de travail et machines, et la mobilité des ressources. Le premier axe correspond à l'étude du flux de produits, qui peut être en série, en parallèle, ou hybride [Wan et al.13]. La modularité des postes se rapporte au niveau de l'entreprise du poste, de la ressource ou de l'outil. Le troisième axe peut être mis en place par l'intégration d'un AGV sur la ligne, dans le but de déplacer plus rapidement les ressources robotisées. Dans le cas où il n'est pas nécessaire de reconfigurer le système à une haute fréquence, l'intégration d'un AGV n'est pas pertinente, et il est suffisant de monter la ressource sur une plateforme déplaçable. Grâce à la solution mobile ou déplaçable, la mobilité des ressources sur la ligne de production est augmentée. Pour chaque cas d'usage, il est nécessaire de déterminer le paradigme adapté pour la ligne reconfigurable par une analyse terrain et les briques technologiques peuvent être sélectionnées en conséquence.

Le modèle de simulation est développé suivant la gamme de la future ligne. Les taux de pannes des machines : temps entre les pannes (Mean Time Between Failure - MTBF) et temps de réparation (Mean Time To Repair - MTTR), sont renseignés d'après les données collectées dans les usines.

### 3.2.3 Détermination de la configuration

Dans la troisième étape de la démarche, le modèle de simulation permet d'évaluer la performance du système. L'outil d'aide à la décision proposé souligne l'articulation entre critères de performance et critères de reconfigurabilité. La présentation des résultats sous forme de graphes permet au décideur une évaluation visuelle et une prise de décision rapide. La démarche aide à la décision, qui sera basée sur un compromis entre la facilité de reconfigurer le système, sa

performance, et le prix de la solution. Dans l'environnement de simulation, un scénario correspond à un ratio de mixte produit et à un volume de production, qui correspond à une évolution probable du marché suivant la variabilité de la demande. En comparant les données disponibles, le manager de production est capable de choisir entre plusieurs solutions technologiques.

Lors de l'intégration de ressources mobiles ou déplaçables, il est nécessaire de déterminer leur allocation sur les postes de travail, ce qui peut être résolu par optimisation, avec pour objectif la minimisation du temps de fabrication de la liste de produits. Les méthodes exactes sont utilisées pour la résolution exacte de problèmes de petite taille, tandis que les méthodes approchées, permettent de résoudre des problèmes de décision calculables en un temps polynomial non-déterministe (problèmes NP-difficiles). Pour évaluer la solution proposée par l'algorithme, les variables de réglage du système, générées par l'algorithme d'optimisation, peuvent être utilisées comme données d'entrée du modèle de simulation. Après simulation, les paramètres de performance de la configuration sont obtenus et peuvent être utilisés comme paramètres d'entrée du modèle d'optimisation. Les modalités de couplage entre la simulation et l'optimisation seront développées au Chapitre 4.

Après avoir finalisé cette troisième étape de la démarche de conception, le décideur obtient une solution ajustée pour la ligne de production étudiée.

### 3.2.4 Reconfigurer le système

La capacité de réagencement est donc assurée par le choix de composants flexibles, intégrables et customisables pour le système de production. Le réglage du système de production en terme de layout, cadence, ratio produit et séquence d'arrivée des produits est défini par l'outil d'aide à la décision.

L'état de l'art présenté en Section 3.1.2 a démontré un manque de méthodes permettant de mesurer la période de reconfiguration appropriée.

Nous avons distingué deux principales stratégies de reconfiguration : les stratégies basées fréquence et les stratégies basées sur des indicateurs quantitatifs. Dans la première approche, indépendamment du contexte économique, le paramétrage du système de production sera testé à une fréquence pré-déterminée.

Plus qu'une fréquence de reconfiguration, il apparaît donc nécessaire de définir un déclencheur permettant de surveiller la performance du système, afin de déterminer si une reconfiguration est nécessaire, dans le cas où le niveau de production du système s'écarterait du besoin réel. Cette fréquence correspond à la fréquence de vérification du réglage du système, et à la fréquence d'utilisation de l'outil d'aide à la décision développé. Cette fréquence n'est pas directement égale à la fréquence de reconfiguration du système, car la reconfiguration n'a lieu que si les indicateurs montrent qu'elle est nécessaire.

D'après [Bru et al.17], il est cohérent de fixer la fréquence d'échantillonnage au mois pour les grandes structures avec de forts volumes et à la semaine pour les structures petites et moyennes. Par ailleurs, lors d'un changement important de la demande du marché, comme lors de l'introduction ou le retrait d'un produit, ou la modification importante du volume de production, il est nécessaire de vérifier le réglage du système de production.

Dans la seconde méthode, la dégradation d'une métrique de performance en-deçà d'une valeur limite démontre l'incapacité du système à répondre à la demande, et à l'écart qui se creuse entre les exigences du marché et les capacités du système. C'est la dégradation du critère qui va générer le processus de reconfiguration. La Figure 3.5 illustre ce principe. L'entreprise

peut inclure un intervalle de tolérance, permettant une déviation pendant un temps court, et générant la prise de décision de reconfigurer si la situation critique s’installe dans la durée.

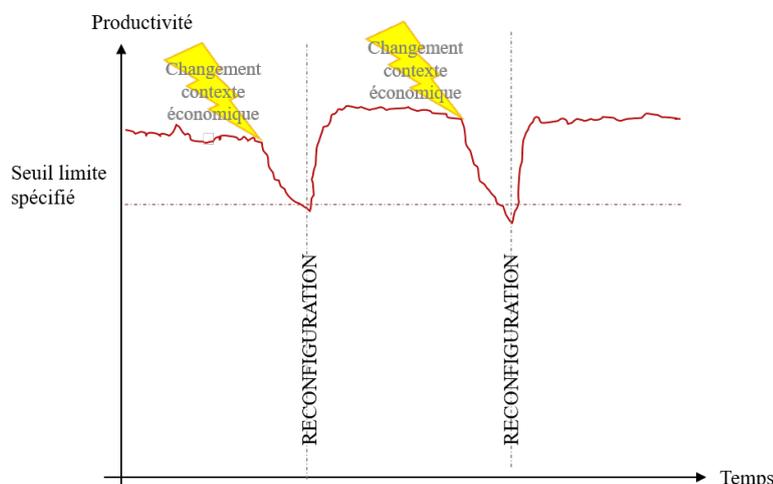


FIGURE 3.5 – Reconfiguration selon le changement de contexte économique

Nous recommandons l’adoption d’une reconfiguration basée sur une métrique. Cependant, le choix de la valeur limite générant la reconfiguration et la fenêtre temporelle de flexibilité autorisée peut être complexe. Le seuil limite reste spécifique au cas d’étude et doit être déterminée après une étude de la question réalisée avec des experts et décideurs de l’entreprise étudiée.

L’outil développé doit pouvoir être utilisé tout au long de la durée de vie de la ligne de production, pendant la phase de montée en cadence, la phase de maturité, et pendant la phase de baisse de cadence en fin de vie de la ligne d’assemblage.

### 3.3 Conclusion

Le Tableau 3.1 présente une comparaison entre les deux démarches identifiées lors de la revue de la bibliographie ([Ben et al.14 ; And et al.17b]) et la démarche proposée dans ce chapitre ([Bea et al.20a]). Ce tableau présente les trois démarches selon leurs caractéristiques : étapes, outils, indicateurs, et si une stratégie de reconfiguration est précisée. La présence et la précision des outils et indicateurs permettent de juger de la facilité des industriels à appliquer la démarche.

Afin de proposer aux entreprises les moyens de transformer leur système de production pour les rendre aptes à suivre une demande fluctuante, notre nouvelle approche a donc été définie pour la conception du RAS. Nous verrons dans les chapitres suivants les outils proposés, donnant aux industriels les éléments pour mettre en place cette démarche. L’apport de la thèse concerne la formalisation des étapes de la démarche, l’intégration de la notion de reconfigurabilité dès les premières phases de conception, et la synthèse des résultats par évaluation sur les aspects performance, reconfigurabilité et investissements. L’objectif est de fournir au décideur des indicateurs de performance et de reconfigurabilité de la ligne à transformer, afin de comparer diverses implantations et solutions technologiques. De plus, la modélisation de la ligne dans un environnement de simulation à événements discrets permet de vérifier la performance et la capacité de la ligne à moindre coût.

La démarche exposée dans ce chapitre couvre la synthèse du besoin en reconfigurabilité, l’identification des leviers de reconfigurabilité existants, le choix des briques technologiques, la

	<b>Étapes</b>	<b>Outils</b>	<b>Indicateurs</b>	<b>Stratégie de reconfiguration</b>
[Ben et al.14]	Analyse des besoins, Définition composants et architecture fonctionnels, Définition composants et architecture physique	Conception axiomatique, Taxonomies, Optimisation mathématique	N/A	N/A
[And et al.17b]	Planification, Clarification du besoin, Conception primaire, Conception avancée, Reconfiguration	Optimisation financière, AHP, Questionnaire, Cladistiques, Conception axiomatique, Optimisation mathématique	Performance, Indicateur de fluidité de reconfiguration ("reconfiguration smoothness")	N/A
[Bea et al.20a]	Identification du besoin, Modélisation, Recherche de configurations, Reconfiguration	Questionnaire, AHP, Simulation à événements discrets, Optimisation	Reconfigurabilité, Performance, Investissements	Performance limite

Tableau 3.1 – Comparaison des démarches

modélisation du système, son réglage et la définition d'une stratégie de reconfiguration. La Figure 3.6 synthétise ces éléments.

La méthode peut être employée dans un cas de conception d'une installation à partir d'une feuille blanche ou mise à niveau d'un système pré-existant.

Afin de mettre en œuvre la démarche, il est nécessaire de disposer d'un outil accessible, c'est-à-dire outillé et basé sur des indicateurs permettant d'évaluer le système, pour les industriels. Le chapitre suivant porte sur la description des outils utilisés pour l'application de la méthodologie.

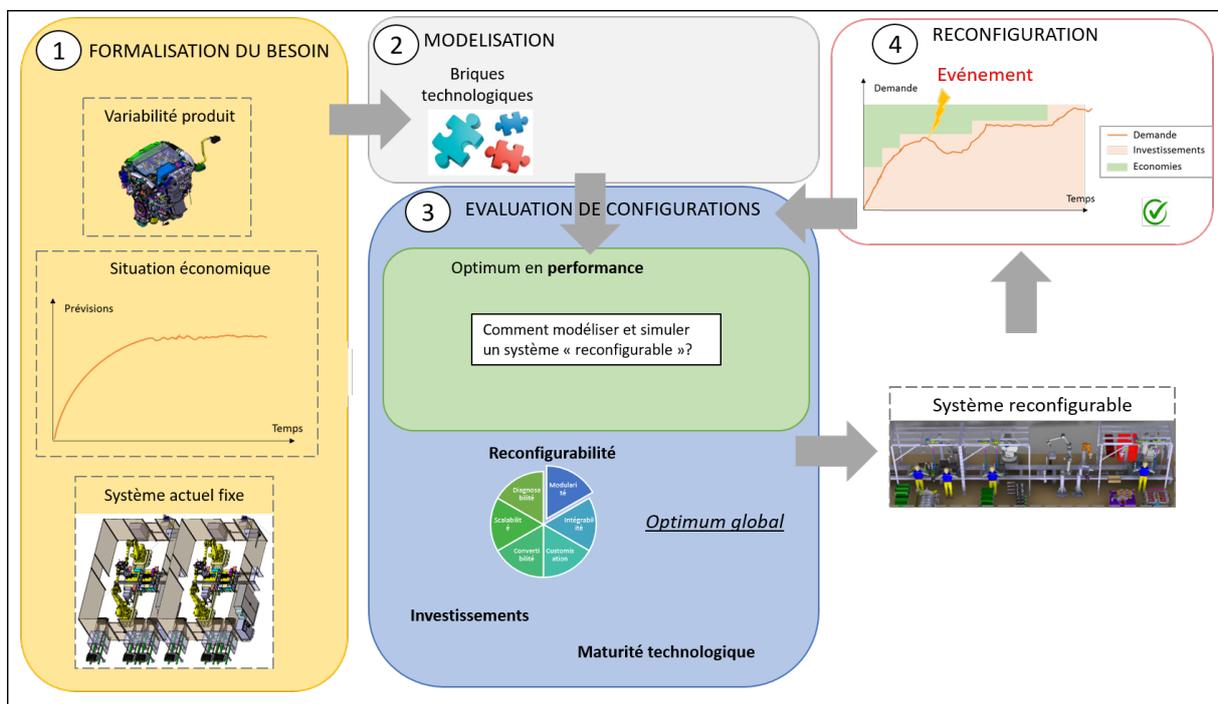


FIGURE 3.6 – Conclusion du Chapitre 3

# Chapitre 4

## Outil d'aide à la décision

### Sommaire

---

<b>4.1</b>	<b>Méthode outillée</b>	<b>63</b>
4.1.1	Définition du besoin et analyse fonctionnelle	63
4.1.2	Diagrammes de flux de données	63
<b>4.2</b>	<b>Critères de décision</b>	<b>66</b>
4.2.1	Performance	66
4.2.2	Indicateurs de reconfigurabilité	67
4.2.3	Investissements	67
4.2.4	Maturité technologique	67
4.2.5	Synthèse des indicateurs retenus	68
<b>4.3</b>	<b>Simulation et optimisation</b>	<b>69</b>
4.3.1	État de l'art des méthodes d'optimisation et de simulation	69
4.3.1.1	Méthodes d'optimisation	69
4.3.1.2	Optimisation pour le RMS	71
4.3.1.3	Simulation pour le RMS	72
4.3.1.4	Couplage simulation-optimisation pour le RMS	74
4.3.1.5	Conclusion de l'état de l'art	77
4.3.2	Structure de couplage mis en place	79
4.3.2.1	Description du problème	79
4.3.2.2	OptQuest-Simul8	79
4.3.2.3	Module d'optimisation externe-Simul8	80
4.3.2.4	Conclusion	80
<b>4.4</b>	<b>Problème de décision dans l'incertain</b>	<b>82</b>
4.4.1	La conception du système reconfigurable, un problème complexe	82
4.4.2	Théorie d'analyse des risques	82
4.4.3	Modélisation du problème de décision	83
4.4.3.1	Diagramme d'influences	83
4.4.3.2	Arbre de décision	83
4.4.3.3	Fonction d'utilité multi-attributs	84
4.4.4	Résolution	84
4.4.5	Raccord à l'outil d'aide à la décision	85
<b>4.5</b>	<b>Conclusion</b>	<b>85</b>

---

Ce chapitre présente les caractéristiques de l'outil logiciel d'aide à la décision permettant l'application de la démarche proposée au Chapitre 3. Il s'agit de répondre au besoin soulevé

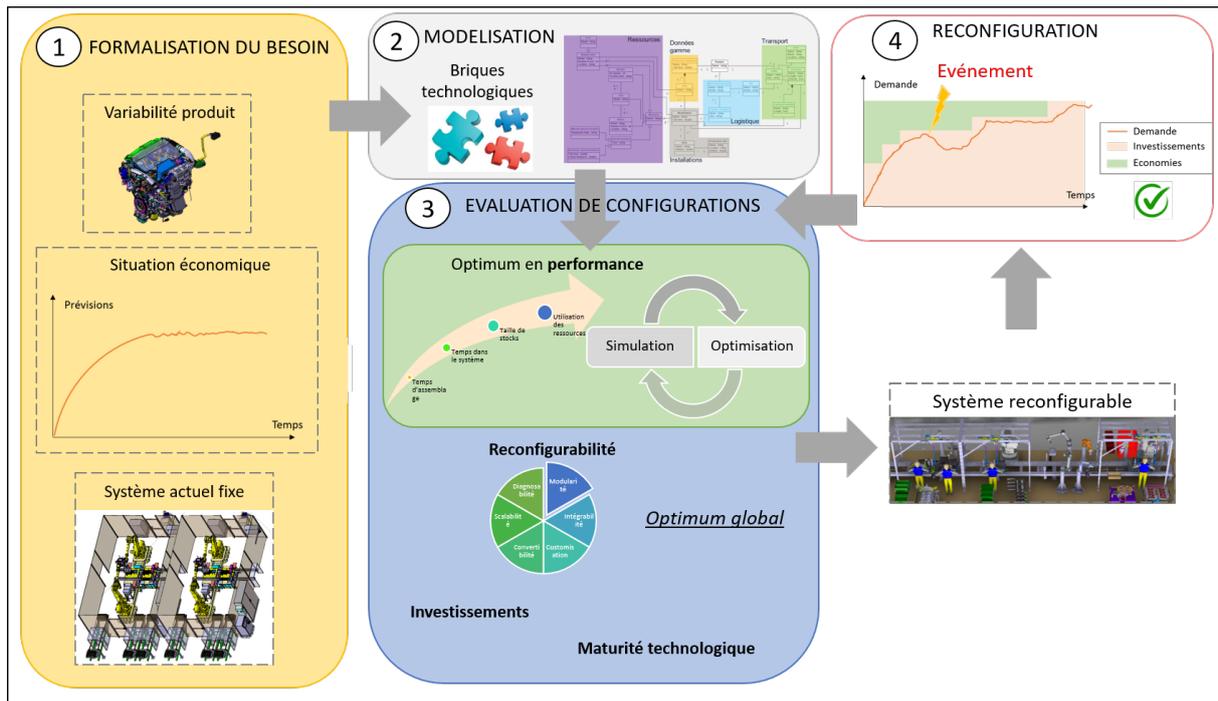


FIGURE 4.1 – Chapitre 4 : Outil d'aide à la décision

Section 1.2.4 du Chapitre 1. Les travaux précédents traitant des méthodes de conception des systèmes reconfigurables n'ont pas permis de fournir au monde industriel des outils pour augmenter concrètement la reconfigurabilité de leurs systèmes de production.

Ce chapitre définit dans un premier temps le besoin et les fonctions que l'outil d'aide à la décision et l'interface avec l'utilisateur doivent remplir. Chaque fonction (calcul des indicateurs, simulation, optimisation) est réalisée par un module (Figure 4.1). Les flux de données entre ces modules sont précisés, afin de montrer le fonctionnement global de l'outil et l'articulation entre les modules.

Puis, chaque sous-ensemble est détaillé. Les critères de décision, qui permettent d'évaluer la reconfigurabilité, la performance, et les investissements, sont présentés. Une revue de la littérature concernant l'approche par simulation à événements discrets (SED) et optimisation des problèmes de réglage des systèmes reconfigurables est présentée. Dans un second temps, nous introduisons le couplage mis en œuvre dans la thèse. L'utilisation conjointe de la simulation et de l'optimisation permet de déterminer la meilleure configuration du système. Enfin, pour rendre compte de la non-prévisibilité des variations du marché au cours du processus de décision, une approche originale est proposée : appliquer la théorie des problèmes de décision dans l'incertain à la conception des RAS.

L'ensemble de ces outils permet de mettre la démarche de conception en application sur un cas industriel, qui sera présenté au Chapitre 5.

## 4.1 Méthode outillée

### 4.1.1 Définition du besoin et analyse fonctionnelle

L'outil logiciel de conception du système reconfigurable doit permettre d'assister le décideur dans le suivi des étapes de la démarche proposée. La première étape d'identification du besoin en reconfigurabilité, des limites et des leviers au sein du système existant est réalisée grâce au questionnaire décrit Section 3.2.1 et présenté dans en Annexe A. Les données connues suite à cette étape sont la spécification du besoin et les briques technologiques permettant la reconfigurabilité à implémenter dans le système. L'outil à développer doit permettre le renseignement des données d'entrée, comme le type et le nombre de ressources reconfigurables choisies, et d'autres paramètres du système nécessaires au calcul des indicateurs de reconfigurabilité présentés au Chapitre 2. La construction du modèle de simulation se fait séparément, dans l'environnement du logiciel de SED. Si l'interface utilisateur ne permet pas de construire le modèle de simulation, il est possible de régler des paramètres, comme le nombre de ressources d'un même type, le temps de simulation, le volume à produire, ou le ratio de mixte produit. Afin de fournir au décideur un aperçu global des résultats, le tableau de bord doit lui permettre de visualiser les caractéristiques du système testé en terme de reconfigurabilité, performance et investissements.

L'expression du besoin pour la conception d'une interface pour le choix de reconfiguration du système de production reconfigurable est la suivante :

- Évaluation de la performance et de la reconfigurabilité du système de production existant à travers un modèle construit dans un environnement de SED
- Mise à disposition de briques technologiques pour la conception du RMS
- Interface avec le logiciel de SED afin qu'un utilisateur non-initié puisse choisir un modèle de système de production et les conditions d'un scénario à lancer
- Choix du scénario de production
- Récupération et affichage des paramètres de performance évalués par la simulation
- Affichage d'un tableau de bord global avec critères de performance et critères de reconfigurabilité
- Comparaison de différentes configurations et implantations de l'atelier

Les fonctions principales de l'outil d'aide à la décision étant définies, nous allons voir quelles sont les interactions de données entre les modules permettant de visualiser un scénario d'utilisation : outil de calcul des indicateurs de reconfigurabilité, analyse AHP, simulation, optimisation.

### 4.1.2 Diagrammes de flux de données

Le diagramme de flux de données (Data Flow Diagram - DFD) permet de représenter les fonctions, fichiers, bases de données, entrées et sorties d'un système d'informations à différents niveaux. La Figure 4.2 représente le niveau 0 du DFD pour l'outil de conception du RMS. Pour concevoir le RMS, l'utilisateur va spécifier tous les paramètres nécessaires à l'outil afin d'être en mesure de calculer ou de simuler les paramètres de sortie à afficher sur le tableau de bord : paramètres de performance et de reconfigurabilité.

L'utilisateur définit les briques technologiques sélectionnées, la pondération des indicateurs de reconfigurabilité selon les priorités de son métier, construit le modèle de simulation, et précise les scénarios de production à explorer. Dans le cas de l'utilisation d'un module d'optimisation, l'utilisateur a également pour rôle de spécifier les paramètres du problème d'optimisation.

La Figure 4.3 précise le niveau 1 du DFD. Les trois modules qui se distinguent à ce niveau

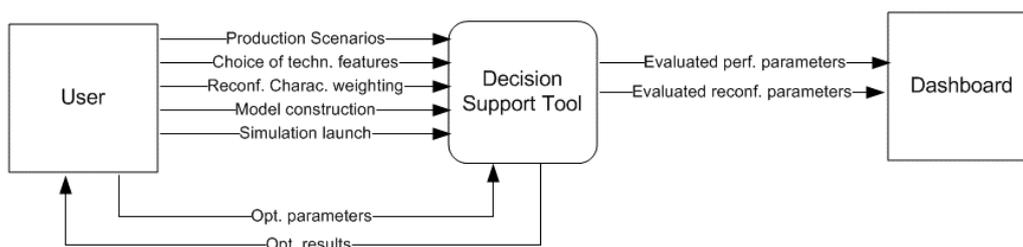


FIGURE 4.2 – Diagramme de flux de données - Niveau 0

sont l'interface d'aide à la décision, qui contient également le tableau de bord, l'environnement de SED, et le module d'optimisation. Les simulations sont construites et lancées par l'utilisateur dans l'environnement de SED. Le module d'optimisation est paramétré à part mais communique les paramètres de simulation et les résultats directement avec le modèle de simulation. Après l'exécution de la simulation, les paramètres de performance sont communiqués à l'interface d'aide à la décision et présentés sous forme de tableau de bord.

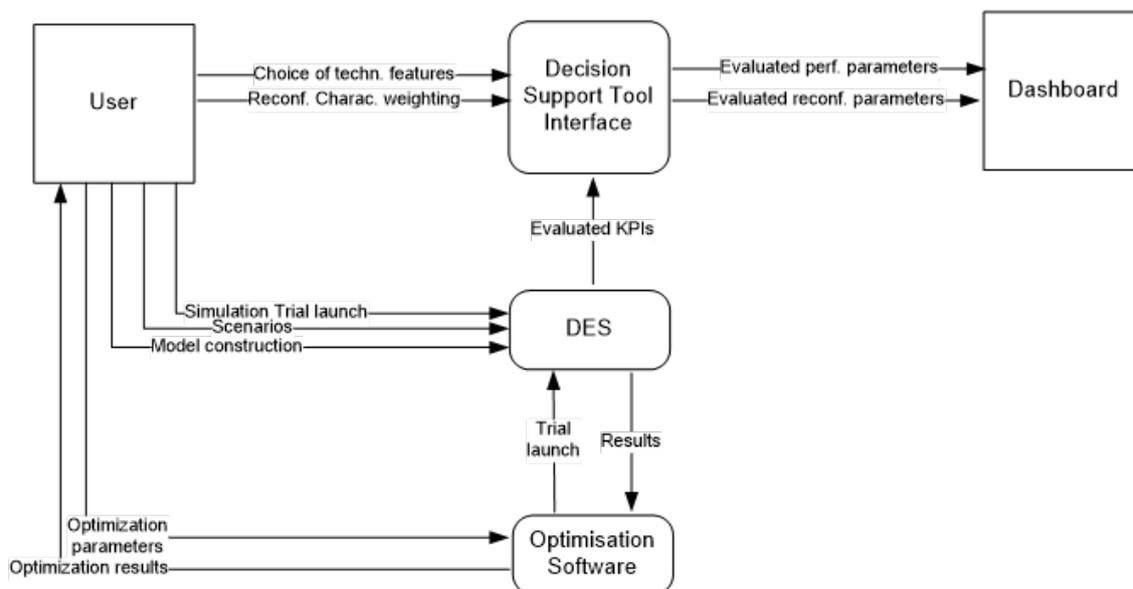


FIGURE 4.3 – Diagramme de flux de données - Niveau 1

La Figure 4.4 détaille les fichiers et derniers modules qui entrent en jeu. Via analyse AHP, la pondération des indicateurs de reconfigurabilité est spécifiée, et elle sera prise en compte dans l'affichage du degré de reconfigurabilité du système dans le tableau de bord final. La sélection des briques technologiques se fait à partir d'une base de données limitée. La gamme de production fournit les données d'entrée nécessaires à la construction du modèle de simulation et à la détermination du nombre de ressources requises. Le modèle de simulation est construit dans le logiciel de SED à partir de classes d'objets qu'il est possible de sélectionner (activité, ressource, convoyeur, etc.). Les statistiques de pannes des machines permettent d'enrichir le modèle de simulation avec des données réelles. Le logiciel de SED peut aider à la conception d'un plan d'expériences et proposant la liste des scénarios à tester et les valeurs que doivent prendre les variables d'ajustement. Pour chaque scénario, la simulation fournit les paramètres de performance évalués.

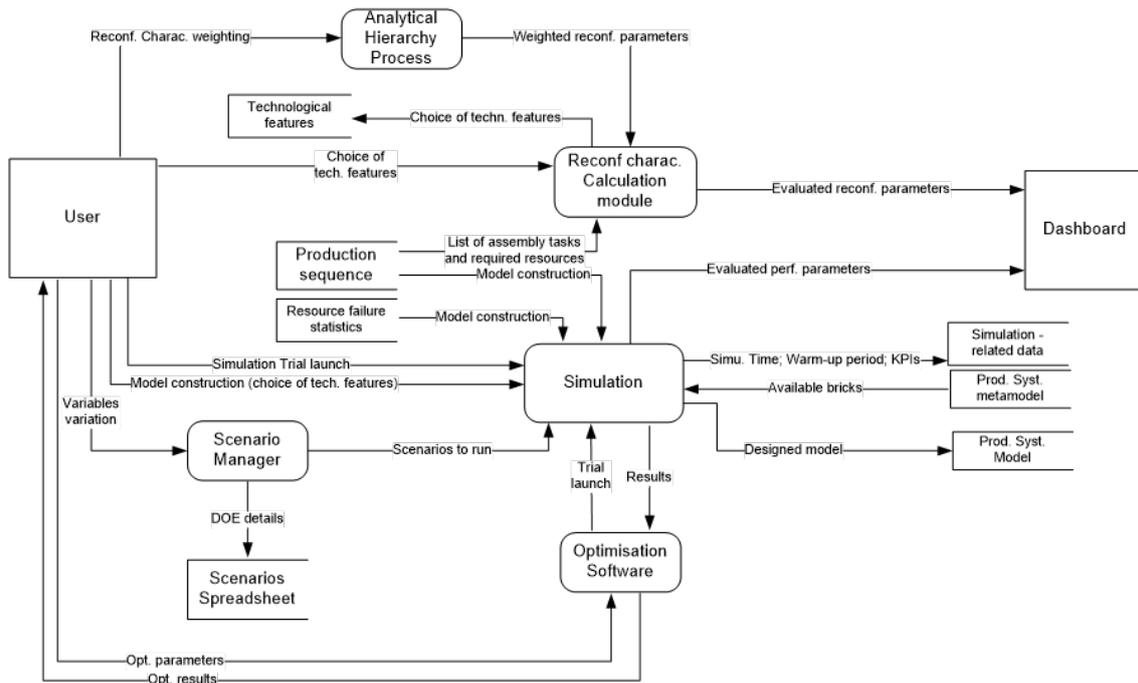


FIGURE 4.4 – Diagramme de flux de données - Niveau 2

Pour résumer, la chronologie d'utilisation du système est présentée en Figure 4.5. Après l'exécution de la simulation et l'obtention des paramètres évalués pour la configuration du système testée, deux possibilités de bouclage de la démarche s'offrent à l'utilisateur : relancer des scénarios en faisant varier la configuration du système, ou reboucler plus en amont en choisissant une autre brique technologique pour la réalisation du système reconfigurable. La démarche est achevée quand une solution parmi celles testées a été sélectionnée.

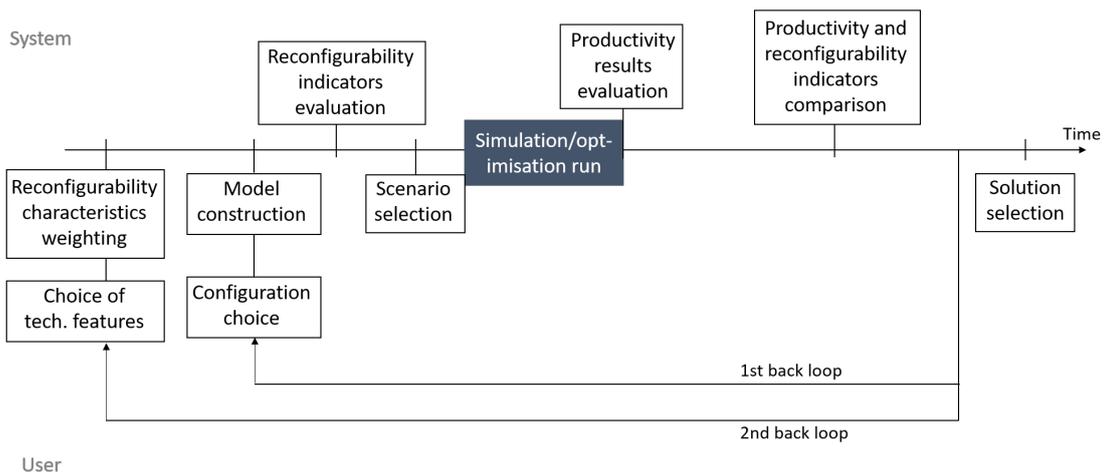


FIGURE 4.5 – Chronologie d'utilisation de l'outil

Cette section a permis de présenter la structure de l'outil d'aide à la décision et les flux de données entre les modules. Dans la suite du Chapitre, chaque composant de l'outil d'aide à la décision est détaillé. Dans la section suivante, nous présentons les critères de décision employés dans la démarche de conception du système reconfigurable.

## 4.2 Critères de décision

Cette section présente les critères de décision sur lesquels va se porter le choix du décideur afin de choisir le meilleur compromis entre des critères de nature différente. L'objectif est la détermination d'un optimum global entre performance du système, niveau de reconfigurabilité et montant des investissements.

Les critères de reconfigurabilité ont été abordés au Chapitre 2. Dans cette section, nous présenterons également les critères de performance, de coûts (relatifs aux investissements), et de maturité technologique permettant une évaluation globale de la solution.

### 4.2.1 Performance

La performance du système peut être obtenue à partir de modèles, d'une maquette ou du système de production réel. Un modèle peut prendre la forme d'une modélisation développée spécifiquement pour le problème ou de sa modélisation dans un environnement de simulation du commerce (SED). Nous avons choisi la seconde approche.

La SED fournit un aperçu statistique de la performance du système et permet de récolter des informations quant à son comportement dynamique pour une structure donnée [Alb et al.14]. Un modèle de simulation différent sera nécessaire pour évaluer chaque solution technologique. Le modèle contient les informations suivantes : nombre de postes, attribution des tâches aux postes, durées des tâches, relations de précédence entre tâches, types de ressources et lois de panne associées, layout et distance entre les postes.

La performance est évaluée, en terme de temps de production, nombre de produits assemblés, utilisation des ressources et nombre d'en-cours. La simulation permet de tester des scénarios à un coût très réduit en comparaison à des tests sur une maquette réelle. Par ailleurs, il est possible dans l'environnement de simulation de faire varier des paramètres qui ne sont pas sous contrôle en production [Fis11], comme les lois de pannes.

D'autres auteurs proposent de mesurer la performance avec des paramètres complémentaires. [Mit et al.14] définissent une évaluation de la performance basée sur quatre paramètres : le coût de la configuration, la fiabilité, le taux d'utilisation de l'installation et la qualité, calculée à partir du taux d'utilisation et de la fiabilité.

La norme NF E60-182 permet de calculer les taux de rendement des installations [Afn02]. Dans l'industrie, ces indicateurs de performance sont calculés à partir des données relevées sur les lignes et des différents temps permettant de décrire la disponibilité de l'installation. On distingue :

- le Temps Total (TT)
- le Temps d'Ouverture (TO) :  $TO = TT - \text{Temps de fermeture de l'atelier}$
- le Temps Requis (TR) :  $TR = TO - \text{Arrêts planifiés}$
- le Temps de Fonctionnement (TF) :  $TF = TR - \text{Arrêts propres (Arrêts non planifiés)}$
- le Temps Net (TN) :  $TN = TF - \text{Micro arrêts}$
- le Temps Utile (TU) :  $TU = TN - \text{Temps perdu en non qualité}$

Le TRE (Taux de Rendement Économique), défini par la formule 4.1, montre l'engagement des moyens de production.

$$TRE = \frac{TU}{TT} \quad (4.1)$$

Le TRG (Taux de Rendement Global), calculé à partir de la formule 4.2, rend compte de la productivité de la ligne.

$$TRG = \frac{TU}{TO} \quad (4.2)$$

Le TRS (Taux de Rendement Synthétique), calculé selon la formule 4.3, montre l'utilisation effective du système de production.

$$TRS = \frac{TU}{TR} \quad (4.3)$$

Cependant, avec les données à disposition, le TRS varie entre les scénarios uniquement en fonction du nombre de produits fabriqués/assemblés. Les données d'entrée des autres paramètres sont identiques pour tous les scénarios. C'est pourquoi il ne nous paraît pas pertinent d'employer des indicateurs adaptés au suivi de la performance d'une ligne réelle à un modèle de ligne simulé, dont le comportement aléatoire ne dépend que de lois correspondant à des données d'entrée du modèle (Exemple : taux de panne des machines). Dans notre étude, la performance de la ligne sera mesurée par les données brutes fournies par le logiciel de simulation : temps nécessaire à fabriquer la commande, nombre de produits assemblés, taux d'utilisation des ressources et nombre d'en-cours.

#### 4.2.2 Indicateurs de reconfigurabilité

Les indicateurs de reconfigurabilité employés dans nos travaux ont été définis dans le Chapitre 2 Section 2.3. Six indicateurs, correspondant aux caractéristiques principales de la reconfigurabilité [Kor05], sont proposés, ainsi qu'une pondération des indicateurs par analyse AHP et une synthèse en un indicateur de reconfigurabilité unique.

#### 4.2.3 Investissements

En phase de conception ou de transformation du système de production, le coût d'une solution technologique et la durée de son retour sur investissement reste l'indicateur le plus important pour les industriels. [Bor et al.19] soulignent l'importance du développement de modèles permettant d'évaluer la pertinence économique des systèmes reconfigurables.

Les coûts se divisent principalement entre des coûts fixes, correspondant aux investissements, et les coûts d'exploitation : coût de l'énergie, location des locaux, salaires des employés, etc.

Afin pouvoir comparer entre elles plusieurs solutions technologiques reconfigurables, nous représenterons les investissements en fonction du temps, en prenant en compte les délais d'anticipation de commande de matériel, plus longs dans le cas de systèmes fixes. L'objectif est de mettre en lumière l'impact financier de l'acquisition de ressources en fonction du besoin. Le coût variable correspondant au salaire des opérateurs pour le segment de ligne étudié sera également représenté.

#### 4.2.4 Maturité technologique

Les solutions technologiques de nouvelle génération envisagées ne sont pas toutes prêtes à être intégrées dans les usines à un coût acceptable. Nous proposons pour évaluer ce point

un indicateur de maturité des briques technologiques pour le système reconfigurable. Il existe déjà un indicateur de niveau de maturité technologique, le TRL (Technology Readiness Level), aujourd'hui largement employé par les entreprises. Le TRL prend des valeurs comprises entre 1 et 9, 1 correspondant aux premiers travaux de recherche appliquée et 9 à un système réel validé dans un environnement opérationnel. Les correspondances entre valeurs de TRL et maturité technologique sont rappelées dans le Tableau 4.1.

<b>TRL1</b>	Principes de base observés et décrits
<b>TRL2</b>	Concept technologique et/ou applications formulées
<b>TRL3</b>	Preuve analytique ou expérimentale des principales fonctions du concept
<b>TRL4</b>	Validation de composants et/ou de maquettes en laboratoire
<b>TRL5</b>	Validation de composants et/ou de maquettes en environnement représentatif
<b>TRL6</b>	Démonstration d'un prototype ou modèle du système dans un environnement représentatif
<b>TRL7</b>	Démonstration d'un prototype du système dans un environnement opérationnel
<b>TRL8</b>	Système réel achevé et qualifié par des tests et des démonstrations
<b>TRL9</b>	Système réel achevé et qualifié par des missions opérationnelles réussies

Tableau 4.1 – Niveaux de TRL [Sta13]

Afin de rendre compte également de l'aspect financier, nous proposons de calculer l'indicateur de maturité pour le système reconfigurable  $M_R$  à l'aide de l'équation 4.4, où  $C_F$  est le coût de la technologie dans sa version fixe, et  $C_R$  le coût de la solution reconfigurable. Une valeur faible de  $M_R$  indiquera que la solution reconfigurable n'est pas mature, et une valeur proche de 1 montrera que la brique technologique est prête à être implémentée de manière performante dans l'installation industrielle. On peut proposer une limite de maturité à  $M_R = 0.8$ .

$$M_R = \frac{TRL}{9} \frac{C_F}{C_R} \quad (4.4)$$

Voici les valeurs de  $M_R$  pour quelques solutions technologiques qui ont été citées jusqu'ici :

- Robot fixe :  $M_R = 1$
- Robot déplaçable :  $M_R = 0.74$
- Robot mobile :  $M_R = 0.48$

#### 4.2.5 Synthèse des indicateurs retenus

Le Tableau 4.2 synthétise les critères retenus pour l'évaluation du système de production.

Performance	Reconfigurabilité	Coûts	Maturité
Temps du produit dans le système	Modularité	Investissements	$M_R$
Taille des stocks	Intégrabilité	Coûts variables	
Nb de produits assemblés sur la période de simulation	Customisation		
% utilisation des ressources	Convertibilité		
% temps de panne des ressources	Capacité incrémentale (Scalabilité)		
% déplacement des ressources si mobiles	Capacité de diagnostic		

Tableau 4.2 – Indicateurs retenus

Les indicateurs de reconfigurabilité sont calculés grâce aux formules présentées au Chapitre 2, Section 2.3. Quant au montant des investissements, ils sont déterminés à partir de la valeur des équipements. Comme discuté Section 4.2.1, nous avons besoin de construire un modèle de

simulation pour obtenir les paramètres de performance du système à évaluer. La section suivante se penche sur les outils de simulation et d'optimisation pour la résolution de notre problème.

## 4.3 Simulation et optimisation

Cette section présente un état de l'art d'outils d'optimisation pour les problèmes associés au réglage des RMS. Puis un état de l'art concernant la SED appliquée aux RMS est présenté, avant de s'intéresser au couplage simulation-optimisation. A la lumière de cette revue de la littérature, nous présenterons une approche simulation-optimisation pour la résolution de problèmes consécutifs dans la conception du RMS : ordonnancement du film de production, détermination du nombre de ressources nécessaires, puis allocation des ressources.

### 4.3.1 État de l'art des méthodes d'optimisation et de simulation

#### 4.3.1.1 Méthodes d'optimisation

La résolution d'un problème d'optimisation consiste à trouver une solution optimale pour des variables, des contraintes, et un objectif donnés. Il s'agit de trouver le maximum ou le minimum d'une fonction objectif. Certains travaux étudient également la résolution de problèmes multi-objectifs, où plusieurs fonctions objectif doivent être maximisées ou minimisées en répondant éventuellement à des attentes contradictoires [Mar et al.04]. Ce problème est courant dans l'industrie, comme par exemple dans une situation où il est nécessaire de maximiser un service tout en minimisant les coûts.

Dans le cadre de nos travaux, nous traitons des problèmes d'optimisation combinatoire, c'est-à-dire d'optimisation discrète.

La complexité du problème va déterminer la méthode de résolution à sélectionner. La complexité algorithmique correspond au temps de calcul nécessaire pour résoudre le problème d'optimisation.

On parle de *méthode exacte* lorsque la solution obtenue est la meilleure solution au problème. Par opposition, les méthodes approchées permettent d'obtenir une solution satisfaisante au problème en un temps raisonnable. Ces méthodes sont utilisées pour la résolution des problèmes NP-difficiles (voir Section 3.2.3).

Une *heuristique* est une méthode approchée dédiée à un problème [Lac et al.03]. La méthode gloutonne est un exemple d'heuristique, utilisée par la méthode du plus proche voisin pour la résolution du problème du voyageur du commerce. Cette méthode présente cependant le risque d'obtenir un optimum local.

Une *métaheuristique* est également une méthode de résolution approchée, mais non dédiée à un problème et pouvant donc être réutilisée pour la résolution de problèmes variés [Lac et al.03]. La descente stochastique, le recuit simulé, la recherche tabou, sont des exemples de méta-heuristiques basées individu. Les algorithmes génétiques ou l'optimisation à colonie de fourmis font partie des méthodes à population. La section suivante détaillera certaines de ces méthodes appliquées à des problèmes d'optimisation pour la conception du RMS.

Par abus de langage, dans la suite du mémoire, nous parlerons d'optimisation au sujet des méthodes approchées de résolution.

Publication	Problème	Objectif(s)	Algorithme	Granularité	Cas d'usage
[Jac et al.97]	Configuration d'un atelier	N/A	Recherche tabou et recuit simulé	Atelier	N/A
[Wan et al.13]	Introduction de nouvelles ressources	Minimisation du nombre de machines; Maximisation du volume de production	Algorithme génétique	Ligne de production	Industrie automobile
[Kha et al.14]	Ordonnancement	Minimisation des opérations réalisées par des ressources additionnelles (Minimisation des coûts)	Algorithme génétique	Ligne de conditionnement	Ventilateurs
[Had et al.17]	Conception du RMS	Maximisation de la flexibilité et minimisation de du makespan	NSGA-II	N/A	N/A
[Had et al.18]	Sélection de machines pour la conception du RMS	Maximisation de la modularité du système; Minimisation du makespan; Minimisation du coût du système	Recuit simulé multi-objectif archivé (AMOSa)	Atelier	N/A
[Tou et al.18]	Génération de gamme	Minimisation des coûts; Minimisation du makespan; Minimisation des gaz à effet de serre	Recuit simulé et NSGA-II	Ligne de production	N/A
[Mag et al.19]	Ordonnancement des produits	Minimisation du makespan	Couplage métaheuristique et algorithme de liste	Ligne de production	Industrie automobile
[Tou et al.19]	Génération de gamme	Coût total de production; Temps de réalisation; Temps d'utilisation des machines	NSGA-II et heuristiques	Ligne de production	N/A

Tableau 4.3 – Approches par optimisation pour le réglage du RMS

#### 4.3.1.2 Optimisation pour le RMS

Pour une fonction objectif, des variables et des contraintes données, la résolution par optimisation permet de trouver la meilleure combinaison de paramètres pour piloter le système de manière efficace.

Les problèmes de détermination de la configuration du RMS sont complexes : plusieurs types de produits sont assemblés sur la ligne, les gammes comprennent de nombreuses étapes, avec des relations de précédence entre les tâches d'assemblage ; et nécessitent l'emploi de méthodes approchées. L'optimiseur peut être un outil commercialisé ou un module développé en interne. [Esk et al.11] ont comparé l'efficacité de deux logiciels commerciaux pour la résolution de problèmes académiques : OptQuest et Witness Optimizer. Les deux logiciels sont basés sur des combinaisons de métaheuristiques. Les auteurs concluent à une performance équivalente des deux logiciels.

Pour des besoins spécifiques, il peut être préférable de développer un module d'optimisation propre en utilisant une solution open source plutôt que d'utiliser une solution disponible sur le marché. Les principaux avantages d'une solution open source sont le coût et la liberté de paramétrage des contraintes.

Sur un niveau tactique ou stratégique, les méthodes d'optimisation servent lorsqu'il s'agit de satisfaire une nouvelle exigence du marché, et de garder un système réglé de manière optimale. [Wan et al.13] ont développé un algorithme génétique, avec pour objectifs la minimisation du nombre de machines à ajouter, et la maximisation du volume produit par le système. Le fonctionnement de l'algorithme génétique est le suivant : une première population de départ est générée. Cette population est évaluée au regard d'une fonction coût permettant d'analyser l'optimalité de la solution. Puis parmi cette population, les meilleures solutions (individus) sont sélectionnées, croisées, mutées (altération aléatoire des particularités d'un individu), ce qui permet d'engendrer la génération suivante. Par itération, cette méthode permet d'obtenir de très bonnes solutions au problème d'optimisation [Sou et al.13].

Au niveau opérationnel, [Tou et al.18] ont obtenu des résultats prometteurs en résolvant un problème multi-objectif de génération de gamme de fabrication pour un RMS par des méthodes évolutionnaires. Un problème similaire de génération de gamme a été obtenu par hybridation de métaheuristiques (algorithme génétique élitiste de tri non-dominé (NSGA-II) combiné à des heuristiques) [Tou et al.19]. Le NSGA-II, à la différence de l'algorithme génétique seul, utilise une approche élitiste, et comprend une étape de tri par rapport aux différents degrés de dominance entre les solutions [Deb et al.02]. Le problème résolu, multi-objectif, optimise le coût total de production, le temps de réalisation, et le temps maximum d'utilisation des machines pour un système produisant un type de produit.

Pour un problème de conception du RMS sous contraintes de non-disponibilité, [Had et al.17] ont également appliqué un algorithme NSGA-II pour la sélection de machines lors de la conception d'un RMS sous contraintes de non-disponibilité. Le double objectif est de maximiser la flexibilité du système et de minimiser le temps total de production. Les auteurs illustrent la méthode qui donne des résultats prometteurs, en l'appliquant à un problème académique.

Une fois le système de production conçu et en place, il est nécessaire de prendre les bonnes décisions pour gérer d'un point de vue opérationnel le système de production au quotidien. [Mag et al.19] ont proposé une méthode hybride de couplage entre une métaheuristique et un algorithme de liste pour l'ordonnancement des produits dans le cas d'une ligne d'assemblage couvrant la production de deux types de produits.

Les méthodes d'optimisation sont pertinentes pour déterminer la solution d'un problème spécifique. Cependant, dans les travaux cités, les temps de production sont calculés à l'aide de modèles mathématiques, qui calculent la durée totale de production en fonction des durées de chaque tâche de la gamme, mais ne prennent pas en compte les aléas tels que les pannes ou la non-régularité de l'entrée des produits sur la ligne. C'est pour cela que la simulation est un outil complémentaire, qui va permettre de construire un modèle de système de production plus proche de la réalité que les modèles d'optimisation. La simulation va permettre d'obtenir des paramètres de performance plus précis.

Le tableau 4.3 présente des approches par optimisation pour résoudre des problèmes adressés lors de la conception ou du réglage des systèmes flexibles et reconfigurables. Les publications sont classées suivant le type de problème, la nature de la fonction objectif, la méthode de résolution employée (algorithmique), la granularité du système de production, et le cas d'usage s'il est précisé. Cette synthèse permet de contextualiser les méthodes et d'identifier les solutions pertinentes suivant le type de problème.

Le problème le plus étudié dans la littérature dans ce domaine est l'ordonnancement des produits sur des lignes reconfigurables. Pour les problèmes abordés, les métaheuristiques sont largement utilisées. En particulier, le recuit simulé, qui par analogie avec le procédé de traitement thermique, autorise la sélection de solutions dégradant la fonction objectif avec une probabilité diminuant plus la température diminue, permettant ainsi de sortir d'optima locaux, est une métaheuristique connue, simple, et utilisée massivement pour des applications dans la vie réelle.

#### 4.3.1.3 Simulation pour le RMS

La SED permet d'évaluer la performance d'une ligne de production. La construction d'un modèle de simulation se divise entre les étapes suivantes : collecte des données d'entrée, construction du modèle, validation du modèle, puis exploitation du modèle pour des scénarios de simulation. L'état du système change seulement à des repères du temps discrets, possiblement aléatoires et non prévus au lancement de la simulation. La simulation fournit des estimations valides statistiquement de la performance du système et l'animation de la simulation permet la compréhension du comportement dynamique du système (opérationnel et tactique) [Alb et al.14]. Les KPIs obtenus couvrent le taux d'utilisation des machines, le temps dans le système, le nombre de produits finis, et les en-cours dans les stocks intermédiaires.

Le tableau 4.4 synthétise les cas d'usage abordés par SED pour les systèmes d'assemblage ou de production reconfigurables et flexibles. Les publications sont classifiées selon le cas d'usage, le logiciel de simulation utilisé, le principe, le type de variabilité (produit ou volume), le niveau de l'entreprise, et le type de résultat attendu par simulation. Cette vue globale montre l'utilisation de logiciels de SED variés, principalement pour l'étude de lignes multi-produits, avec une prépondérance de cas d'usage de l'industrie automobile.

[Hon et al.07], [Mic et al.16], [Ryb et al.16] et [Kou et al.19] utilisent le logiciel Witness pour la simulation, pour des cas d'usage en industrie automobile et aérospatiale. Il s'agit de s'adapter à une variabilité des variantes ou familles de produits, à l'échelle de la cellule de production ou du segment de ligne. [Gyu et al.12] se penchent également sur l'adaptation du système de production à une variabilité produit grâce à l'outil Plant Simulation de Siemens. [Hon et al.07] résolvent un problème d'équilibrage multi-produits dans un job shop. L'utilisation d'un modèle de simulation a permis de prouver l'apport de la reconfigurabilité avec amélioration des outils, mise à jour des machines ou ajout de machines dans l'atelier. L'optimisation du portfolio de produits donne également de bons résultats.

Publication	Logiciel de simulation	Principe	Variabilité	Granularité du système de production	Résultats	Cas d'usage
[Hon et al.07]	Witness	Job shop	Famille de produit	Segment	Équilibrage de ligne	Industrie aérospatiale
[Wey et al.11]	Siemens Plant Simulation	N/A	Volume	Site	Flexibilité en volume	Assemblage, industrie automobile
[Gyu et al.12]	Siemens Plant Simulation	Postes modulaires	Produit	Station et segment	Nombre de ressources nécessaires	Industrie automobile
[Voo et al.12]	Arena	Postes manuels	Produit	Ligne de production	Nombre produits assemblés et utilisation des ressources	Industrie textile
[Mic et al.16]	Witness	Robots mobiles	Produit	Segment	Productivité	Assemblage, industrie automobile
[Par et al.16]	ExtendSim	Postes en parallèle	Produit	Segment de ligne	Nombre produits assemblés et utilisation des ressources	Assemblage alternateurs
[Ryb et al.16]	Witness	Machines flexibles	Produit	Cellule	Utilisation des ressources	Industrie automobile
[Kur et al.17]	Siemens Plant Simulation	N/A	Volume	Site	Coût de l'utilisation des ressources	Industrie textile
[Kou et al.19]	Witness	Robots mobiles	Produit	Segment	Productivité	Assemblage, industrie automobile

Tableau 4.4 – Approches de conception et réglage du RMS par SED

Grâce à l'intégration de robots mobiles, [Mic et al.16] et [Kou et al.19] ont planifié la production d'une ligne d'assemblage multi-produits et amélioré la productivité du système, dont les résultats sont obtenus par SED. Le système reconfigurable obtenu nécessite un temps d'arrêt moindre lors du basculement de production d'un produit à l'autre. De plus, le taux d'utilisation des ressources est plus important que pour la ligne conventionnelle.

Pour modéliser les contraintes dues au nombre de ressources et évaluer les temps de production, [Gyu et al.12] ont simulé une ligne d'assemblage reconfigurable multi-produits dans le domaine de l'industrie automobile. La reconfigurabilité de cette ligne, dédiée aux produits fabriqués en petite quantité, est améliorée par l'intégration de postes de travail standards, modulaires et déplaçables. Les auteurs analysent également les effets de l'ordonnancement des produits en entrée de ligne. Pour un même volume et une même configuration de ligne, pour le cas étudié, l'ordonnancement fait varier le temps total de production jusqu'à 10 % de sa valeur moyenne. Les auteurs concluent sur l'importance du choix de l'ordre d'arrivée des produits, et ils relèvent également la pertinence de la SED pour la vérification du temps de production (makespan).

La simulation permet donc une bonne compréhension de la solution, mais ne permet pas de trouver la solution optimale [Kra et al.12]. Par conséquent, pour tirer profit des deux méthodes, la simulation et l'optimisation peuvent être utilisées sous forme d'un couplage des deux méthodes.

#### 4.3.1.4 Couplage simulation-optimisation pour le RMS

L'étude de la bibliographie concernant la conception du système reconfigurable et la reconfiguration de ligne de production met en évidence une large utilisation de la simulation pour l'étude du comportement du système et de l'optimisation pour la recherche de solutions. Des méthodes de couplage entre un module de simulation et un module d'optimisation sont également exploitées. Selon [Mär et al.11], [Kra et al.12] et [Chi et al.17], la simulation et l'optimisation ont chacune des avantages, qui peuvent se combiner lors d'un couplage entre les deux approches. Les avantages de la simulation sont la prise en compte de la complexité réelle des problèmes étudiés et d'événements aléatoires comme les pannes à travers une approche stochastique. L'optimisation permet l'identification de meilleures solutions, voire d'une solution optimale, à travers la recherche de solutions. Dans un couplage simulation-optimisation, une approche doit alimenter l'autre en résultats. La simulation permet de prévoir le comportement stochastique du système étudié pour un réglage donné déterminé par le module d'optimisation.

Sur la Figure 4.6 sont comparées les méthodes exactes, les métaheuristiques, la simulation et les simheuristiques (couplage entre la SED et une métaheuristique). Chaque méthode est évaluée sur une échelle allant de 0 à 3 selon les critères suivants : capacité à atteindre la valeur optimale (optimalité), capacité à traiter des problèmes de large échelle (scalabilité), capacité à représenter les caractéristiques d'un système réel (modélisation), capacité à gérer des scénarios non déterministes (incertitude), temps de calcul. On peut observer qu'il est avantageux d'associer les caractéristiques de la simulation, qui permet de construire un modèle fidèle à la réalité et de prendre en compte les caractéristiques aléatoires du système, et celles des métaheuristiques, qui permettent d'obtenir une bonne solution en un temps raisonnable pour toute taille de problème [Jua et al.15 ; Chi et al.17].

Les techniques d'hybridation simulation-optimisation peuvent être divisées entre les méthodes d'optimisation basées simulation et les méthodes de simulation basées optimisation [Fu02]. Dans le premier cas, la simulation est un supplément à l'optimisation permettant de générer des scénarios pour le modèle mathématique d'optimisation. Dans le second cas, le module d'optimisation est un sous-programme du logiciel de DES.

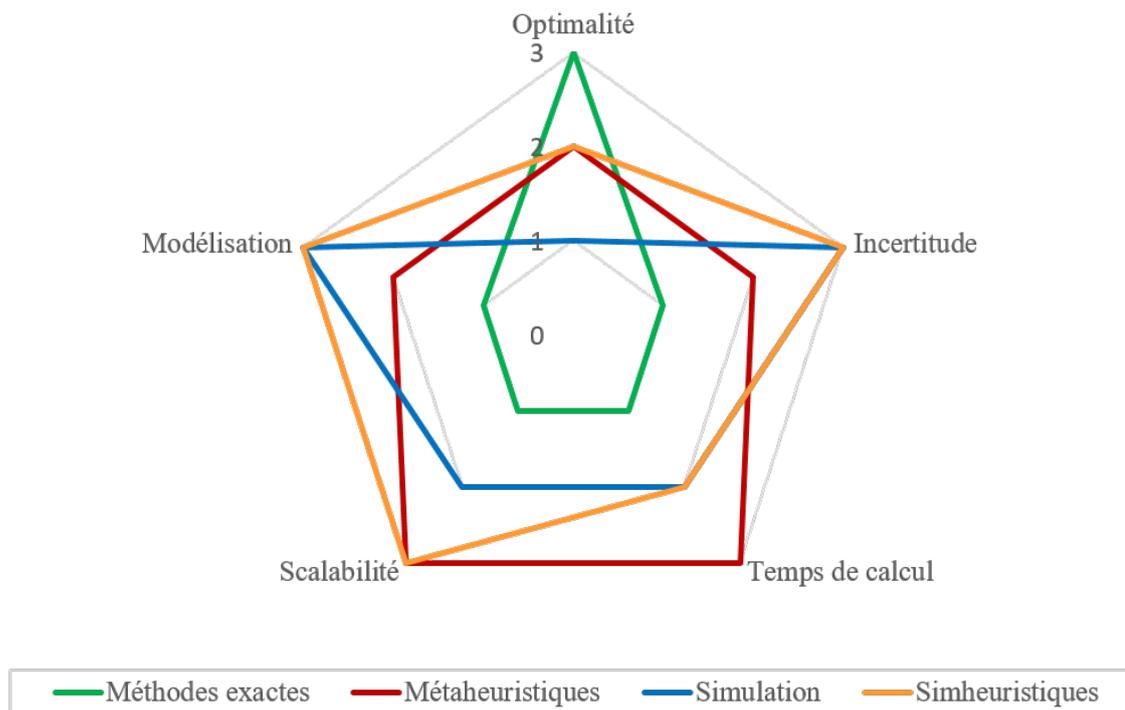


FIGURE 4.6 – Comparaison d’approches d’optimisation selon leur performance selon différentes dimensions (adapté de [Chi et al.17])

[Fig et al.14] et [Mär et al.11] ont proposé une classification plus fine de ces méthodes hybrides, selon l’objectif de la simulation, le nombre d’itérations, et le moment où des données transfèrent entre le modèle d’optimisation et le modèle de simulation. Les structures hiérarchiques, représentées Figure 4.7, sont divisées en quatre catégories :

- optimisation avec itérations basées sur la simulation (cas (a) Figure 4.7)
- simulation-optimisation alternées (cas (b) Figure 4.7)
- simulation puis optimisation (fonctionnement séquentiel) (cas (c) Figure 4.7)
- simulation avec itérations basées sur l’optimisation (cas (d) Figure 4.7)

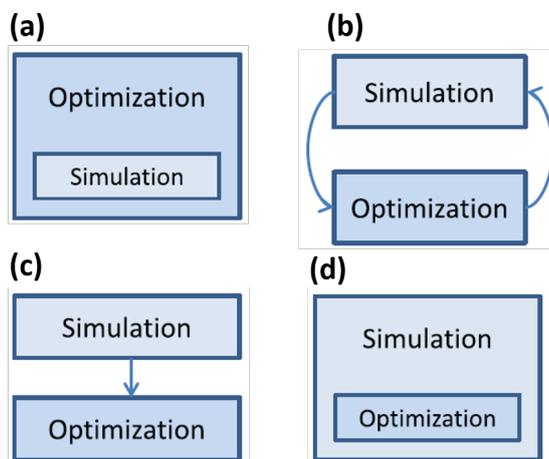


FIGURE 4.7 – Structures de couplage simulation-optimisation d’après [Fig et al.14]

Les auteurs distinguent trois objectifs principaux motivant la simulation : l'évaluation d'une solution, l'amélioration d'un modèle analytique, et la génération de solution. D'après la classification des auteurs, dans le cas d'un problème d'optimisation avec itérations basées sur la simulation pour l'évaluation d'une solution, la méthode de résolution est à sélectionner parmi les méthodes suivantes : méthodes de sélection statistiques (classement et sélection ou procédures de comparaison multiples), métaheuristiques, et métaheuristiques basées mémoire.

Les logiciels d'optimisation présents sur le marché, et intégrés à des logiciels de SED, comme le module OptQuest disponible dans Flexsim, Simul8 et Arena entre autres, peuvent se classer dans la catégorie optimisation avec itérations basées sur la simulation. Le sous-programme d'optimisation fournit au module de SED une solution à évaluer, et une estimation de la performance du système pour cette solution pourra être réalisée. Dans le cas où le module d'optimisation est conçu par l'utilisateur, l'interface entre l'optimisation et la simulation doit être conçue. Cette passerelle peut être construite via Excel [Deh et al.17]. Selon [Kra et al.12], il n'existe pas de méthode générique pour construire le modèle de simulation et paramétrer le module d'optimisation, dont la configuration se fait au cas par cas.

Le tableau 4.5 présente les cas d'usage abordés par un couplage simulation - optimisation selon le logiciel de SED utilisé, le type de module d'optimisation, l'approche, les sorties de l'optimisation et de la simulation et le cas d'usage qui illustre la démarche proposée. La synthèse montre que le couplage permet de résoudre des problèmes de détermination du nombre de ressources, d'ordonnancement, ou d'affectation. Nous n'avons pas observé de prépondérance d'un logiciel ou d'un algorithme en particulier.

[Aur et al.17] résolvent un problème d'optimisation de flow shop hybride par implémentation des algorithmes directement au sein du modèle de simulation (ExtendSim). Cette approche leur permet d'éviter la perte de temps lors de l'échange de données entre les deux modules. La méthode de combinaison utilisée est l'intégration de l'optimisation au sein de la simulation et l'utilisation de la simulation afin d'évaluer le résultat obtenu lors d'un cycle d'optimisation. Le planning de production est construit à l'aide d'une métaheuristique, et la simulation permet d'évaluer le temps total de production. [Mon et al.15] traitent l'élaboration d'un planning de livraison par couplage entre le logiciel de SED Simio et un algorithme de programmation linéaire. Le couplage consiste à tout d'abord lancer le module d'optimisation, puis à chaque cycle d'optimisation, le planning obtenu est évalué au travers de la simulation, comme décrit par [Mär et al.11]. L'utilisation des ressources est évaluée par la simulation afin de vérifier la qualité du plan de livraison généré par le module d'optimisation.

[Kra et al.12] et [Sil15] appliquent respectivement un algorithme génétique et un réseau de neurones pour la détermination du nombre ou de la répartition des ressources dans l'usine, et évaluent le coût de la solution ou la quantité d'en-cours grâce à la simulation. Le cas étudié par [Kra et al.12] est une ligne d'assemblage de moteurs multi-produits, avec ratio de mixte de produits variable.

Dans le cadre du projet ReCaM, [Col et al.18] proposent un agencement idéal de modules en optimisant de manière distincte chaque scénario de planification, qui correspond à un ratio de mixte de produits et à un volume donnés. L'horizon temporel est divisé en scénarios indépendants répartis sur les périodes considérées (Figure 4.8). Tous les scénarios sont pris en compte puis le comportement du système sur plusieurs scénarios est considéré en rajoutant la notion de probabilité de transition entre les scénarios. La méthode de résolution consiste à établir la liste de toutes les permutations possibles : ensemble de ressources modulaires à installer dans le système pour satisfaire la demande, puis à déterminer les transitions (reconfigurations) possibles entre les différents scénarios. Enfin, le coût global en prenant en compte les reconfigurations,

est calculé pour toutes les combinaisons possibles, et la solution minimisant la fonction coût est retenue. En dernier lieu, la SED permet de vérifier la robustesse de la solution en évaluant les paramètres de performance [Col et al.18]. Cette approche est originale car elle permet de visualiser plusieurs reconfigurations consécutives et le coût associé.

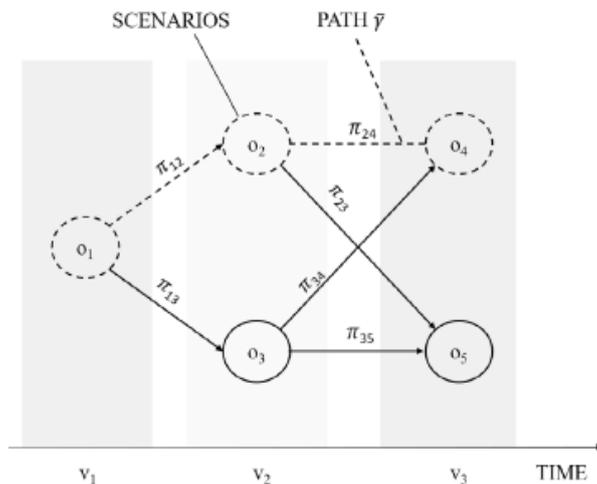


FIGURE 4.8 – Arbre de scénarios avec 5 scénarios et 3 périodes temporelles [Col et al.18]

Ces différentes méthodes permettent de mettre en évidence la pertinence de la simulation, par la prise en compte d'événements stochastiques et de l'optimisation par amélioration itérative de la solution dans un processus de conception du système reconfigurable.

#### 4.3.1.5 Conclusion de l'état de l'art

A travers une revue de la bibliographie sur l'optimisation, la simulation, et le couplage simulation-optimisation, la pertinence de ces outils est mise en évidence dans l'évaluation et le paramétrage du RMS en phase de conception ou de reconfiguration. L'optimisation via métaheuristiques fournit des solutions satisfaisantes dans le cas de problèmes complexes, et la simulation offre une analyse stochastique du système de production. Le couplage permet de bénéficier des avantages des deux méthodes. Cependant, les articles cités se concentrent principalement sur la résolution d'un problème unique. Une méthode couvrant à la fois l'ordonnancement, la détermination du nombre de ressources nécessaires et leur allocation dans l'atelier fait défaut.

La section suivante présente l'approche simulation-optimisation développée dans le cadre de nos recherches. Nous utilisons à la fois un module d'optimisation du marché, et un module développé en interne.

Publication	Logiciel de simulation	Module d'optimisation	Approche	Sortie optimisation	Sortie simulation	Cas d'usage
[Kra et al.12]	Siemens Plant Simulation	GAWizard (intégré à Plant Simulation)	Algorithme génétique	Nombre ressources	Coût de la solution	N/A
[Kra et al.12]	Siemens Plant Simulation	GAWizard (intégré à Plant Simulation)	Algorithme génétique	Séquence de production	Nombre produits fabriqués et utilisation des ressources	Assemblage moteur, industrie automobile
[Mon et al.15]	Simio	N/A	Linear programming	Plan de livraison	Utilisation des ressources	Système de production
[Sil15]	Arena	Fait maison (C++)	Réseaux de neurones	Répartition des ressources	Quantité en-cours	Répartition des machines dans un réseau intra-entreprise
[Aur et al.17]	ExtendSim	N/A	Metaheuristiques (recuit simulé, recherche tabou)	Planning de production	Temps total de production	Flow shop hybride
[Deh et al.17]	Simio	Matlab	Recuit simulé	Heure d'arrivée des patients	Coût évalué	Centre de soins
[Col et al.18]	N/A	N/A	Heuristique	Affectation des tâches et des ressources	Performance système	Assemblage de valves

Tableau 4.5 – Approches de conception et réglage du RMS par couplage simulation - optimisation

### 4.3.2 Structure de couplage mis en place

#### 4.3.2.1 Description du problème

Les deux premières étapes de la démarche de conception présentée au Chapitre 3 consistent à identifier le besoin en reconfigurabilité de l'entreprise, puis à choisir les briques technologiques pour la conception du système reconfigurable. Celles-ci seront précisées au chapitre suivant qui porte sur l'application à un cas d'usage. Il est ensuite nécessaire de dimensionner le nombre de ces briques à intégrer sur la ligne, ainsi que de déterminer leur emplacement optimal (affectation) dans l'atelier. Cette étape va garantir l'adéquation entre la structure du système de production et la demande client.

Dans cette section, nous présentons les méthodes employées dans nos travaux pour le réglage d'un système de production fabriquant plusieurs types de produits. L'ajustement du système se divise en trois problèmes consécutifs : un problème d'ordonnancement des produits, le dimensionnement du nombre de ressources nécessaires, et l'allocation des ressources sur les postes de travail. Les ressources considérées sont de type "robot déplaçable".

L'ordonnancement des produits en entrée de ligne sera également étudié, bien qu'il ne s'agisse que d'une étape intermédiaire avant d'atteindre un système hautement reconfigurable, performant malgré une liste d'arrivée des produits aléatoire.

#### 4.3.2.2 OptQuest-Simul8

Le premier couplage proposé se base sur le module OptQuest intégré au logiciel de SED Simul8, dont nous disposons au sein du laboratoire. OptQuest fonctionne grâce à une combinaison de trois métaheuristiques : un algorithme de recherche dispersée (scatter search - SS), un algorithme de recherche tabou (tabu search - TS) et des réseaux de neurones (neural networks - NN) [Esk et al.11]. SS est la méthode principale de recherche de solutions, pour la sélection de combinaisons de variables, la TS est utilisée dans le but d'éviter de réitérer des scénarios déjà testés, et le NN exclut les combinaisons pouvant donner des résultats trop faibles.

Les variables de décisions auxquelles OptQuest a accès sont sélectionnées parmi les variables du modèle Simul8, et des limites inférieures et supérieures sont définies. Les contraintes sont aussi construites à partir de paramètres spécifiés dans le modèle de simulation. Dans cette approche, le modèle de simulation doit donc être construit avant le paramétrage du module d'optimisation. L'optimisation est lancée pour un nombre de cycles déterminé par l'utilisateur ou pour une durée spécifiée.

La Figure 4.9 présente la structure du couplage. Le paramétrage des variables, des contraintes et de la fonction objectif se fait dans le module OptQuest, de même que le lancement de la procédure d'optimisation. Une première solution est générée par OptQuest dans le respect des valeurs limites spécifiées. La simulation est lancée avec ces paramètres, et OptQuest va récupérer en fin de simulation la valeur de la fonction objectif, calculée à partir des paramètres de performance obtenus par simulation. Le module d'optimisation va ensuite générer une nouvelle solution, et ainsi de suite jusqu'à ce que le critère d'arrêt soit atteint. Parmi les scénarios testés, la meilleure combinaison de variables sera retenue.

Le couplage OptQuest - Simul8 est adapté pour le problème d'ordonnancement et de détermination du nombre de ressources nécessaires sur la ligne.

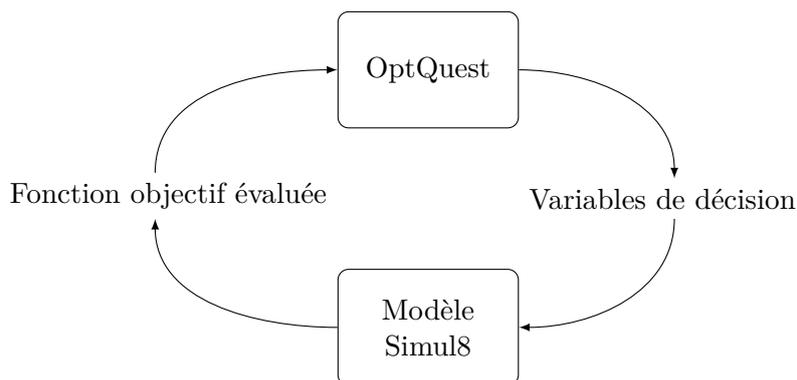


FIGURE 4.9 – Structure du couplage OptQuest - Simul8

### 4.3.2.3 Module d'optimisation externe-Simul8

Cependant, dans le cas de problèmes complexes nécessitant une modélisation sur mesure, les couplages simulation-optimisation proposés par les logiciels du commerce atteignent leurs limites. Dans le cas du problème d'allocation des ressources, le couplage OptQuest-Simul8 ne permet pas de résoudre ce problème. En effet, le logiciel de simulation ne peut pas extraire directement les données du module OptQuest, et en raison de caractéristiques intrinsèques de Simul8 sur la façon de configurer les ressources, il n'est pas possible de contrôler une variable correspondant à l'attribution d'une ressource à un poste, et ce pour chaque ressource et chaque poste dans le système.

Nous avons proposé un couplage avec module de simulation externe, développé sous Python, qui utilise un algorithme de recuit simulé (Simulated Annealing - SA) [Has et al.19]. Le choix s'est porté sur le SA en raison de sa simplicité en comparaison avec d'autres algorithmes, comme les algorithmes génétiques, plus complexes à paramétrer. De plus, dans des travaux précédents, le recuit simulé a montré de bons résultats [Gou et al.14]. La structure de l'algorithme est détaillée Figure 4.10, où  $N$  est le nombre de cycles, et  $M$  le nombre d'essais par cycles.

L'algorithme génère une première solution aléatoire, qui est évaluée au regard de la fonction objectif. Une nouvelle solution est générée, et la solution obtenue pour la fonction objectif est comparée à la simulation précédente. La meilleure combinaison de variables d'entrée est conservée, selon un profil de probabilité qui autorise le choix d'une solution moins bonne en début de résolution, ce qui permet de s'extraire des optima locaux. Lorsque le nombre de cycles défini par l'utilisateur est atteint, la résolution s'arrête. La solution alors obtenue est utilisée comme donnée d'entrée de la simulation. La Figure 4.11 résume la structure du couplage, analogue au cas (d) de la Figure 4.7 : simulation avec itérations basées sur l'optimisation.

Nous verrons au chapitre suivant l'application de cette méthodologie.

### 4.3.2.4 Conclusion

L'approche proposée consiste à résoudre trois problèmes d'optimisation du RMS en sélectionnant le couplage approprié en fonction de la complexité du problème considéré.

Pour des cas simples, nécessitant peu d'itérations pour trouver la configuration optimale du système, il ne sera pas nécessaire de faire usage d'un modèle d'optimisation, et la simulation sera utilisée seule pour calculer les paramètres de performance du système.

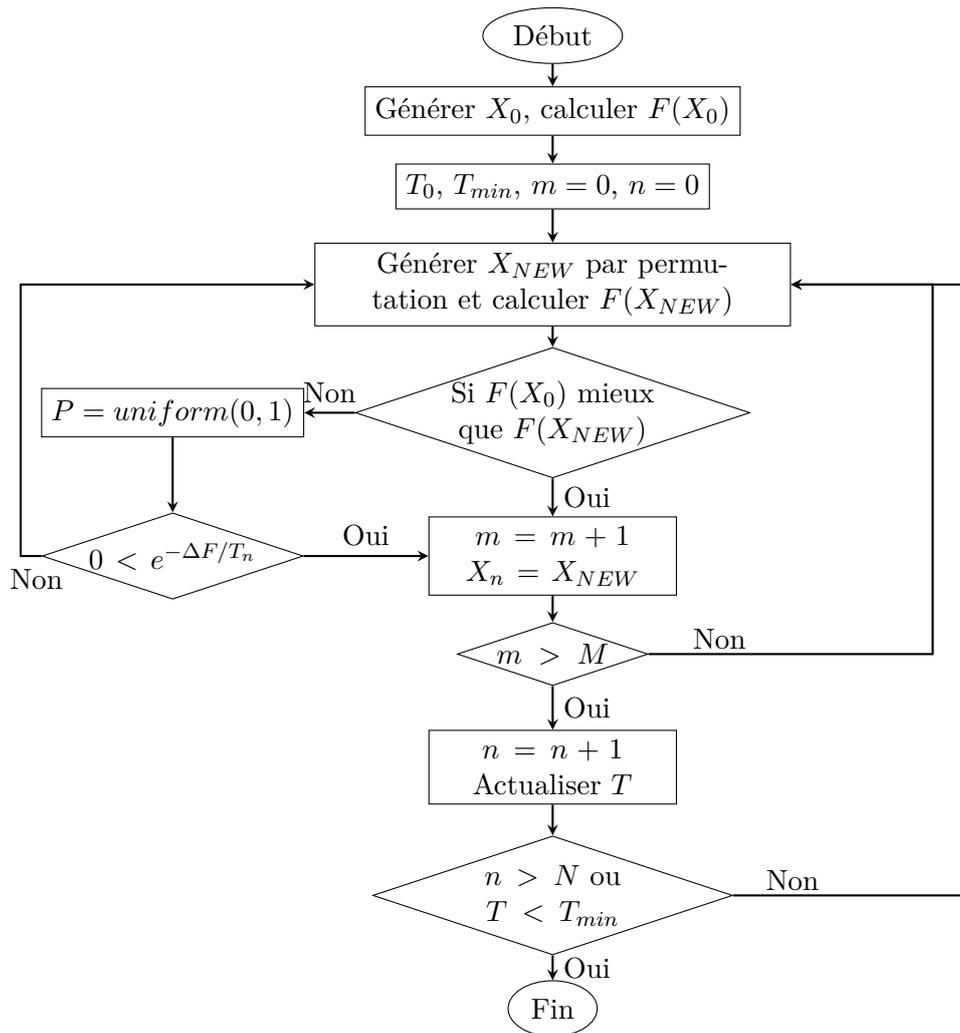


FIGURE 4.10 – Structure du recuit simulé [Has et al.19]

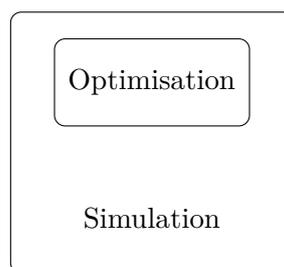


FIGURE 4.11 – Structure du couplage : Module d'optimisation externe - Simul8

Le couplage simulation-optimisation intervient dans la troisième étape de la démarche de conception du système reconfigurable. En entrée de cette étape, le système de production est modélisé mais non réglé. En sortie, nous obtenons une modélisation de la ligne reconfigurable dans sa configuration optimale.

Afin d'intégrer à la démarche la prise en compte du caractère incertain des scénarios de production simulés, la section suivante traite de l'application de la théorie de l'aide à la décision au problème de conception du système reconfigurable.

## 4.4 Problème de décision dans l'incertain

### 4.4.1 La conception du système reconfigurable, un problème complexe

L'ensemble des paramètres à prendre en compte pour la conception du RAS rend le choix final complexe. Dans ce chapitre, nous avons présenté des indicateurs variés, de natures différentes. Or il n'est pas possible de comparer sur une même échelle des indicateurs correspondant à des coûts fixes (investissements), des coûts variables, des indicateurs de performance, et de reconfigurabilité. De plus, une difficulté supplémentaire réside dans le caractère nouveau de ces derniers indicateurs, avec lesquelles les entreprises ne sont pas familières. Par ailleurs, ces indicateurs correspondent à un scénario de production. Si l'analyse couvre l'évaluation de plusieurs scénarios et de différentes stratégies d'implémentation de la reconfigurabilité dans le système au travers du choix de briques technologiques, il est difficile d'obtenir une vue globale des résultats. Dans le cas de scénarios consécutifs, une décision prise sur une période de production en amont aura des conséquences sur les périodes suivantes.

La conception du système reconfigurable a également la particularité de prendre en compte l'évolution de la production à fournir, qui suit l'évolution du marché, et qui ne peut être prévue de manière sûre à l'avance. Nous souhaitons évaluer l'impact de ces évolutions incertaines sur notre modèle de conception.

Ces raisons nous ont poussés à proposer d'appliquer la théorie d'analyse des risques en complément de la démarche [Bea et al.20b].

### 4.4.2 Théorie d'analyse des risques

L'analyse des risques pour l'aide à la décision porte sur l'étude des alternatives, des influences entre les paramètres et événements, et leur priorisation. Les domaines d'application de l'aide à la décision et de l'analyse de risques couvrent le monde de l'économie, l'analyse de risques en ingénierie ou dans le domaine environnemental, la médecine, les sources d'énergies, etc. Cette approche permet une décision basée sur un modèle statistique, qui limite les biais cognitifs du décideur [Tve et al.74].

Dans le monde automobile, [Tch et al.12] ont étudié la gestion des incidents industriels via la théorie d'aide à la décision. Via cette approche, il est possible d'évaluer l'impact des différentes causes d'incidents, leurs liens et les probabilités d'occurrence.

[Möl08] étudie un problème d'investissement dans un contexte incertain sur des périodes consécutives. L'auteur limite son étude à la construction d'un arbre de décision (voir section 4.4.3.2), et remarque à juste titre que l'arbre de décision seul ne permet de rendre compte de l'attitude vis-à-vis du niveau de risque du projet.

La Figure 4.12 illustre les étapes d'un processus de décision [Goo04; Las et al.16]. Dans un premier temps, la situation et les objectifs sont identifiés, puis les alternatives pour chaque décision sont décrites. Le problème est modélisé et les relations entre les éléments du problème sont définis. L'incertitude est modélisée par une représentation probabiliste de l'évolution du contexte, et les préférences du décideur sont également spécifiées. L'application de la démarche fournit une solution, qui correspond à la meilleure alternative selon les paramètres renseignés dans le modèle. Une analyse de sensibilité permet de vérifier la robustesse des résultats.

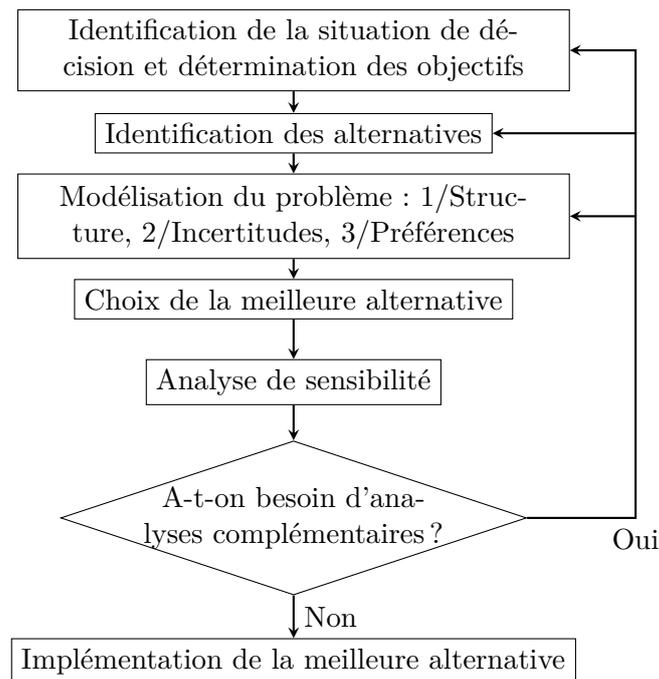


FIGURE 4.12 – Structure du processus de décision [Las et al.16]

### 4.4.3 Modélisation du problème de décision

#### 4.4.3.1 Diagramme d'influences

Le diagramme d'influences est une représentation formelle d'un ensemble de décisions, d'incertitudes, de valeurs et d'inférences [Las et al.16]. Il s'agit d'un graphe orienté acyclique qui est une extension des réseaux bayésiens [Cle et al.13]. Les nœuds correspondent à des distributions de probabilité et les arcs entre les nœuds à des dépendances entre ces distributions.

Dans la Figure 4.13, les trois types de nœuds sont représentés : nœud de décision, de chance et de valeur. Le nœud de décision représente un choix sous contrôle du décideur et se définit par un ensemble d'alternatives entre lesquelles le décideur doit choisir. Le nœud d'incertitude représente un paramètre hors de contrôle du décideur, défini par une distribution de probabilité. Les nœuds de valeur correspondent aux paramètres chiffrés du problème.



FIGURE 4.13 – Nœuds d'un diagramme d'influences

#### 4.4.3.2 Arbre de décision

L'arbre de décision est également un graphe orienté, et reprend les mêmes nœuds que définis dans le diagramme d'influence. A la différence de ce dernier, l'arbre de décision permet de représenter la séquentialité des événements et décisions. Chaque branche mène à un nœud terminal,

qui correspond à une valeur.

La Figure 4.14 présente un exemple d'arbre de décision pour le choix de la stratégie de déploiement d'une marque. Cet arbre présente deux nœuds de décisions suivis par un nœud de chance. Le premier choix que peut faire le décideur est celui du déploiement de la marque au niveau mondial, ou en France uniquement. Puis il peut choisir de conserver la gamme de produits existante, ou de lancer un nouveau produit. Des probabilités (non représentées sur la figure) sont associées aux nœuds de chance. L'enchaînement des événements entraîne des pertes ou des gains pour la marque, indiqués en face des nœuds terminaux.

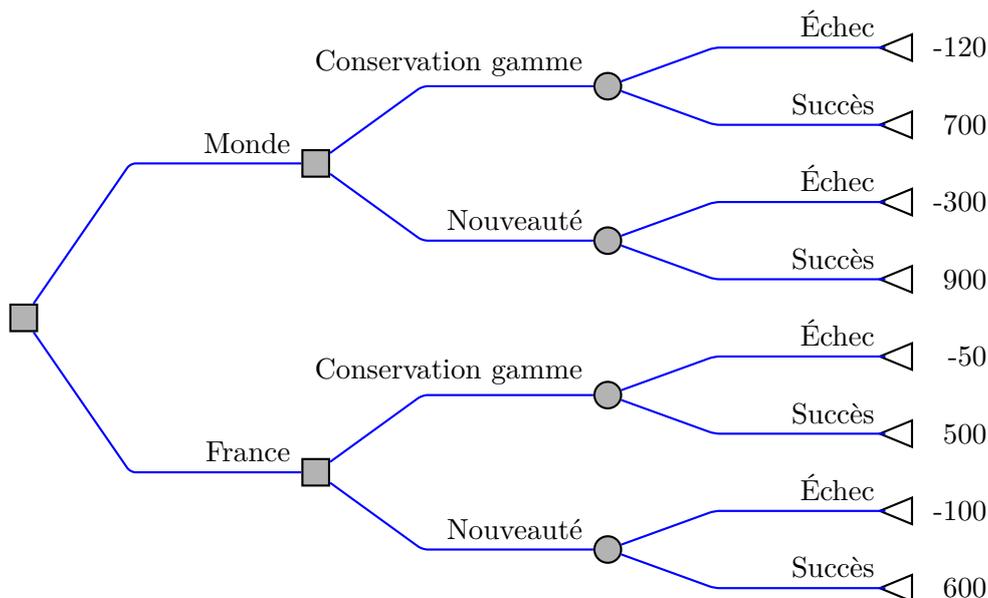


FIGURE 4.14 – Arbre de décision : Exemple de stratégie de déploiement d'une marque

#### 4.4.3.3 Fonction d'utilité multi-attributs

L'attitude du décideur face au risque est modélisée par la fonction d'utilité.

Le système des loteries équivalentes permet d'évaluer cette attitude face au risque. Pour cela, on propose au décideur de choisir entre deux loteries. Par exemple, il devra choisir entre percevoir un gain élevé avec une probabilité de 10 %, et de ne rien recevoir avec une probabilité de 90 %, ou percevoir un gain faible avec une probabilité de 50 % (et ne rien recevoir sinon). Le choix de la seconde loterie montrera une aversion au risque de la part du décideur. La concavité de la fonction d'utilité illustre l'aversion au risque, et inversement, une fonction d'utilité convexe montre un goût pour le risque.

Dans le cas d'un problème avec plusieurs paramètres, les loteries équivalentes permettent également la définition de la fonction d'utilité multi-attributs, qui pondère les différents attributs (paramètres du modèle).

#### 4.4.4 Résolution

Le principe de résolution des problèmes de décision est la maximisation de l'espérance mathématique du gain [Las et al.16]. La résolution se décompose en deux étapes :

1. roll-forward : calcul des gains finaux pour chaque nœud terminal de l'arbre de décision
2. rollback : calcul de la valeur espérée au niveau de nœuds de décision, et sélection des nœuds menant aux valeurs espérées maximales

En fin de résolution, le décideur se voit proposer, pour chaque nœud de décision, la sélection de l'alternative permettant de maximiser la valeur espérée.

#### 4.4.5 Raccord à l'outil d'aide à la décision

En résumé, la démarche de conception du RAS fournit des données d'entrée pour l'aide à la décision : critères de reconfigurabilité évalués, indicateurs de performance, et montant des investissements. Nous devons également renseigner des probabilités d'évolution du marché, évaluées en fonction du contexte économique, et encoder la fonction d'utilité par sélection de loteries équivalentes. La figure C.1 en Annexe C présente l'articulation entre ces différents outils.

## 4.5 Conclusion

Ce chapitre a présenté les outils nécessaires à l'application pratique de la démarche de conception du RMS présentée au Chapitre 3. Une analyse fonctionnelle a permis de définir le besoin pour l'utilisateur. Les critères de décision retenus pour le choix de la meilleure configuration comprennent des indicateurs de reconfigurabilité, de performance et de coûts.

Un état de l'art sur la simulation, l'optimisation, et le couplage de ces deux outils pour la résolution des problèmes liés au réglage des RMS/RAS est présenté. Puis notre approche pour le couplage simulation-optimisation est présentée. Deux formes sont proposées selon le problème à résoudre : module d'optimisation dans l'environnement de simulation ou optimisation par module externe.

Enfin, une approche probabiliste est proposée en se basant sur la théorie d'analyse des risques. Nous pouvons proposer au décideur, en fonction de son appétence pour le risque et de l'importance donnée à chaque critère d'évaluation, la meilleure solution au regard des probabilités d'occurrence des scénarios d'évolution du marché.

La méthodologie peut maintenant être appliquée sur des cas d'usage industriels.



# Chapitre 5

## Application à un cas d'usage industriel

### Sommaire

---

<b>5.1</b>	<b>Cas d'usage : Assemblage moteur . . . . .</b>	<b>90</b>
5.1.1	Ligne pilote multi-produits . . . . .	90
5.1.2	Scénarios . . . . .	92
<b>5.2</b>	<b>Identifier le besoin en reconfigurabilité . . . . .</b>	<b>93</b>
5.2.1	Besoin en reconfigurabilité . . . . .	93
5.2.2	Leviers de reconfigurabilité . . . . .	94
5.2.3	Comparaison des critères de reconfigurabilité . . . . .	95
5.2.4	Modèle du système de production . . . . .	96
5.2.5	Briques technologiques implémentées . . . . .	97
<b>5.3</b>	<b>Scénario de ramp-up - Première phase . . . . .</b>	<b>101</b>
5.3.1	Scénario . . . . .	101
5.3.2	Application de la démarche . . . . .	102
5.3.2.1	Identifier le besoin . . . . .	102
5.3.2.2	Modéliser le système . . . . .	103
5.3.2.3	Déterminer la meilleure configuration . . . . .	103
5.3.2.4	Reconfigurer le système . . . . .	103
5.3.3	Résultats . . . . .	104
5.3.3.1	Reconfigurabilité . . . . .	105
5.3.3.2	Performance . . . . .	106
5.3.3.3	Investissements . . . . .	106
5.3.3.4	Bilan Reconfigurabilité - Capacité des installations . . . . .	108
5.3.4	Conclusion du scénario . . . . .	108
<b>5.4</b>	<b>Scénario de ramp-up - Seconde phase . . . . .</b>	<b>109</b>
5.4.1	Scénario . . . . .	109
5.4.2	Application de la démarche . . . . .	109
5.4.2.1	Identifier le besoin . . . . .	109
5.4.2.2	Modéliser le système . . . . .	110
5.4.2.3	Déterminer la meilleure configuration et reconfigurer . . . . .	110
5.4.3	Résultats . . . . .	110
5.4.3.1	Reconfigurabilité . . . . .	110
5.4.3.2	Performance . . . . .	111
5.4.3.3	Investissements . . . . .	111

5.4.3.4	Bilan Reconfigurabilité - Capacité des installations . . . . .	112
5.4.4	Conclusion du scénario . . . . .	112
<b>5.5</b>	<b>Scénario de variation de ratio de mixte produit . . . . .</b>	<b>114</b>
5.5.1	Scénario . . . . .	114
5.5.2	Résolution avec robots déplaçables . . . . .	114
5.5.2.1	Identifier le besoin . . . . .	114
5.5.2.2	Modéliser le système . . . . .	115
5.5.2.3	Déterminer la meilleure configuration . . . . .	115
5.5.2.4	Reconfigurer le système . . . . .	118
5.5.3	Résolution avec robots mobiles . . . . .	118
5.5.3.1	Identifier le besoin en reconfigurabilité . . . . .	118
5.5.3.2	Modéliser le système . . . . .	118
5.5.3.3	Déterminer la meilleure configuration . . . . .	119
5.5.3.4	Reconfigurer . . . . .	119
5.5.4	Résultats . . . . .	119
5.5.4.1	Reconfigurabilité . . . . .	119
5.5.4.2	Performance . . . . .	120
5.5.4.3	Investissements . . . . .	123
5.5.4.4	Bilan Reconfigurabilité - Capacité des installations . . . . .	124
5.5.5	Conclusion du scénario . . . . .	124
<b>5.6</b>	<b>Scénario de variation de volume et ratio de mixte produit . . . . .</b>	<b>125</b>
5.6.1	Scénario . . . . .	125
5.6.2	Résultats . . . . .	126
5.6.2.1	Reconfigurabilité . . . . .	126
5.6.2.2	Performance . . . . .	126
5.6.2.3	Investissements . . . . .	127
5.6.2.4	Bilan Reconfigurabilité - Capacité des installations . . . . .	128
5.6.3	Conclusion du scénario . . . . .	129
<b>5.7</b>	<b>Application de la théorie d'analyse des risques . . . . .</b>	<b>129</b>
5.7.1	Scénarios . . . . .	129
5.7.2	Modèle . . . . .	130
5.7.2.1	Fonction d'utilité . . . . .	130
5.7.2.2	Diagramme d'influence . . . . .	130
5.7.2.3	Arbre de décision . . . . .	131
5.7.3	Résultats . . . . .	131
5.7.3.1	Choix suggéré . . . . .	131
5.7.3.2	Analyse de sensibilité . . . . .	133
5.7.4	Conclusion de l'analyse de risques . . . . .	133
<b>5.8</b>	<b>Conclusion . . . . .</b>	<b>135</b>

L'objet de ce chapitre est l'application de la démarche de conception du système reconfigurable sur plusieurs scénarios industriels, en contexte de variations en volume et en ratio de mixte produit. Dans un premier temps, le besoin en reconfigurabilité du système est identifié. Puis divers scénarios de demande sont testés, couvrant à la fois la conception en partant d'une feuille blanche, et l'intégration de briques reconfigurables à un système existant. Les scénarios portent sur les variations de la demande en volume et en ratio de mixte produit. Les résultats sont représentés via les indicateurs présentés aux Chapitres 2 et 4.

Un scénario simplifié est également étudié pour démontrer l'application de la théorie d'analyse des risques présentée au Chapitre 4. Ce scénario spécifique permet d'illustrer par étapes

une caractéristique spécifique de l'objet d'étude. L'objectif est de proposer au décideur des choix objectifs suivant des probabilités d'occurrence et en prenant en compte le goût du décideur pour le risque.

Ce chapitre permet d'illustrer la démarche avec un jeu de données test créé à partir d'une situation industrielle réelle.

## 5.1 Cas d'usage : Assemblage moteur

### 5.1.1 Ligne pilote multi-produits

Le cas d'usage industriel de ce chapitre est une ligne d'assemblage de moteurs thermiques dans l'industrie automobile. Deux types de moteurs sont assemblés sur cette ligne qui comporte vingt postes, automatiques ou collaboratifs, faisant travailler l'opérateur et des ressources robotisées dans le même espace.

Deux types de moteurs sont assemblés sur la ligne : moteur essence trois cylindres, aussi appelé moteur EB, et moteur diesel quatre cylindres (aussi dénommé DVR). La gamme qui décrit les opérations d'assemblage est optimisée de manière à équilibrer et lisser les temps des opérations entre les postes pour les deux moteurs. La gamme est conçue pour trois cadences : 30s, 60s et 90s. Chaque poste comprend entre une et treize tâches d'assemblage, réalisées en séquentiel ou en parallèle, dans un temps inférieur ou égal à la cadence. Les tâches sont réalisées par des bras robotisés ou un opérateur.

La stratégie de construction de la gamme et de répartition des tâches entre opérateur et robots est la suivante : pour les postes qui comprennent des tâches manuelles, l'opérateur doit avoir un taux d'occupation proche de 95%. Puis les robots viennent en support prendre en charge les opérations restantes non manuelles, en parallèle des tâches réalisées par l'opérateur, pour respecter la cadence. Ce choix lors de la conception de la gamme explique pourquoi les robots sont relativement peu chargés en comparaison avec les opérateurs. La Figure 5.1 montre un exemple de la répartition des tâches entre l'opérateur (en blanc) et les ressources robotisées (en couleur) pour un des postes de la ligne.

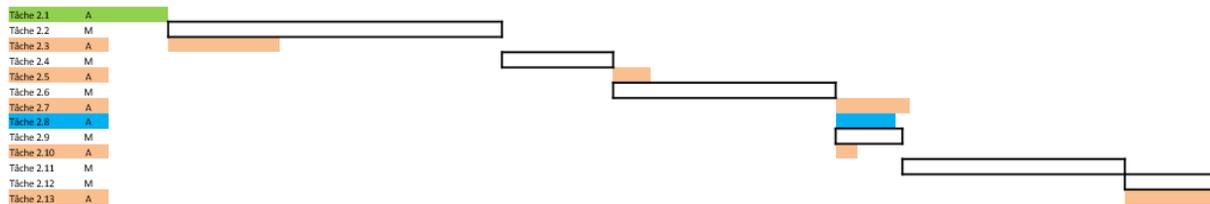


FIGURE 5.1 – Tâches d'assemblage du poste 2

La gamme respecte également des contraintes de précédence entre les opérations d'assemblage sur le produit.

Les tâches communes aux deux types de moteurs sont, dans la version pour une cadence de 90s, majoritairement réalisées par l'opérateur. Les tâches spécifiques au moteur essence (en bleu sur la Figure 5.1) et diesel (en rose), sont effectuées de manière automatique. Pour passer aux cadences supérieures (60s et 30s), l'opérateur est délesté de certaines opérations, afin d'atteindre la cadence désiré. Les tâches automatisées dans ce cadre sont alors réalisées par des robots collaboratifs en parallèle du travail de l'opérateur. La variation de volume de production ne modifie donc que la répartition des tâches communes aux deux produits entre opérateurs et ressources robotisées.

Avec l'assemblage de deux moteurs différents et une gamme définie pour trois cadences, le cas d'usage présenté permet d'étudier la variabilité de production en terme de types de produits et de volume.

	<b>Problème de conception du RAS</b>	<b>Scénario de ramp-up</b>	<b>Scénario mixte produit</b>	<b>Scénario mixte et volume</b>
<b>Données d'entrée</b>	Gamme avec précédences, durée des opérations d'assemblage, prix des ressources, volume de production et ratio de mixte produit	Gamme avec précédences, durée des opérations d'assemblage, prix des ressources, variations en volume	Gamme avec précédences, durée des opérations d'assemblage, prix des ressources, variations du ratio de mixte produit	Gamme avec précédences, durée des opérations d'assemblage, prix des ressources, variations en volume et ratio de mixte produit
<b>Variables</b>	Configuration du système de production, briques technologique sélectionnées	Nombre de robots déplaçables	Nombres de robots déplaçables et mobiles, implantations en I, U et S	Nombre de robots déplaçables
<b>Défauts/Aléas</b>	Variations imprévues de la demande	Demande plus faible que prévue puis décroissance de la demande	Variations de mixte journalières	Introduction d'un nouveau produit
<b>Données de sortie</b>	KPIs, critères de reconfigurabilité, investissements	KPIs, critères de reconfigurabilité, investissements	KPIs, critères de reconfigurabilité, investissements	KPIs, critères de reconfigurabilité, investissements

Tableau 5.1 – Description de l'objet d'étude

Le Tableau 5.1 présente, pour chaque scénario, les données d'entrée du problème de conception du RAS, les variables sur lesquelles il est possible d'agir afin de comparer des scénarios, les aléas subis par le système, et les données de sortie.

En entrée, nous avons la gamme d'assemblage et les relations de précédence entre les opérations, les durées de ces opérations, et le prix des ressources. Les variables, sur lesquelles agit la démarche de conception du RAS, sont la configuration, le choix de brique technologique, le volume de production et le ratio de mixte produit. Les aléas sont les variations de la demande du marché, qui ont lieu après le démarrage du système et creusent un écart entre les prévisions et la demande réelle. Les données de sortie de notre problème sont les critères de performance, de reconfigurabilité et les investissements. A travers la démarche, et une mesure des indicateurs grâce à des outils (simulation et optimisation), un optimum entre ces données de sortie est recherché.

### 5.1.2 Scénarios

Deux types de scénarios sont abordés dans la thèse :

- Conception à partir d'une feuille blanche
- Reconfiguration d'un système existant

Le premier point correspond à la conception d'un RMS à partir d'un atelier vide. Ce cas de figure a l'avantage de laisser la liberté de sélectionner les meilleures solutions technologiques à disposition et l'implantation qui semble la plus pertinente avec peu de contraintes. Cependant, cette situation est coûteuse en raison du coût d'acquisition des équipements et de la nécessité d'avoir la surface disponible pour la construction de la nouvelle ligne. Les groupes industriels historiques ont rarement la marge de manœuvre leur permettant de concevoir une ligne en partant de zéro. De plus, leur système de production doit fonctionner en continu, et ce également pendant la modernisation des installations. La transformation d'un système existant correspond à une amélioration du niveau de reconfigurabilité par intégration d'équipements reconfigurables sur une ligne DMS ou FMS.

La Figure 5.2 présente le scénario de demande construit avec le partenaire industriel. Ce scénario fictif, mais construit à partir de données réelles, s'échelonne sur dix ans et rend compte des variations saisonnières, mensuelles, et hebdomadaires. Il intègre également des variations importantes en volume, l'introduction d'un nouveau produit et la variation du ratio de mixte entre les deux types de produits. Dans nos expérimentations, nous nous sommes pliés à l'exercice de considérer le scénario comme non connu à l'avance, comme en situation de production réelle. N'est fixé à l'avance que le prochain mois de production, et la tendance pour les trois mois à venir est également connue.

Les quatre scénarios présentés dans ce chapitre sont extraits de ce scénario global. Dans un premier temps, un scénario de ramp-up seul est étudié (années 1 et 2), ce qui correspond à la situation de conception d'un système reconfigurable à partir d'une feuille blanche. Puis un scénario de ramp-up suivi d'une baisse de volume (années 1 à 4) est considéré, afin de mettre en évidence l'impact d'un changement de tendance brusque et inattendu sur un système fixe et un système conçu pour être reconfiguré. Ces deux scénarios se rapportent à un cas de variabilité en volume mono-produit. Le troisième scénario étudié correspond à une demande peu variable en volume mais avec des variations du mixte produit (années 7 et 8). Le quatrième cas modélise une variation de la demande à la fois en volume et en mixte produit (années 5 et 6).

Les scénarios étant définis, la section suivante porte sur la première étape de la démarche de conception du RMS : étudier le besoin et les limites de l'installation industrielle en terme de

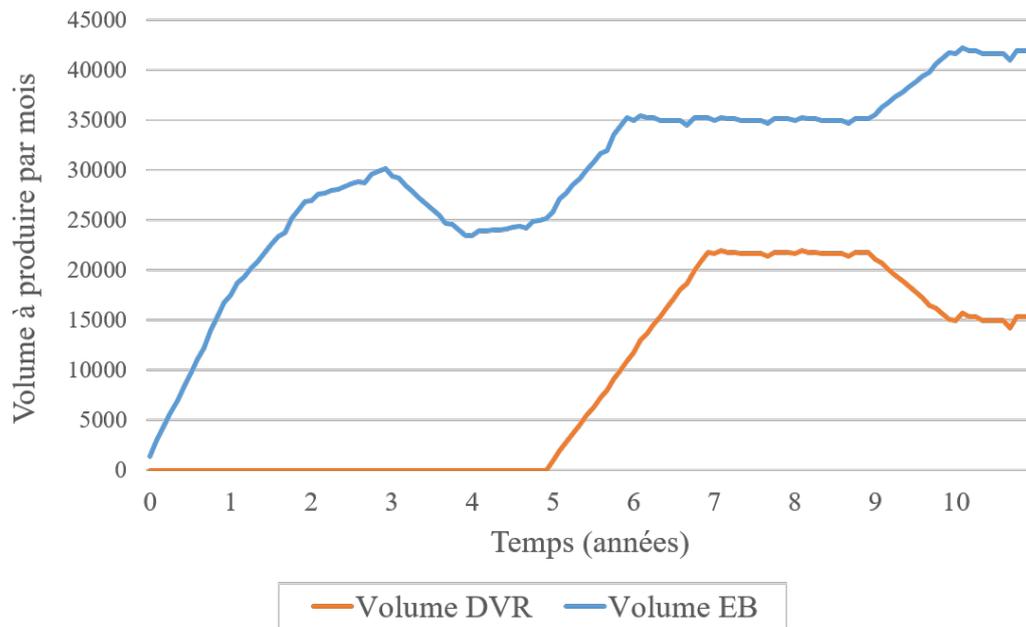


FIGURE 5.2 – Scénario de demande des moteurs EB et DVR

reconfigurabilité.

## 5.2 Identifier le besoin en reconfigurabilité

Cette section présente l'identification du besoin en reconfigurabilité au sein des lignes assemblage moteur du Groupe PSA, comme présenté Section 3.2.1. Cette étude a fait l'objet d'une publication [Bea et al.19].

Huit experts au sein du Groupe PSA ont été interrogés. Ces personnes ont été sélectionnées en raison de leur champ d'expertise en lien avec la problématique de reconfiguration d'atelier et d'usine. Parmi eux, le directeur d'un site de production, et des ingénieurs en industrialisation, production, et logistique, de différents sites de production. Ces domaines ont pour point commun d'être directement ou indirectement impactés par la structure et la transformabilité de l'appareil industriel. Les interviews ont été conduits individuellement avec chacun.

### 5.2.1 Besoin en reconfigurabilité

Les réponses des volontaires ont permis de mettre en relief de fortes attentes concernant une plus forte flexibilité et des capacités de reconfiguration des lignes.

Dans l'industrie automobile, les volumes sont élevés, de l'ordre de plusieurs centaines de milliers d'unités par an par ligne de production. Aujourd'hui, l'industriel propose plusieurs familles de produits, au sein desquelles se distinguent des variantes. La tendance actuelle est une augmentation du nombre des variantes et de la fluctuation du mixte produit de semaine en semaine. Dans un même temps, la durée du cycle de vie des produits diminue, c'est-à-dire que le taux de renouvellement des produits est supérieur. Ces éléments abondent dans le même sens : un besoin supérieur en capacité de transformation du système de production, dans le but de s'adapter à de nouveaux produits sur des cycles de production de plus en plus courts. Par ailleurs,

les personnes interviewées ont également fait part d'un besoin croissant en terme de volume de production. Certaines usines de l'entreprise ont déjà atteint leur capacité maximale, avec un fonctionnement en quatre équipes (week-ends travaillés). Cette estimation de l'augmentation du volume de production explique l'intérêt des experts pour une amélioration de la capacité incrémentale (scalabilité) du système de production. La reconfigurabilité en volume est pertinente pour couvrir la hausse attendue, ou une éventuelle baisse des volumes, dans le cas d'une prévision erronée.

Pour résumer, d'après l'échantillon interrogé, le système de production idéal dans le futur est un système capable d'absorber les variations de mixte de produits, l'introduction de nouvelles variantes ou familles de produits, et de suivre les variations de volume. En outre, le constructeur investit aujourd'hui le marché du véhicule électrique, ce qui impacte fortement le système de production. Les nouveaux produits diffèrent en terme de taille, géométrie, et procédés de fabrication.

### 5.2.2 Leviers de reconfigurabilité

Après avoir identifié les besoins de l'industriel à partir de l'expérience des besoins passés et prévus dans le futur, il est possible de recenser, pour le cas étudié, les leviers et les limites du système installé au regard de la reconfigurabilité. Les principales limitations concernent l'architecture logicielle du système, complexe et dont les modules, ajoutés au fur et à mesure, sont cloisonnés. Les participants ont évoqué des automates vieillissants, dont les langages de programmation obsolètes complexifient l'interfaçage lors de l'intégration de ressources de nouvelle génération. L'implantation des lignes est actuellement fixe, notamment en raison de la présence de convoyeurs au tracé figé à travers l'usine.

Les entretiens ont également permis de souligner les éléments déjà présents dans les usines qui vont faciliter l'amélioration de la reconfigurabilité de l'usine. Actuellement, dans les usines dites "mécaniques" qui produisent les moteurs du Groupe PSA, les lignes d'assemblage sont flexibles, mais non reconfigurables, et permettent de produire plusieurs variantes de moteurs d'une même famille. Des AGVs filoguidés sont à ce jour déployés dans les usines pour des tâches de kitting. Des contrôles qualité en temps réel sur différents postes de la ligne ont déjà lieu, permettant de rendre compte au plus tôt de dérives qualité.

Le Tableau 5.2 résume les leviers et réserves émis par les participants à l'étude.

Leviers	Restrictions
<b>Station de travail</b> : postes de travail manuels avec une facilité d'intégration de robots légers collaboratifs	<b>Architecture</b> : système très automatisé avec architecture logicielle complexe ; automates vieillissants impliquant un interfaçage délicat avec de nouveaux équipements
<b>Logistique</b> : flexibilité grâce à l'acheminement de kits sur la ligne d'assemblage par AGV	<b>Implantation et transport des produits</b> : implantation fixe limitée par le tracé des convoyeurs et lignes compactes résultant d'améliorations continues
<b>Ligne d'assemblage</b> : lots de 1 pour les variantes d'une même famille de produits	<b>Ligne d'assemblage</b> : ligne dédiée par famille produit
<b>Qualité</b> : détection en temps réel des défauts aux postes de contrôle	

Tableau 5.2 – Leviers et limites au regard de la reconfigurabilité [Bea et al.19]

La dernière section du questionnaire soumis aux experts interrogés concerne la comparaison

par analyse AHP (voir Section 2.3.7) des critères de reconfigurabilité, dont les résultats sont présentés dans la section suivante.

### 5.2.3 Comparaison des critères de reconfigurabilité

Parmi les huit personnes interrogées, seules six ont donné des réponses cohérentes au regard des critères de l'AHP [Goe13]. Ces six réponses, présentées Figure 5.3, sont classées suivant les domaines de compétence des répondants. Les valeurs indiquées correspondent à l'importance relative des caractéristiques de reconfigurabilité en terme de pourcentage. Les réponses varient selon le métier et le niveau de management.

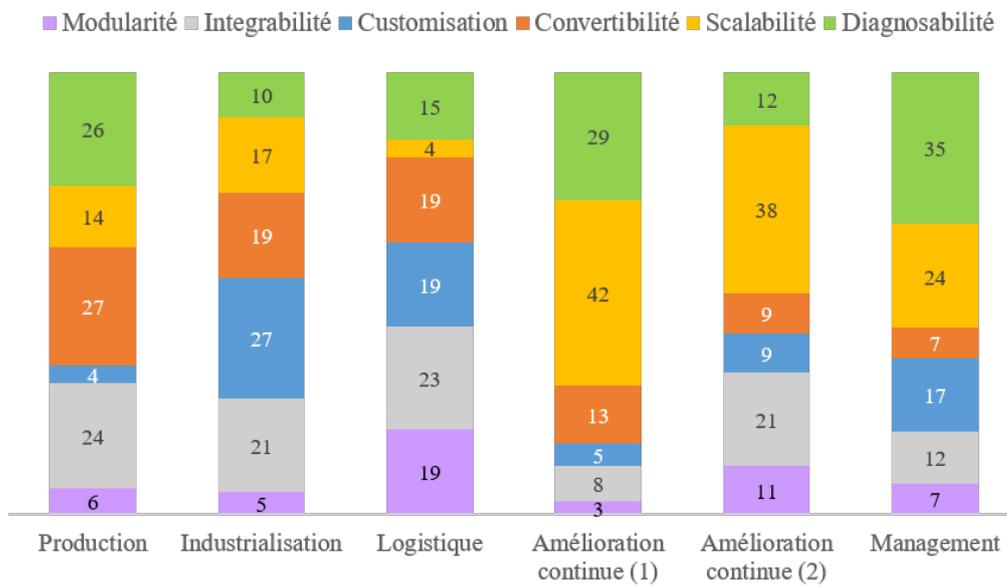


FIGURE 5.3 – Pondération des caractéristiques de la reconfigurabilité selon le domaine [Bea et al.19]

D'après l'expert venant de la production, la capacité de diagnostic, la convertibilité et l'intégrabilité ont une importance équivalente et prévalent par rapport aux trois autres caractéristiques. Cet expert a souligné l'importance du niveau de qualité pour l'entreprise, et l'effort actuel nécessaire pour adapter le système à de nouvelles exigences en terme de produit à travers l'intégration d'équipements.

Du point de vue de l'industrialisation, les caractéristiques les plus importantes sont la customisation, puis l'intégrabilité et enfin la convertibilité. En effet, l'enjeu en industrialisation est d'être capable d'ajuster le système selon le type de produit. La capacité à intégrer des composants sans un arrêt prolongé de la ligne est également crucial pour réduire les temps d'arrêt et améliorer la reconfigurabilité du système sur le critère du temps de reconfiguration. Pour l'expert du métier logistique, l'intégrabilité est également une composante importante.

La logistique gère l'interface entre le magasin et la ligne d'assemblage, ce qui explique une sensibilisation à l'intégrabilité de tous les sous-systèmes de la supply chain. Pour l'expert du métier logistique, la modularité, la customisation et la convertibilité sont d'importance équivalente, suivies par la capacité de diagnostic. Enfin, la scalabilité est considérée comme une capacité mineure.

Les deux personnes interviewées du département amélioration continue exercent dans deux usines d'assemblage de moteurs différentes du Groupe PSA. Les réponses des intéressés se rejoignent sur une prépondérance donnée à la capacité d'investissement incrémental. L'argument avancé est le besoin actuel des lignes d'amortir une demande croissante de la part du marché automobile, ce qui n'est pas possible avec le système de production actuel. La scalabilité permet également d'accompagner l'augmentation du volume en phase de ramp-up et sa décroissance en fin de cycle de production d'un produit.

Enfin, la réponse concernant le domaine du management correspond à l'entretien mené avec le directeur d'un site de production du groupe industriel étudié, qui se place sur un niveau de décision stratégique. Les caractéristiques de la reconfigurabilité qui ont le plus d'importance à ses yeux sont la capacité de diagnostic suivie par la capacité d'investissement incrémental. Le directeur d'usine a une vision long-terme du développement de l'entreprise, et une forte responsabilité en terme de satisfaction client. Cela entraîne des attentes élevées au niveau de la qualité des produits pour ne pas perdre de parts de marché.

Alors que la modularité est un concept récurrent dans les recherches actuelles sur les systèmes reconfigurables, les participants n'ont montré que peu d'attrait pour cette caractéristique. Aucun d'eux n'a cité la modularité parmi les trois caractéristiques les plus importantes à leurs yeux. Ceci peut s'expliquer par le fait que les caractéristiques critiques de la reconfigurabilité sont la customisation, la scalabilité et la convertibilité, tandis que la modularité, l'intégrabilité et la capacité de diagnostic sont des caractéristiques permettant un changement rapide de production, mais elles ne sont pas critiques [Kor et al.10].

Grâce à l'évaluation par AHP des caractéristiques de reconfigurabilité au regard de leur importance pour le RAS, nous avons pu observer que les pondérations obtenues diffèrent suivant les domaines d'expertise des personnes interrogées. Cependant, les réponses des répondants du même domaine (amélioration continue) sont cohérentes entre elles. Pour la suite de l'étude, nous utiliserons les pondérations fournies par l'expert en industrialisation moteurs. Les autres réponses couvrent un spectre plus large, incluant la production de boîtes de vitesses et arbres de transmission. La réponse de l'industrialisation correspond au plus près au cas étudié (assemblage moteurs).

La section suivante propose une modélisation du système de production reconfigurable, qui permet de représenter la construction d'un système à partir de briques technologiques.

#### 5.2.4 Modèle du système de production

Nous avons proposé une représentation du système de production par diagramme UML de classes, chaque classe représentant un type de ressource [Bea et al.18]. La modélisation permet de représenter le système de production à différentes échelles, de l'outil jusqu'à l'échelle du site de production. Les données de la gamme sont également représentées. La représentation UML permet de montrer les associations et dépendances avec généralisations ou compositions, et de préciser la multiplicité entre les éléments, afin de représenter le système de production.

La Figure 5.4 représente le modèle du système fixe actuel. Actuellement, les lignes de production sont organisées en flux continu (flow shop layout), constituées d'une succession de postes de travail entre lesquelles circulent des convoyeurs fixes. Chaque poste de travail est dédié à une séquence de tâches d'assemblage, et à un type de produit. Les caractéristiques du produit, les tâches à réaliser et les ressources allouées sont fixées avant le démarrage de la ligne. Le modèle est centré sur le poste de travail, qui est caractérisé par les ressources, les tâches d'assemblage et son emplacement dans l'usine. Les ressources peuvent être un opérateur, des outils, des bras

robotisés ou des machines spéciales. La ressource "robot" possède un outil en bout de bras. L'opérateur peut soit réaliser une tâche en utilisant seulement ses mains, soit un outil comme une visseuse, ou actionner une machine spéciale, qui peut être manuelle ou activée automatiquement. Un poste de travail peut inclure entre 0 et plusieurs ressources de chaque type, qui sont fixes. Des tâches de la gamme sont attribuées à chaque poste. Dans le cas d'un atelier d'assemblage, le produit principal est enrichi de composants qui sont assemblés au fur et à mesure sur le produit d'origine. Ces composants sont approvisionnés via des bacs logistiques en bord de ligne, ou par kitting (approvisionnement des pièces à l'opérateur sous forme de lot pour chaque produit).

La Figure 5.5 présente le modèle du système de production reconfigurable, enrichi de manière exhaustive des solutions technologiques présentées Section 5.2.5.

L'idée principale commune aux propositions est de diminuer les dépendances spécifiques entre les équipements et de diminuer les contraintes liées à l'emplacement des machines. Dans le modèle du système reconfigurable, des ressources robotisées déplaçables (sur chariot) ou mobiles (sur AGV) sont introduites. Les outils, grâce à des interfaces standardisées, peuvent être partagés entre ressources robotisées et opérateurs. L'intégration de robots non dédiés à un poste de travail en particulier implique que la ressource déplaçable réalisera des tâches de la gamme différentes selon son allocation sur la ligne. En ce qui concerne la logistique, le convoyeur modulaire est représenté sous la forme d'une agrégation de sous-ensembles correspondant à des modules de convoyeurs. Pour s'affranchir du convoyeur, le modèle proposé intègre le déplacement des produits sur AGV.

La représentation du modèle Figure 5.5 est exhaustive et il n'est pas forcément pertinent d'implémenter simultanément toutes ces solutions technologiques.

Cette représentation montre l'articulation entre les composants du système de production et représente les liens entre produit, ressources, et gamme. Ce modèle sert de base à la modélisation du système de production dans l'environnement de SED. Il permet également de visualiser les briques du système et sert de support de discussion avec les décideurs pour décrire le système de production.

### 5.2.5 Briques technologiques implémentées

A partir de l'étude du système existant et à la lumière des briques technologiques identifiées lors de la revue de la bibliographie au Chapitre 2 Section 2.1.7, nous identifions les voies d'amélioration suivantes :

- changer d'outil en bout de bras de robot ou mettre à disposition de plusieurs outils pour l'opérateur.
- ne pas dédier un outil à l'automatisation ou au travail manuel uniquement. Il serait plus intéressant que les outils aient une interface commune pour les machines et les opérateurs, afin que le même outil puisse être employé de manière manuelle ou automatique selon le besoin.
- ne pas attribuer une ressource à un poste de travail à long terme. Si la ligne n'est pas chargée au maximum de son potentiel, la ressource fixe risque d'être sous-utilisée, car elle ne peut servir qu'au poste de travail où elle est positionnée. Les interfaces entre ressources et postes de travail doivent être repensées afin d'avoir des solutions déplaçables, et prêtes à être mises en fonctionnement rapidement après reconfiguration (solution "Plug and Produce").
- les postes de travail sont géographiquement limités dans l'usine à cause du caractère fixe des ressources.



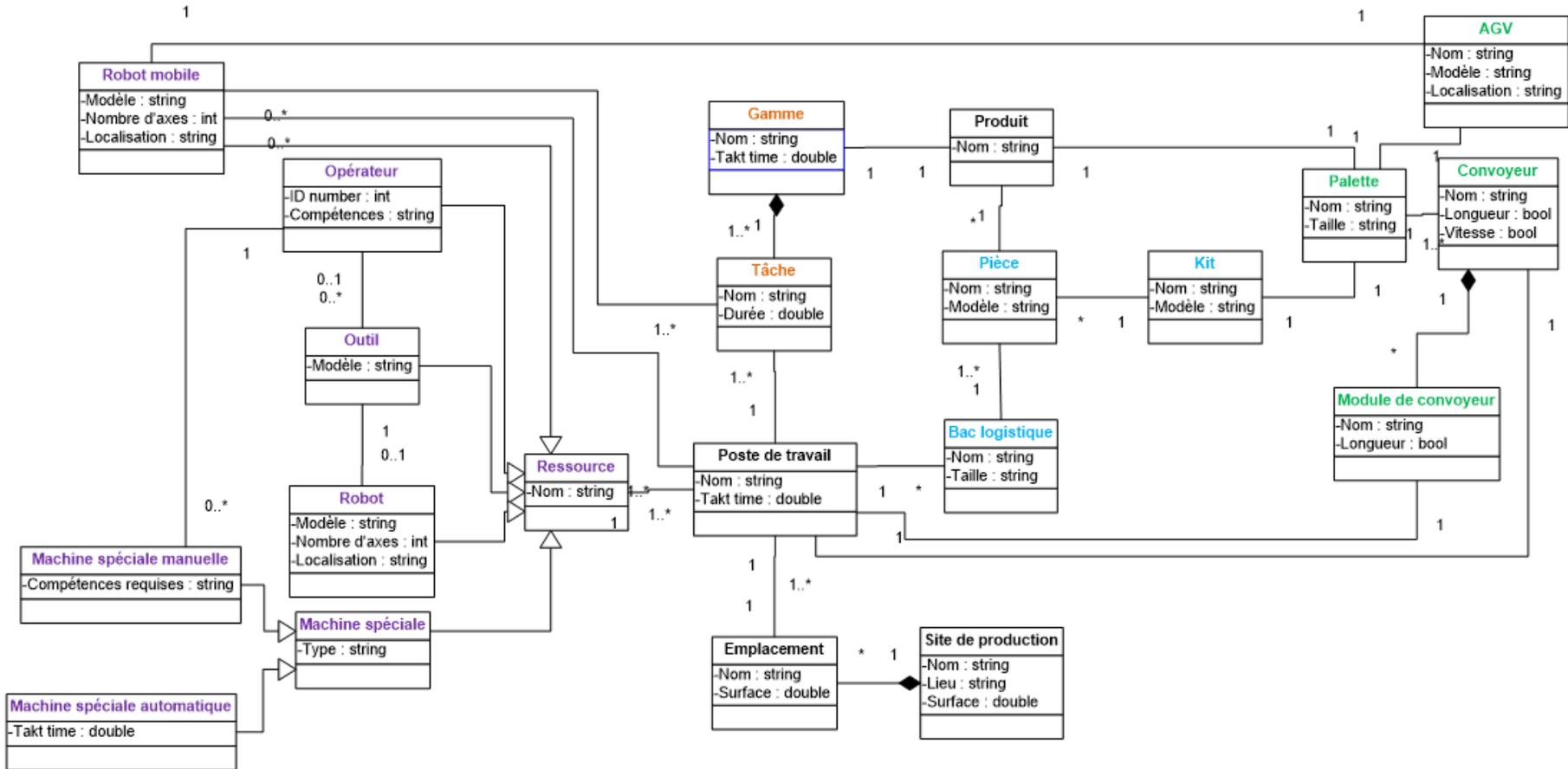


FIGURE 5.5 – Diagramme UML de classes du système reconfigurable [Bea et al.18]

- les bacs d'approvisionnement en bord de ligne sont encombrants. Dans l'usine faisant l'objet du cas d'usage de nos travaux, une des stations d'assemblage a une surface de 150 m<sup>2</sup>, pour l'insertion sur les moteurs de six pièces de quelques centimètres. La surface du poste s'explique par la nécessité de stocker toutes les tailles de pièces disponibles.
- les convoyeurs qui assurent le trajet du produit entre les postes figent l'architecture des lignes et la séquence d'assemblage des produits. Repenser la structure des convoyeurs ou envisager un autre mode de transport des produits entre les stations de travail pourrait permettre de s'affranchir de la rigidité actuelle des convoyeurs.

Suite à ces observations, il émerge une nécessité de réduire les dépendances spécifiques entre composants du système, ainsi que les dépendances spatiales. Il en découle les propositions de briques technologiques suivantes.

Afin de réduire la dépendance spatiale de la ressource sur le poste, nous proposons dans un premier temps d'intégrer des ressources déplaçables. Le principe est de monter un robot léger, de type robot collaboratif, sur un chariot déplaçable par l'opérateur. La reconfiguration de la ligne se fait par déplacement des robots, qui peut se faire à une fréquence de l'ordre de quelques jours. L'intégration du robot déplaçable permet l'ajustement des ressources, ce qui n'est pas possible actuellement, car il est nécessaire d'arrêter complètement le système de production pendant une à trois semaines pour déplacer des machines. Ce temps de transport du matériel, calibration, et montée en cadence serait considérablement réduit jusqu'à moins d'une heure. Cette solution augmente la capacité du système à s'adapter à une variation de la demande en volume (scalabilité). En ajoutant plus de ressources sur la ligne et en parallélisant les tâches d'assemblage, la cadence peut en effet être réduite.

Cette solution ne permet cependant pas une reconfiguration en temps réel plusieurs fois par jour. Pour aller plus loin, nous suggérons de placer les ressources robotisées sur des plateformes mobiles de type AGV. Les déplacements du robot mobile peuvent être soit planifiés à l'avance selon un planning de production défini en amont, soit pilotés en temps réel si le film de production n'est pas défini en avance. L'intégration de ce type de ressource implique une intégration verticale du système d'information afin que le système d'exécution puisse commander les déplacements du robot sur la ligne. Cet aspect n'est pas couvert par nos travaux et est posé comme hypothèse. Par ailleurs, le robot mobile n'est viable que s'il n'est pas en permanence en déplacement. Si la ressource est trop régulièrement en mouvement, les solutions fixes et déplaçables doivent être considérées, ou bien la gamme doit être corrigée afin de revoir l'équilibrage des tâches entre les postes. La valeur limite du taux acceptable de déplacement en comparaison avec le temps effectif de production dépend principalement du coût relatif de la solution par rapport à une ressource non mobile. La Figure 5.6 montre un exemple d'une solution robotisée mobile pour l'industrie automobile : deux robots collaboratifs de type Kuka iiwa sont montés sur une plateforme mobile développée dans le cadre du projet européen ScalABLE 4.0<sup>1</sup>.

Pour augmenter la facilité de changement du tracé des convoyeurs dans l'usine, un convoyeur composé de blocs facilement montables et démontables est envisagé, comme représenté Figure 5.7. Le convoyeur résultant répondrait aux mêmes exigences en terme de performance, mais pourrait être réagencé plus rapidement. Cependant, l'amélioration de la modularité du système se ferait au détriment du coût, car un tel convoyeur nécessiterait des interfaces le rendant plus coûteux qu'un convoyeur classique.

Une alternative au convoyeur modulaire qui permet une totale liberté pour le transport des produits est le transport du produit par AGV. Étant donné les coûts associés, une solution

---

1. Projet Européen Horizon 2020 (<https://www.scalable40.eu/>)



FIGURE 5.6 – Robots collaboratifs sur plateforme mobile (à gauche)(source : projet ScalABLE 4.0)

raisonnable pourrait être de combiner une section de ligne fixe avec transport des produits par convoyeur, et des postes isolés entre lesquels les produits sont transportés par AGV. Il est pertinent d’attribuer aux postes du segment de ligne en série des tâches génériques à tous les types de produits, puis de réaliser les opérations spécifiques aux variantes sur des postes isolés, sur lesquels ne transitent que les produits concernés. La Figure 5.8 montre le transport de produits sur AGV, ici des moteurs électriques en cours d’assemblage dans l’usine de Trémery du Groupe PSA. Cette configuration permet une plus grande liberté d’adaptation du tracé du flux.

Le besoin en reconfigurabilité du cas d’étude étant défini et les principales solutions technologiques permettant d’augmenter la capacité de transformation du système étant déterminées, les sections suivantes présentent l’étude de plusieurs scénarios de production. Dans un premier temps, des scénarios de variation en volume sont présentés, avant d’étudier un scénario de variation de mixte produit.

## 5.3 Scénario de ramp-up - Première phase

### 5.3.1 Scénario

Le scénario de ramp-up illustre la situation de conception à partir d’un atelier vide. Le scénario étudié correspond aux deux premières années du scénario présenté en Figure 5.2, détaillé Figure 5.9. La montée en cadence est importante et régulière. Ce scénario porte sur une variation en volume de la production d’un unique type de produit (moteur essence EB). Nous avons publié les résultats de ce scénario dans [Bea et al.20a].



FIGURE 5.7 – Convoyeur modulaire [Soh et al.14]



FIGURE 5.8 – Flux des produits sur AGV (source : Groupe PSA)

## 5.3.2 Application de la démarche

### 5.3.2.1 Identifier le besoin

L'identification du besoin en reconfigurabilité au sein des usines mécaniques de l'industriel étudié a été présentée en Section 5.2.

Avec des volumes élevés et un marché soumis à des fluctuations difficiles à prévoir, l'industriel a besoin d'installations modulaires capables de s'adapter à des variations en volume.

La solution technologique à implémenter est choisie parmi les technologies présentées Section 5.2.5. Dans le scénario présent, le système de production accompagne une croissance forte de la demande, pour passer de la production de 2 moteurs le premier jour, jusqu'à atteindre plus de 300 moteurs en fin de scénario.

L'identification du besoin a permis de mettre en lumière le besoin d'un système plus modulaire et permettant d'intégrer des équipements grâce à des interfaces standardisées. Pour ce cas d'étude, nous choisissons d'implanter des robots déplaçables. Ces ressources ne se déplacent pas d'elles-mêmes, et sont fixes pendant la durée d'une équipe. Les robots déplaçables peuvent

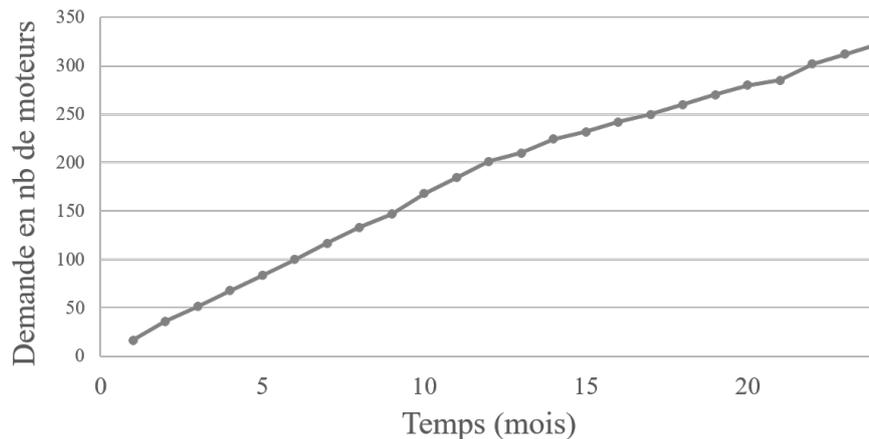


FIGURE 5.9 – Scénario de demande [Bea et al.20a]

être installés ou retirés simplement sur la ligne d'assemblage grâce à la plateforme déplaçable sur laquelle il est fixé, des interfaces de branchement adéquates et un calibrage rapide.

L'objectif de ce scénario sera de comparer selon les indicateurs décrits Section 4.2.1 un système "classique" fixe, constituée de machines spéciales et de robots fixes, avec la ligne reconfigurable, équipée de robots collaboratifs sur chariots déplaçables. Il sera ensuite possible de conclure, grâce à la méthode de conception du RAS proposée dans cette thèse, si le RAS est pertinent pour ce scénario du cas d'usage.

### 5.3.2.2 Modéliser le système

La ligne pilote a été modélisée dans l'environnement de SED Simul8 2019 Version 26.0 Build 3677. Le modèle entier est représenté Figure B.1 en Annexe B. Les taux de performance de la ligne, présentés Section 5.3.3, sont calculés grâce à cette simulation.

### 5.3.2.3 Déterminer la meilleure configuration

La stratégie de conception pour le scénario de ramp-up, donnée d'entrée définie par l'industriel, est d'embaucher en premier lieu seulement des opérateurs, et aucune ressource robotisée avant que ce ne soit indispensable. Une première équipe d'opérateurs est ouverte, puis une deuxième équipe, et enfin une troisième équipe. C'est seulement à partir de ce stade que les robots déplaçables sont intégrés un à un.

Les résultats des taux d'utilisation des ressources fournis par la simulation, présentés dans la suite Section 5.3.3, permettent d'intégrer les ressources au moment où elles sont nécessaires.

### 5.3.2.4 Reconfigurer le système

Des experts de l'entreprise étudiée ont été consultés pour définir le déclencheur de reconfiguration. La limite a été fixée pour un taux d'utilisation des ressources supérieur à 95%. Cette valeur est pertinente en phase de montée en cadence. Quand cette limite est atteinte, il est nécessaire d'augmenter le nombre de ressources dans l'atelier pour décharger la ressource arrivée à la limite de sa capacité.

En suivant cette règle, dans le scénario étudié ici, des robots déplaçables ont été ajoutés. La Figure 5.10 montre la disposition et le nombre de ressources (a) au début du scénario et (b) en fin de ramp-up, après ajout des ressources déplaçables. Au fur et à mesure des reconfigurations, les tâches sont redistribuées entre les ressources. Sur la figure, les couleurs permettent d'identifier la correspondance entre ressources et postes. Dans ce scénario, bien que la ligne soit représentée dans une configuration en "U", l'implantation n'a pas d'importance. Les ressources ne se déplaçant pas au cours d'une journée de production, les temps de trajet entre les postes n'ont pas d'influence sur les résultats. La représentation en "U" est ici arbitraire.

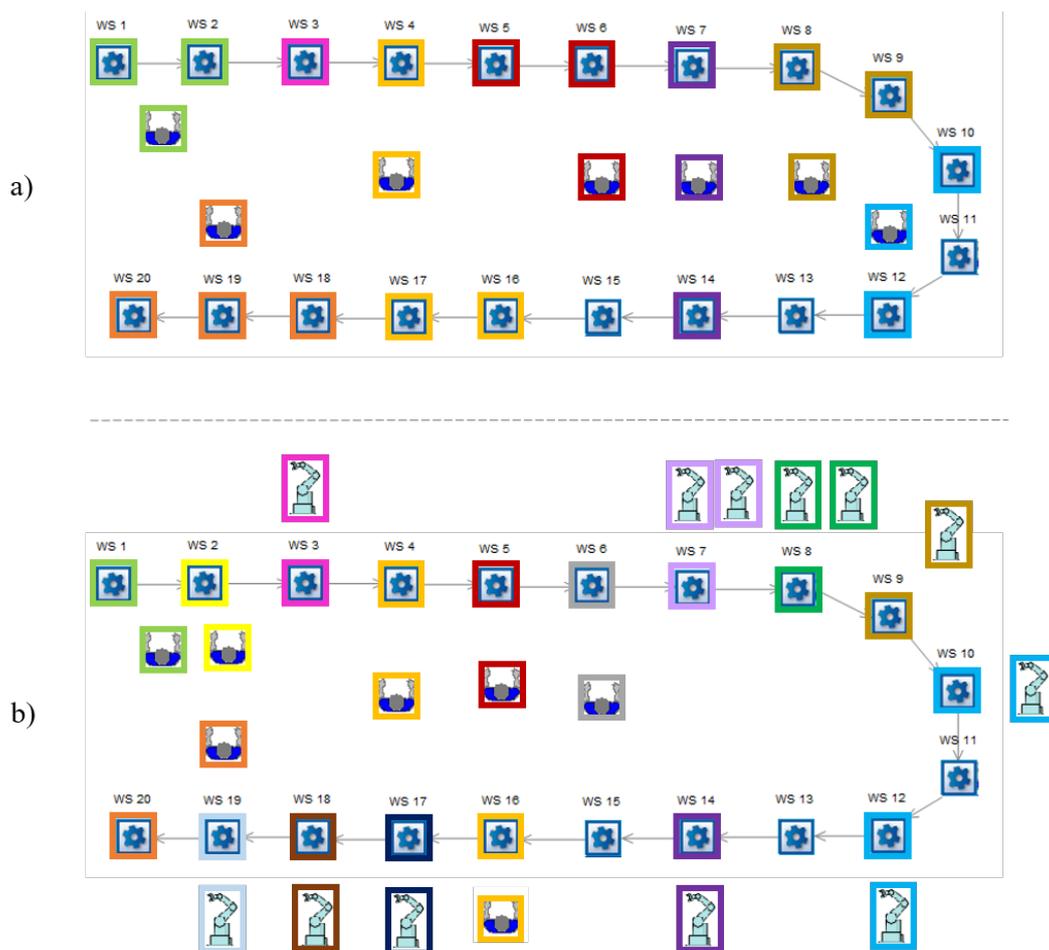


FIGURE 5.10 – Représentation schématique des 20 postes de la ligne a) au début du scénario b) en fin de ramp-up [Bea et al.20a]

### 5.3.3 Résultats

Cette section résume les résultats du scénario de ramp-up au travers des indicateurs de reconfigurabilité, performance, et coûts. Ils correspondent aux données obtenues après plusieurs itérations successives de la démarche, et reconfigurations à chaque ajout de ressource supplémentaire.

### 5.3.3.1 Reconfigurabilité

Les caractéristiques de reconfigurabilité du robot déplaçable sont comparées au score de l'installation existante, constituée de robots fixes et de machines spéciales. La Figure 5.11 représente les valeurs de la capacité incrémentale (scalabilité), la convertibilité, la modularité, l'intégrabilité et la customisation.

Les taux de reconfigurabilité de la machine spéciale et du robot fixe sont très proches. En dehors d'un taux de convertibilité correct, les valeurs des indicateurs sont très faibles, notamment pour la capacité d'investissement incrémentale, et la modularité du système. Ces valeurs traduisent d'une part la capacité du système existant à basculer de la production d'une variante à une autre, comme c'est déjà le cas sur les lignes d'assemblage moteur. D'autre part, elles illustrent l'impossibilité actuelle d'adapter la capacité de production en volume, ou de réorganiser des sous-ensembles de la ligne.

Concernant la brique technologique "robots déplaçables", la mesure des indicateurs de reconfigurabilité montre une amélioration des cinq indicateurs en comparaison avec le système de production actuel. La capacité incrémentale et la modularité sont les caractéristiques qui affichent les plus fortes progressions. Ces taux sont corrélés avec la fait que l'ajout de robots déplaçables implique la présence de modules "Plug and Produce" sur la ligne.

Les valeurs des indicateurs de reconfigurabilité permettent de mesurer de manière quantitative des caractéristiques évaluées jusqu'ici par intuition, qui s'avèrent être vérifiées. Les valeurs numériques vont également pouvoir être utilisées comme données d'entrée pour le problème d'aide à la décision multi-attribut en contexte incertain, évoqué Section 4.4.2.

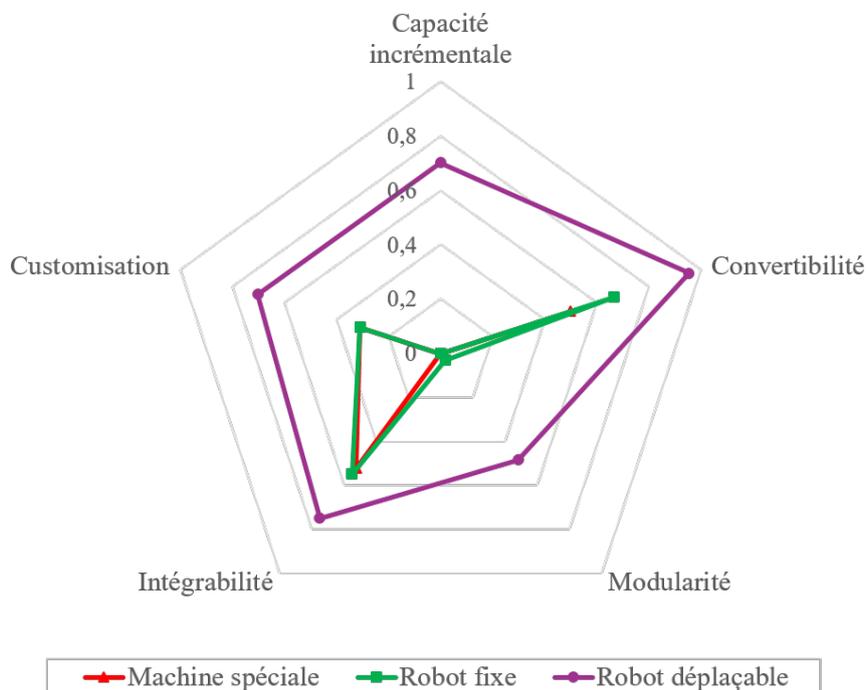


FIGURE 5.11 – Caractéristiques de reconfigurabilité pour le système fixe et le RAS [Bea et al.20a]

A partir des valeurs de la capacité incrémentale, convertibilité, modularité, intégrabilité et customisation, la valeur globale de la reconfigurabilité  $R$  est calculée comme décrit Section 2.3.7. La pondération retenue issue de l'analyse AHP pour les valeurs des  $\omega$  est celle donnée par l'expert

de l'industrialisation (Section 5.2.3). Le critère de la capacité de diagnostic n'étant pas considéré dans l'application numérique, les résultats de l'analyse AHP sont repris en retirant les résultats de la comparaison entre la diagnosabilité et les autres caractéristiques. Les pondérations retenues sont :  $\omega_S = 0.17$  ;  $\omega_{C_v} = 0.24$  ;  $\omega_M = 0.05$  ;  $\omega_I = 0.35$  ;  $\omega_{C_m} = 0.19$ . L'équation (5.1) rappelle le calcul permettant d'obtenir la valeur de la reconfigurabilité  $R$ .

$$R = \omega_S.S + \omega_{C_v}.C_v + \omega_M.M + \omega_I.I + \omega_{C_m}.C_m \quad (5.1)$$

Les valeurs obtenues sont les suivantes :

- Machine spéciale :  $R = 0.36$
- Robot fixe :  $R = 0.41$
- Robot déplaçable :  $R = 0.77$

Ces valeurs vont permettre dans la suite de noter globalement la solution technologique et le scénario.

### 5.3.3.2 Performance

La Figure 5.12 présente les taux de charge des ressources robotisées du 5<sup>ème</sup> au 12<sup>ème</sup> mois, obtenus par simulation. Pour ce scénario de montée en cadence, le taux d'occupation des machines est l'indicateur de performance retenu. L'objectif est de maximiser ce taux, afin de rentabiliser les investissements effectués lors de l'achat des ressources. Les autres indicateurs présentés en Section 4.2.5 ne sont pas pertinents ici : dans la résolution du scénario, nous avons choisi d'ajouter systématiquement les ressources nécessaires à la satisfaction de la demande en moteurs. En fin de scénario, dans le modèle de simulation, il n'y a donc pas d'en-cours, tous les produits de la liste à fabriquer sont assemblés car les ressources sont en nombre suffisant. Sur la durée de simulation, qui représente la production d'un mois, les temps de pannes sont négligeables.

Sur le graphique en haut de la Figure 5.12, qui affiche le taux de charge des robots fixes, on observe des taux de charge très faibles pour la plupart des robots. Une ressource en particulier reste tout au long en-deçà des 5 % de charge. Au total, sur le graphe, dix robots sont employés, et au douzième mois, quatre ressources sont encore en-dessous des 30 % de taux d'utilisation. Au contraire, si l'on considère le graphe du bas qui présente les résultats pour la ligne avec ressources déplaçables, seules sept robots ont été ajoutés. Au douzième mois, une unique ressource affiche un taux de charge inférieur à 30 %. Les ressources sont ajoutées une à une sur la ligne au moment où elles sont nécessaires, ce qui permet d'obtenir un taux de charge plus élevé et un taux de montée en puissance de ce taux plus élevé que dans le cas de ressources fixes. De plus, en fin de scénario, la ressource la plus chargée est à 75 % dans le cas du système fixe et 85 % pour le RAS.

Le résultat à retenir en terme de performance est un meilleur taux de charge des ressources du RAS en raison de leur intégration au système au moment nécessaire.

### 5.3.3.3 Investissements

Cette section présente les résultats du scénario en terme d'investissements, en complément des niveaux de reconfigurabilité et performance. D'une part, les investissements correspondent au montant dépensé dans l'achat d'installations ou ressources. D'autre part, le coût d'exploitation comprend les coûts de fonctionnement, comme la consommation en énergie du site, et le salaire des opérateurs.

La Figure 5.13 présente la comparaison des montants des investissements à fournir pour la

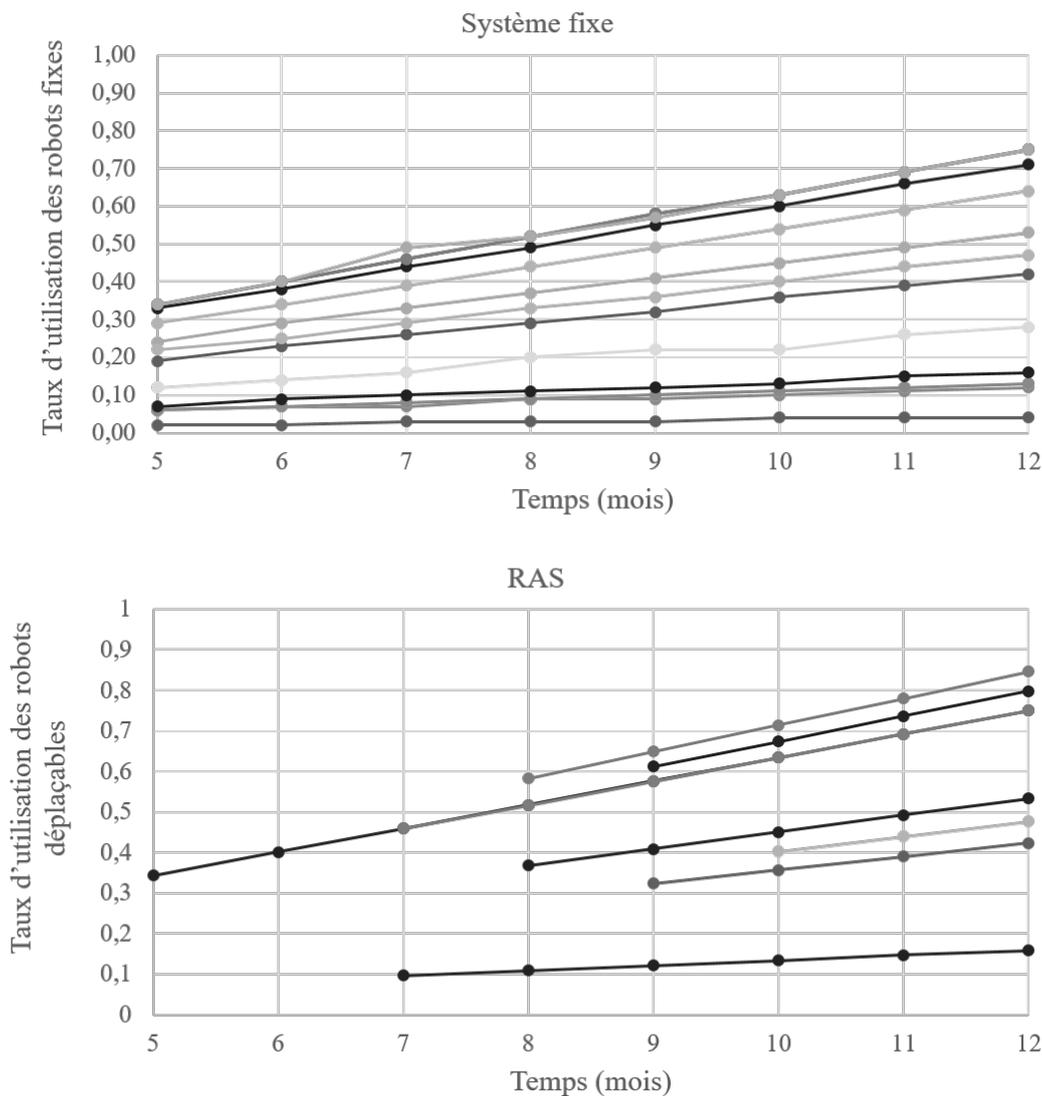


FIGURE 5.12 – Taux de charge des ressources pour le système fixe et le RAS [Bea et al.20a]

conception du système fixe, et pour le système reconfigurable avec ressources robotisées déplaçables. Le coût d'exploitation est identique dans les deux cas, car le nombre d'opérateurs engagés reste le même. Concernant les investissements, les deux types de système nécessitent l'acquisition de convoyeurs et de postes manuels. La différence réside dans le montant alloué aux ressources robotisée et le moment où doit avoir lieu l'investissement. Pour le RAS, les investissements sont plus tardifs et moindres. Deux raisons l'expliquent : les ressources sont intégrées une à une, et le délai d'anticipation de l'investissement passe de 18 mois à 7 mois.

Les résultats montrent un investissement très anticipé dans le cas du système fixe, cohérent avec l'indicateur de scalabilité obtenu Section 5.3.3.1.

En terme de coûts, sur un scénario de ramp-up à partir d'une feuille blanche, le système reconfigurable avec robots déplaçables paraît nettement préférable au système fixe.

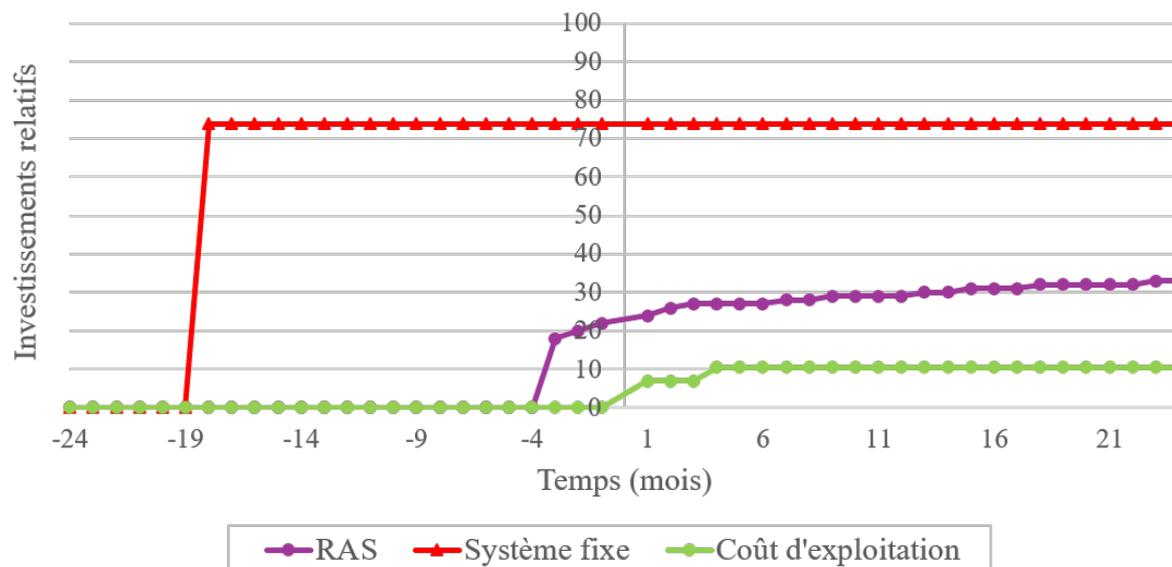


FIGURE 5.13 – Comparaison des investissements entre système fixe et système avec robots déplaçables (RAS) [Bea et al.20a]

### 5.3.3.4 Bilan Reconfigurabilité - Capacité des installations

D'après les résultats en terme de reconfigurabilité et performance, présentés dans les Sections 5.3.3.1 et 5.3.3.2, il est possible de synthétiser les données en un seul graphe comme présenté Figure 5.14. Il s'agit d'une représentation globale du résultat du scénario. Ce graphe présente en abscisse le taux de reconfigurabilité, et en ordonnée le taux d'utilisation de la capacité installée. Ce taux correspond au ratio entre la capacité utilisée (mesurée par simulation en fonction du nombre de moteurs assemblés) sur la capacité installée, en terme de nombre de moteurs assemblés par unité de temps. Tant que la demande du marché en nombre de produits est satisfaite, ce taux est inférieur à 1. Cet indicateur permet de mettre en évidence la satisfaction du besoin en volume ainsi que la reconfigurabilité en volume : si le système est parfaitement capable de s'ajuster au besoin au juste nécessaire, ce taux serait égal à 1.

En pratique, dans le cas d'étude présenté dans ce chapitre, nous ne sommes pas en mesure d'atteindre ce score. En effet, la gamme d'assemblage présente une répartition des tâches entre les ressources où les ressources robotisées ne sont pas utilisées à 100 % de leur capacité. L'optimisation de la séquence d'assemblage ne fait pas partie du cadre de notre étude. Pour ce scénario où le volume varie, le taux d'utilisation de la capacité est calculé pour le volume de production maximal sur l'ensemble du scénario.

Ce graphe montre de manière synthétique et visuelle la supériorité de la solution RAS avec robots déplaçables pour ce scénario.

### 5.3.4 Conclusion du scénario

Les résultats présentés dans cette section, en terme de taux de reconfigurabilité, productivité à travers le taux d'occupation des machines et investissements montrent une prépondérance du RAS sur le système fixe.

Avec ces éléments, il est possible de conclure sur un avantage de l'intégration de robots

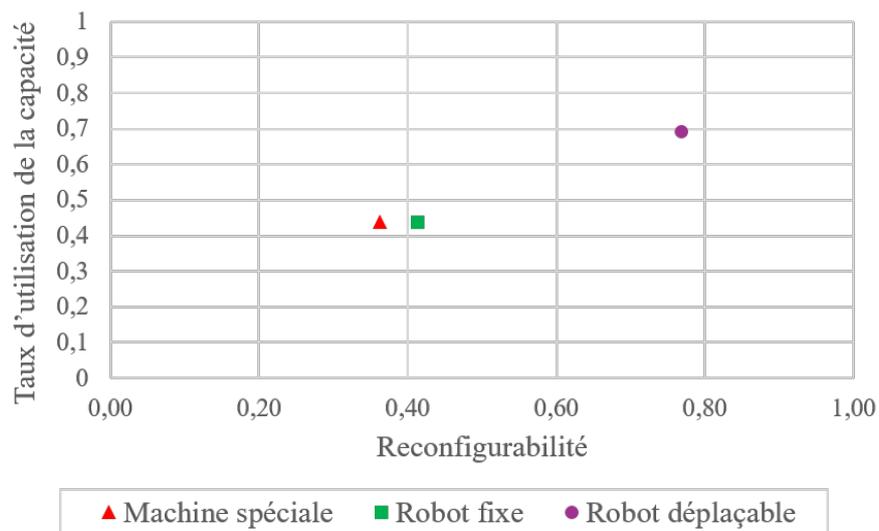


FIGURE 5.14 – Taux d'utilisation de la capacité en fonction de la reconfigurabilité du système - Comparaison de solutions techniques [Bea et al.20a]

déplaçables sur la ligne dans le cas de la construction d'une nouvelle ligne à partir d'un atelier vide. C'est bien l'objet du scénario qui correspond à une phase de ramp-up.

La démarche de conception du système reconfigurable permet une synthèse quantitative de ces résultats, la prise en compte du besoin en reconfigurabilité dès la phase de conception, et la proposition d'une solution technique adaptée au besoin, identifié lors de la première étape de la démarche.

Ce premier scénario a montré une augmentation régulière du volume de production. Le scénario suivant illustre le cas d'un changement de tendance en terme de variation de volume.

## 5.4 Scénario de ramp-up - Seconde phase

### 5.4.1 Scénario

Le scénario présenté en Figure 5.15 correspond à la suite du scénario précédent, identifiable sur la Figure 5.2. La montée en cadence, jusqu'ici forte et régulière, faiblit, jusqu'à décroître sans passer par une phase constante en plateau. Il s'agit toujours d'une variation en volume mono-produit.

### 5.4.2 Application de la démarche

#### 5.4.2.1 Identifier le besoin

L'identification du besoin en reconfigurabilité au sein des usines mécaniques de l'industriel étudié a été présentée en Section 5.2.

Le scénario étant similaire au cas précédent, le choix se porte de nouveau sur le robot déplaçable.

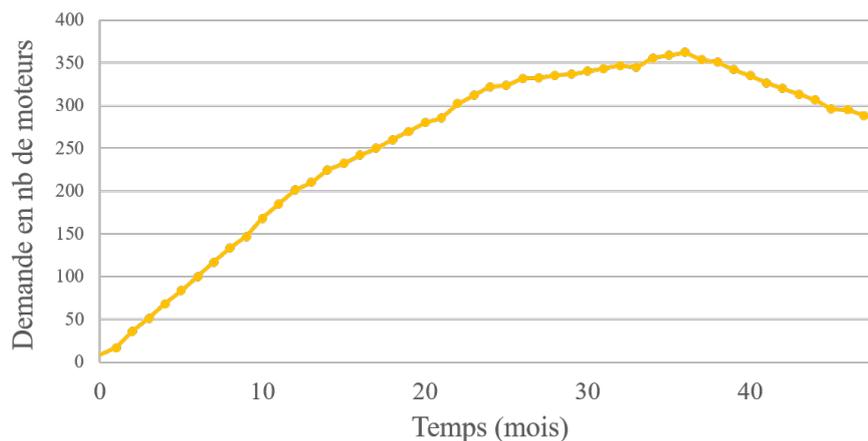


FIGURE 5.15 – Scénario de demande

#### 5.4.2.2 Modéliser le système

Dans ce scénario, nous avons modélisé sous Simul8 la ressource "robot déplaçable" comme un groupe de ressources identiques. Dans le modèle précédent, il y avait une distinction entre les différents robots déplaçables. Le travail de modélisation consistait à changer à la main l'attribution des tâches aux robots lors de l'ajout de chaque ressources. Dans ce scénario, nous avons fait le choix d'attribuer aux postes de travail non pas une ressource spécifique, mais la ressource générique "Robot pool", dont il est possible de modifier le nombre d'individus.

#### 5.4.2.3 Déterminer la meilleure configuration et reconfigurer

La stratégie de reconfiguration décrite dans la Section 5.3.2.4 est utilisée pour tous les scénarios du cas assemblage moteur. Dans le cas d'un scénario de décroissance de la demande, la métrique permettant de connaître le moment opportun pour reconfigurer et réduire le nombre de ressources est également un taux d'utilisation des ressources. Le taux de charge minimum accepté est de 80 %, ou une charge inférieure si la durée de la sous-charge est au maximum de 3 mois sur une période glissante. La Figure 5.16 illustre cette règle : au quatrième mois suivant la baisse du volume de production sous la limite des 80 %, le processus de reconfiguration sera enclenché.

### 5.4.3 Résultats

#### 5.4.3.1 Reconfigurabilité

Ce scénario portant de nouveau sur la comparaison de l'intégration de la ressource "robot déplaçable" en comparaison d'un système fixe traditionnel, avec un use case identique, les valeurs des indicateurs de reconfigurabilité restent inchangées par rapport aux valeurs présentées en Section 5.3.3.1 et sur la Figure 5.11.

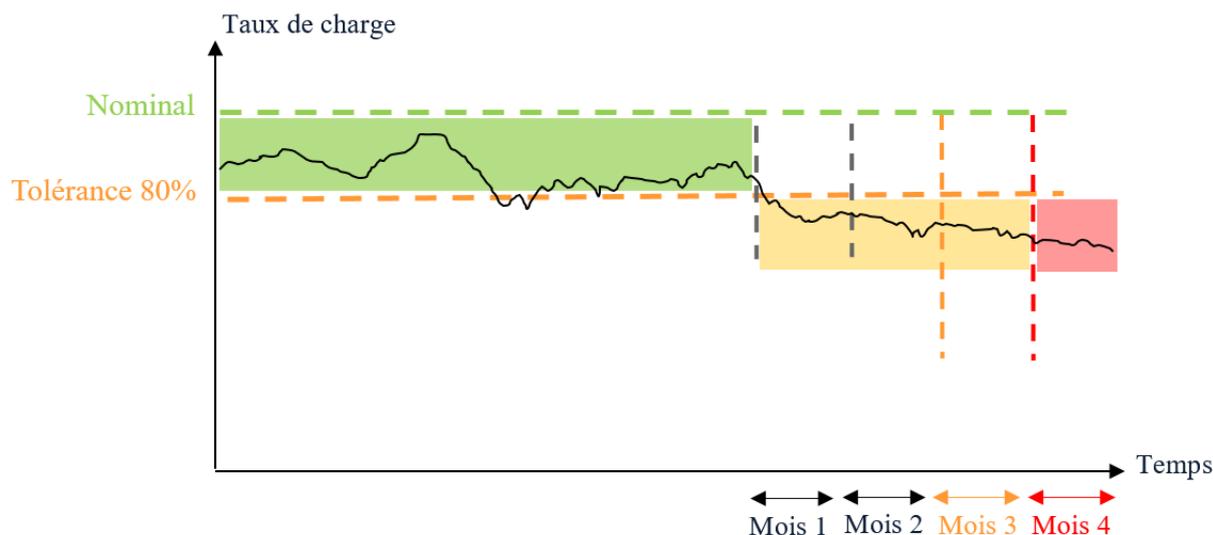


FIGURE 5.16 – Baisse de taux de charge tolérée avant reconfiguration

### 5.4.3.2 Performance

Les résultats en terme de performance sont présentés sous forme du taux de charge de l'ensemble des robots déplaçables. Les taux de charge ne sont pas donnés individuellement par robot contrairement au scénario précédent, mais pour l'ensemble des robots déplaçables sur la ligne reconfigurable.

Le graphe de la Figure 5.17 présente le taux d'utilisation moyen des robots du système fixe, la moyenne des taux de charge des robots déplaçables, et une courbe qui présente le nombre cumulé de robots déplaçables intégrés sur la ligne. Pour répondre à la demande, les ressources sont ajoutées une à une (mois 1 à 24 similaires au scénario précédent), jusqu'à atteindre un plateau lorsque la demande stagne ou régresse.

La courbe en orange, qui correspond au taux d'utilisation, augmente jusqu'à atteindre un taux compris entre 90 % et 95 % en phase de demande maximale. La raison pour laquelle ce taux n'atteint pas immédiatement une telle valeur, et reste entre 30 % et 70 % entre le début de l'intégration des ressources déplaçables et le 17<sup>ème</sup> mois, est due à la conception de la gamme qui ne permet pas complètement d'optimiser la charge des ressources. A partir du 33<sup>ème</sup> mois, on observe une diminution du taux de charge, qui correspond à la baisse de demande. Cette tendance aurait pu être évitée en retirant des ressources de la ligne d'assemblage afin de les rendre disponibles pour d'autres ateliers. Nous n'avons pas considéré cette alternative car notre modèle ne contient qu'une seule ligne.

Sur tout le déroulement du scénario, le taux d'utilisation des robots déplaçables est nettement supérieur en comparaison avec le système fixe.

### 5.4.3.3 Investissements

En terme d'investissements, l'ajout progressif des robots s'observe sur la Figure 5.18. Le graphe présente à la fois le montant relatif des investissements pour le RAS, le système fixe, les coûts relatifs d'exploitation, et la courbe de demande en moteur/mois. L'objectif est de mettre en évidence le décalage entre l'anticipation de la croissance de la demande dans le cas du système

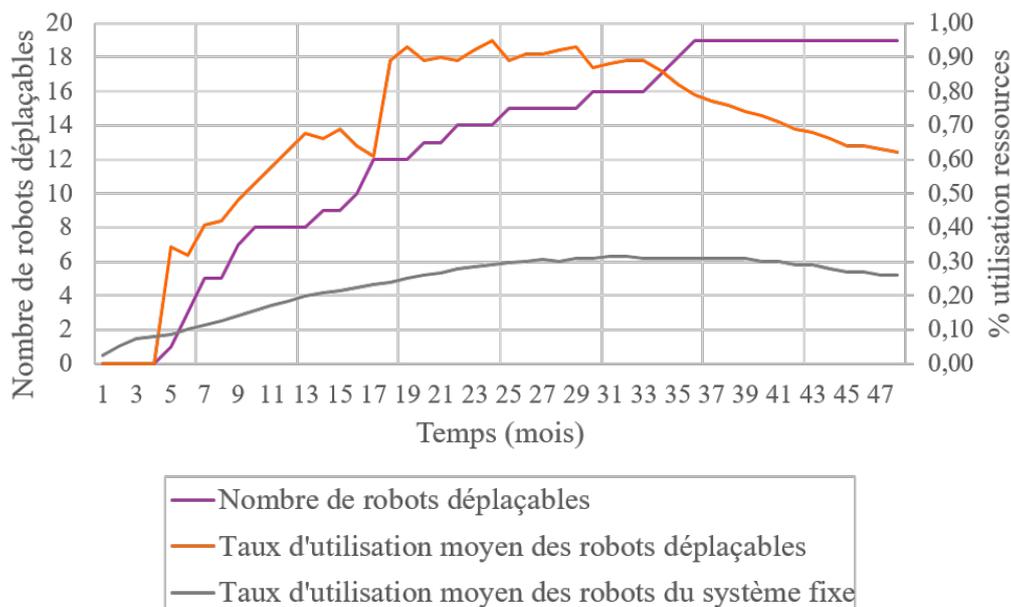


FIGURE 5.17 – Taux de charge des ressources pour le système fixe et le RAS

fixe, et la demande réelle qui n'atteint pas la valeur prévue, puis décroît. Au sixième mois du scénario, on observe un nouvel investissement sur la ligne fixe, qui correspond à l'anticipation de la suite de la croissance de la demande, avec la même croissance que les six premiers mois. Les prévisions se révèlent fausses, et le premier incrément d'investissement, qui a eu lieu 18 mois avant le début de la production, était déjà sur-capacitaire, ce qui rend le second investissement inutile. En fin de scénario, les investissements réalisés pour la ligne reconfigurable sont de l'ordre de 50 % du premier investissement effectué pour la ligne fixe. La différence de délai, qui peut s'illustrer par la surface comprise entre les courbes rouge et violette, montre également les économies réalisées avec la solution "robots déplaçables".

#### 5.4.3.4 Bilan Reconfigurabilité - Capacité des installations

La Figure 5.19 présente l'évaluation de la reconfigurabilité et de l'utilisation de la capacité installée des lignes pour le système fixe et le système reconfigurable. Le score du robot déplaçable est meilleur que celui de la machine spéciale et du robot fixe.

La valeur de l'indicateur de reconfigurabilité du robot déplaçable ne change pas par rapport au scénario précédent. En revanche, le taux d'utilisation de la capacité est proche de 1 : le ralentissement de la croissance de la demande puis sa décroissance a permis de rattraper le délai dû aux sept mois d'anticipation de l'investissement pour le RAS. Les investissements étant effectués au juste nécessaire, la capacité du système est utilisée à son plein potentiel.

#### 5.4.4 Conclusion du scénario

Ce scénario a montré un cas de variation de la demande en volume avec une première phase de croissance rapide, puis un affaiblissement de la croissance suivi par une décroissance. Ce type de scénario pourrait correspondre à un lancement de produit partiellement échoué : la prévision était celle d'un lancement de produit avec forte croissance, pour atteindre un plateau avec une

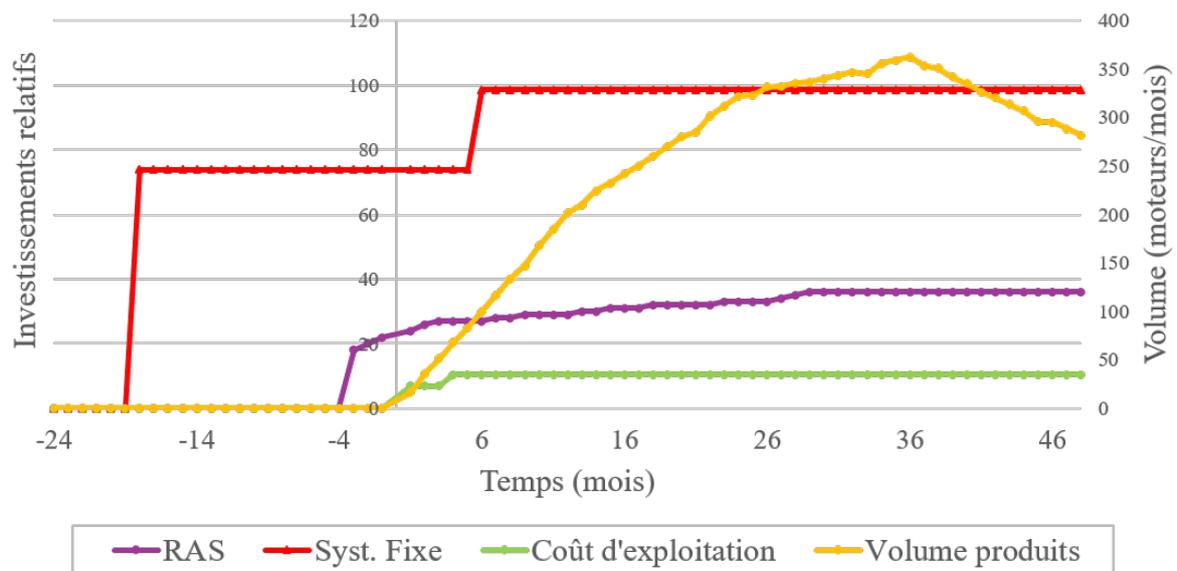


FIGURE 5.18 – Comparaison des investissements entre système fixe et système avec robots déplaçables

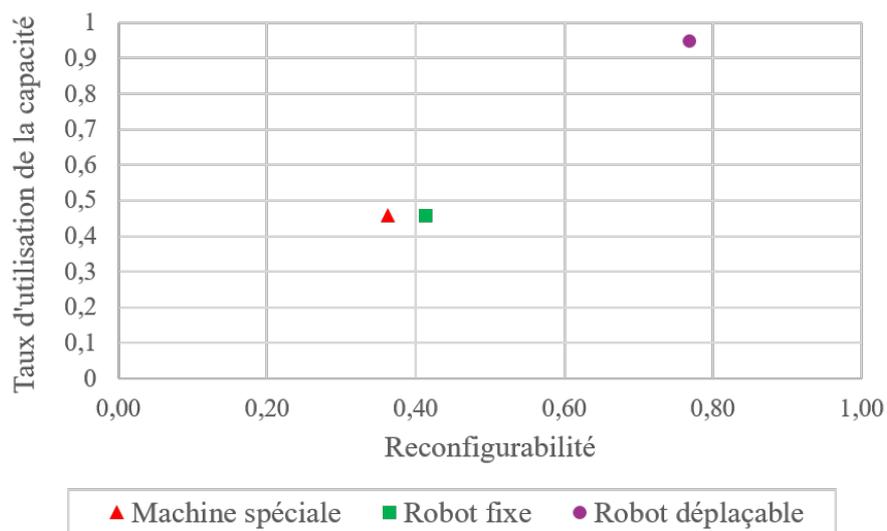


FIGURE 5.19 – Taux d'utilisation de la capacité en fonction de la reconfigurabilité du système - Comparaison de solutions techniques

durée de vie du produit sur plusieurs années. Le scénario est finalement le suivant : la demande augmente fortement pendant les douze premiers mois, ralentit entre les mois 12 et 20, subit un deuxième ralentissement de croissance à partir du vingtième mois, avant de finalement décroître à partir du mois 34.

Le système fixe a été conçu pour satisfaire le volume maximal prévu sur plusieurs années. Si ce volume n'est pas atteint, la conséquence est un sur-investissement et une sous-utilisation des installations.

Après avoir appliqué notre démarche à deux scénarios de variation en volume, nous présentons dans la section suivante un scénario de variation en mixte produit.

## 5.5 Scénario de variation de ratio de mixte produit

### 5.5.1 Scénario

Cette section porte sur le scénario multi-produits (assemblage de moteurs essence et diesel), qui correspond à la période de la septième et huitième année sur la Figure 5.2. Ce scénario, construit avec l'industriel, a pour objectif de représenter les variations saisonnières, hebdomadaires et journalières de la demande en mixte produit dans une période de plateau du cycle de vie du produit. Le choix d'un scénario sur six jours a été motivé par le besoin de présenter à la fois des scénarios longs, comme le scénario précédent sur quatre ans, et une application court-terme. Ainsi, ce scénario montre un cas de reconfiguration au niveau de décision opérationnel de l'entreprise, avec un choix de reconfigurer des ressources à l'horizon de la journée.

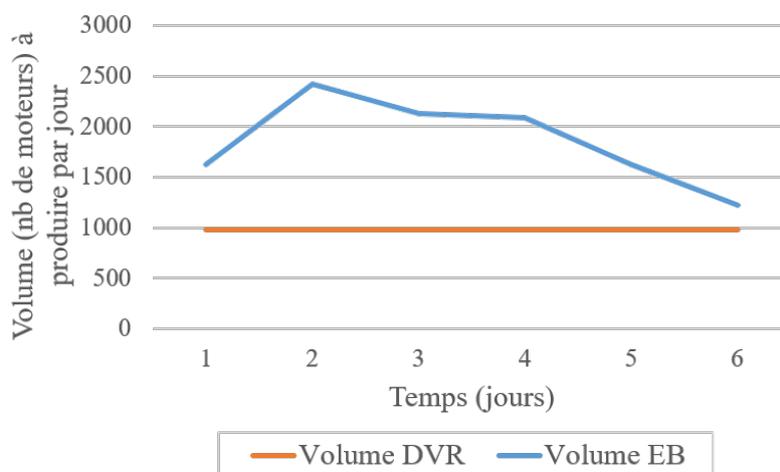


FIGURE 5.20 – Scénario de demande (variation de ratio de mixte produit)

Le scénario de demande à court terme, sur six jours consécutifs, est présenté Figure 5.20 et Tableau 5.3. Le ratio de mixte produit varie chaque jour et le volume total suit également des variations.

Jour	1	2	3	4	5	6
Volume	2610	3410	3110	3070	2610	2210
% DVR	38	29	31	32	38	45
% EB	62	71	69	68	62	55

Tableau 5.3 – Scénario de la demande

Contrairement aux deux scénarios précédents, ici nous testerons deux briques technologiques : robots déplaçables Section 5.5.2, puis robots mobiles Section 5.5.3.

### 5.5.2 Résolution avec robots déplaçables

#### 5.5.2.1 Identifier le besoin

L'identification du besoin en reconfigurabilité au sein des usines mécaniques de l'industriel étudié a été présentée en Section 5.2.

Selon le type de produit, le contenu de travail des postes varie, ainsi que le nombre de ressources nécessaires. En intégrant des ressources pouvant fonctionner sur le poste désiré en fonction du produit assemblé, la modularité et donc la reconfigurabilité de la ligne sont augmentées. Pour répondre à ce besoin, la ressource pertinente est un bras robotisé pouvant être repositionné.

Dans ce scénario, le volume de production varie peu, tandis que les variations les plus importantes à couvrir concernent le mixte produit. Ce ratio varie quotidiennement. La première ressource testée pour ce scénario est le robot déplaçable, avec assignation à un poste d'assemblage pour la journée.

L'étape qui suit le choix de la ressource à implémenter est le réglage du système reconfigurable. Dans un premier temps, comme décrit dans la Section 4.3.2, l'ordonnancement de la liste des produits en entrée de ligne est déterminé. Ensuite, le nombre de ressources idéal est déterminé, avant de résoudre le problème d'allocation des ressources sur la ligne.

### 5.5.2.2 Modéliser le système

La ligne pilote multi-produits a été modélisée dans l'environnement de SED Simul8 2019. Le modèle entier est représenté Figure B.2 en Annexe B. Les taux de performance de la ligne sont calculés grâce à cette simulation.

### 5.5.2.3 Déterminer la meilleure configuration

#### Description du problème d'optimisation

L'objectif est dans un premier temps de résoudre le problème d'ordonnancement pour une ligne produisant deux types de produits. L'objectif est de minimiser le temps d'assemblage de la liste de produits (makespan). Le problème est défini par un ensemble  $s = \{1, 2, \dots, m\}$  de  $m$  postes de travail, un jeu  $r = \{1, 2, \dots, n\}$  de  $n$  robots identiques et un ensemble de produits de type  $k = \{1, 2\}$ . Les variables de décision, définies par  $x_{rs}$ , allocation du robot  $r$  pour le moteur DVR, et  $y_{rs}$ , pour le produit EB, prennent la valeur 1 si le robot  $r$  est affecté au poste de travail  $s$  et 0 sinon. Les contraintes à respecter sont les suivantes :

- chaque robot ne peut être affecté qu'à un poste de travail à la fois
- les temps de trajet entre les postes de travail sont pris en compte
- un seul produit peut être traité à la fois sur un poste de travail
- la contrainte d'espace autour du poste limite le nombre de robots à cinq par station d'assemblage au maximum. La gamme a été construite en conséquence, en limitant le nombre de tâches d'assemblage en parallèle à cinq au maximum.

#### Ordonnancement

L'ordonnancement des produits a été résolu grâce au couplage entre le package d'optimisation OptQuest et le logiciel de SED Simul8, comme présenté Section 4.3.2.2. Pour cette étape, le nombre de robots déplaçables n'étant pas encore déterminé, toutes les ressources robotisées de la ligne sont modélisées comme des robots fixes.

Pour des raisons logistiques, la taille des lots à ordonnancer a été fixée à 10 produits. Concrètement, le problème d'optimisation revient à ordonnancer une liste de 10 produits composée d'un ratio de mixte entre EB et DVR. En effet, la stratégie de produire sous forme de campagnes de

production (regroupement d'ordres planifiés pour produire une certaine quantité d'un type de produit sur une certaine période de temps) a des conséquences sur les stocks. Ainsi, la durée de la séquence de regroupement des produits doit être suffisamment courte pour éviter le stockage des produits entre les chaînes de montage.

Le ratio de mixte produit et la taille de lot  $l$  sont des données d'entrée du problème.  $\alpha$  et  $\beta$  sont respectivement les pourcentages de moteur EB et DVR dans le scénario. L'objectif est de minimiser le makespan.  $Var_i$ , avec  $i \in \{1, \dots, l\}$ , est la liste des variables correspondant aux types de produits pour les  $l$  éléments du lot. Dans le cas présent, où l'ensemble des produits est  $k = \{1, 2\}$ , où 1 et 2 sont les valeurs de  $k$  pour les produits DVR et EB respectivement, la contrainte de mixte produit est formulée par l'Equation (5.2) :

$$\sum_{i=1}^l Var_i = k_1 \cdot \alpha + k_2 \cdot \beta \quad (5.2)$$

La Figure 5.21 représente la fonction objectif, qui correspond à la minimisation du temps de fabrication pour le scénario de production du premier jour. L'abscisse correspond au nombre de simulations lancées. Le nombre d'itérations nécessaires pour atteindre la séquence de production optimale est raisonnable dans le cas d'une ligne permettant d'assembler seulement deux types de produits avec une taille de lot de 10.

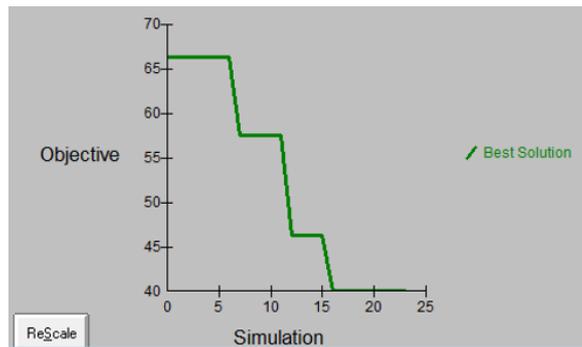


FIGURE 5.21 – Valeur de la fonction objectif (temps d'assemblage)

Le meilleur ordonnancement pour le scénario présenté au Tableau 5.3 est indiqué pour chaque jour du scénario dans le Tableau 5.4.

Jour	Séquence
1	[EB, EB, EB, EB, DVR, EB, DVR, DVR, DVR, EB]
2	[EB, DVR, EB, EB, EB, EB, DVR, EB, DVR, EB]
3	[EB, DVR, EB, EB, EB, EB, DVR, EB, DVR, EB]
4	[EB, DVR, EB, EB, EB, EB, DVR, EB, DVR, EB]
5	[EB, EB, EB, EB, DVR, EB, DVR, DVR, DVR, EB]
6	[DVR, EB, DVR, DVR, EB, EB, EB, EB, DVR, DVR]

Tableau 5.4 – Meilleur ordonnancement des produits

### Détermination du nombre de robots nécessaires

Une fois l'ordonnancement optimal défini avec un modèle de ligne fixe, l'étape suivante est la détermination du nombre de ressources déplaçables nécessaires. Cette optimisation est également réalisée grâce au module OptQuest.

Le problème à résoudre est multi-objectif, car il s'agit de maximiser le nombre de commandes achevées, c'est-à-dire le nombre moteurs assemblés, tout en minimisant le nombre de ressources achetées afin d'utiliser le bon nombre de robots déplaçables. Le pseudo-code développé dans le logiciel Simul8 utilisant le langage Visual Logic est représenté dans l'Algorithme 1. La variable "Work in progress" se réfère au nombre de produits assemblés, obtenus par simulation et à maximiser. "Number of resources" correspond au nombre de robots déplaçables, à minimiser afin d'investir au juste nécessaire.

---

#### Algorithme 1 : Pseudo-code pour la détermination du nombre de ressources

---

```

Result : Number of resources
if Production demand fulfilled then
  | SET Objective = 0
else
  | if Nb of finished products = 0 then
  | | SET Objective = 10000
  | else
  | | SET Objective = Work in progress
  | end
  | SET Objective = Objective + Number of resources
end

```

---

La fonction objectif correspondant à la satisfaction de la demande pour le premier jour du scénario est représentée sur la Figure 5.22. Le problème est résolu en minimisant cet objectif.

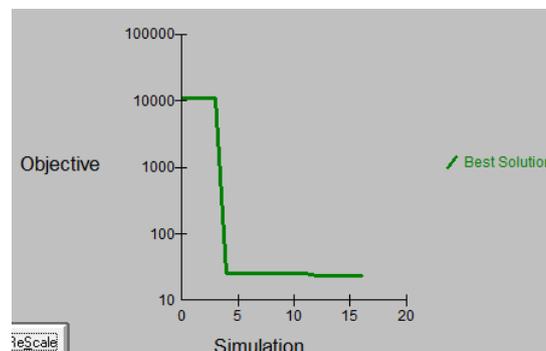


FIGURE 5.22 – Fonction objectif (modèle multi-objectif)

Pour le scénario de production étudié, les résultats sont présentés dans le Tableau 5.5. Selon le jour de production, 22 ou 23 robots déplaçables sont nécessaires.

	Jour					
	1	2	3	4	5	6
Nombre de robots	23	22	22	22	23	22

Tableau 5.5 – Nombre de robots

### Allocation des ressources

Maintenant que le nombre exact de ressources disponibles est déterminé, la meilleure allocation de robot est recherchée au moyen de la structure de couplage présentée dans la Section 4.3.2. Pour le problème de l'implantation des robots déplaçables sur la ligne, le module développé en externe, comme décrit Section 4.3.2.3, est couplé à Simul8.

La fonction objectif à minimiser est le makespan, représenté sur la figure 5.23 pour  $n = 2000$  cycles et  $m = 100$  essais par cycle.

Enfin, les résultats du problème d'allocation des ressources pour le premier jour du scénario sont présentés dans le tableau 5.6.

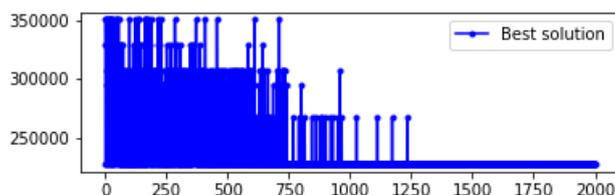


FIGURE 5.23 – Fonction objectif (allocation des ressources)

	Poste de travail																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Nb de robots	1	1	2	3	1	1	2	2	1	0	1	2	2	1	1	1	1	0	0	0

Tableau 5.6 – Allocation des ressources pour le jour 1

#### 5.5.2.4 Reconfigurer le système

Selon les résultats obtenus aux sections précédentes, les robots sont reconfigurés et déplacés sur la ligne avant chaque nouveau jour de production pour satisfaire la demande variable.

### 5.5.3 Résolution avec robots mobiles

#### 5.5.3.1 Identifier le besoin en reconfigurabilité

Dans ce scénario, le mixte produit varie quotidiennement, et c'est pourquoi la solution "robots déplaçables" a été proposée précédemment. Cependant, introduire un intervalle de temps entre les reconfigurations supérieur à la journée peut permettre de réduire le nombre de robots non fixes sur la ligne. La brique technologique "robots mobiles" peut répondre à ce besoin. Le contenu de travail des postes étant différent selon le produit, les robots mobiles navigueront entre les postes au cours de la production.

#### 5.5.3.2 Modéliser le système

Dans le cas de ressources se déplaçant en temps réel dans l'atelier, l'implantation des postes sur la ligne a un impact sur le temps de trajet des robots. Nous allons tester trois configurations : implantations en I, U et S.

La Figure 5.24 montre les trois implantations testées avec l'emplacement de stationnement de la flotte de robots mobiles ("Robot pool"). Dans le cas de la ligne en S, la flotte est répartie sur deux sites de stationnement. Les ressources du pool 1 sont employées sur les postes 1 à 13, et les ressources du pool 2 sur les postes 9 à 20. Ces données, ainsi que le temps de trajet nécessaire aux robots entre les postes, seront renseignées dans le modèle de SED.

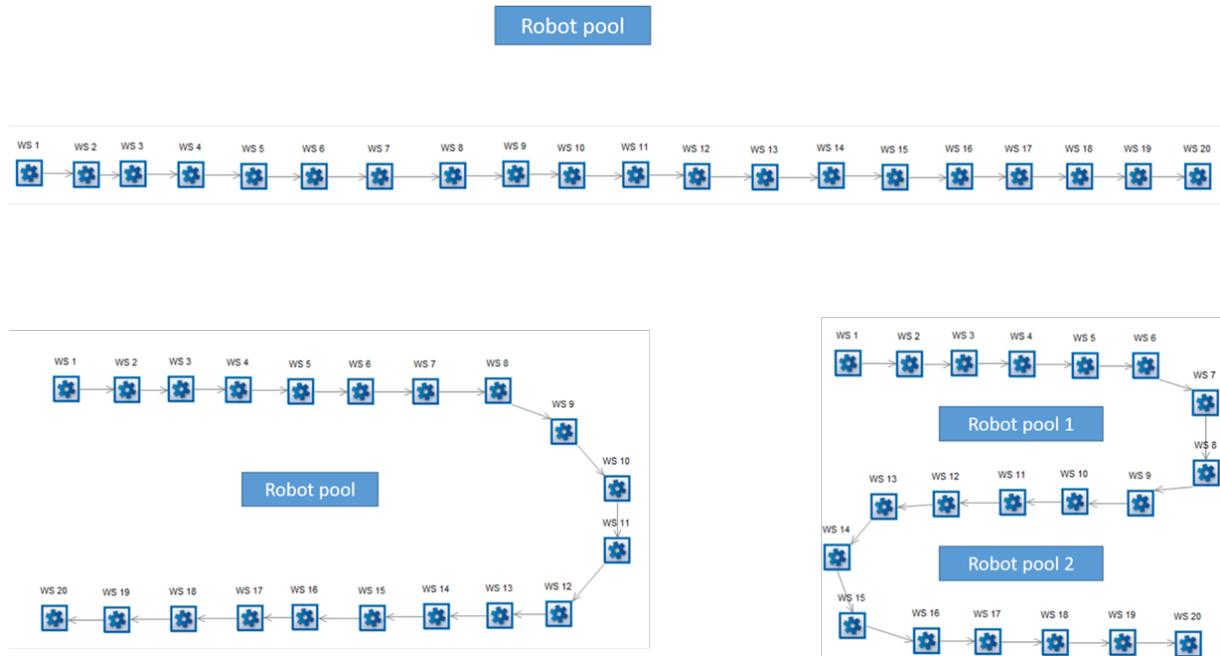


FIGURE 5.24 – Implantation en I, U et S des 20 postes d'assemblage

### 5.5.3.3 Déterminer la meilleure configuration

Pour chaque jour de production et pour les trois implantations testées, les taux de performance du système sont obtenus par simulation. La Section 5.5.4 présente ces résultats, qui vont permettre de déterminer la meilleure implantation.

### 5.5.3.4 Reconfigurer

Sur ce court scénario, aucun robot n'est ajouté ou retiré de la ligne, mais les robots se déplacent entre les postes de travail. La variété est due à de légères variations de volume et à l'alternance entre moteurs essence et diesel.

## 5.5.4 Résultats

### 5.5.4.1 Reconfigurabilité

La Figure 5.25 présente le diagramme radar des caractéristiques de la reconfigurabilité pour la machine spéciale, les robots fixes, déplaçables, et mobiles. Le robot mobile a un meilleur score que toutes les autres solutions, en particulier en terme de capacité à incrémenter le système de production en terme de volume, la reconfiguration de ressources mobiles étant plus rapide que pour les ressources déplaçables. La customisation du système, capacité à régler le système pour

une famille de produits en particulier, est également améliorée. En effet, grâce à la réallocation des ressources, il est possible de s'adapter à différentes gammes, lorsque plusieurs produits sont fabriqués sur la même ligne.

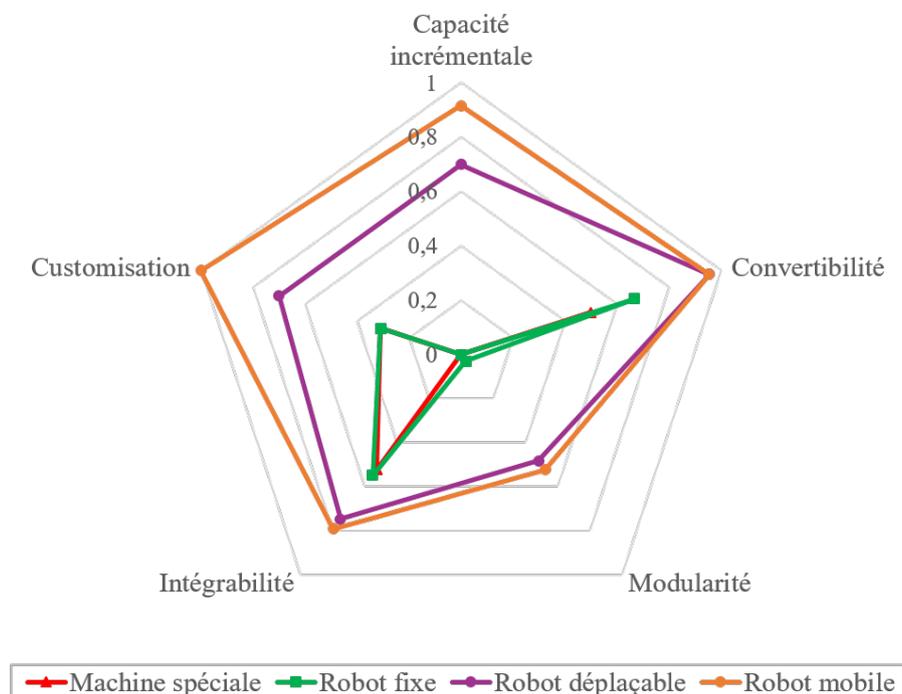


FIGURE 5.25 – Comparaison des caractéristiques de reconfigurabilité

De manière analogue à la Section 5.3.3.1, il est possible de calculer le niveau de reconfigurabilité global  $R$  à partir des valeurs des caractéristiques de la reconfigurabilité, et des pondérations de celles-ci obtenues par AHP. Les valeurs de  $R$  pour le système fixe et le robot déplaçable ont déjà été présentées dans la section citée. Pour le robot mobile, la valeur de la reconfigurabilité est de  $R = 0,88$ .

#### 5.5.4.2 Performance

Dans ce scénario, les critères de performance retenus sont :

- Taux d'utilisation des ressources
- Taux de déplacement des ressources mobiles (ratio de temps de déplacement sur le temps total de simulation)
- Nombre de moteurs assemblés

Ainsi, les Figures 5.26, 5.27, 5.28 et 5.29 présentent la performance des systèmes sur les six jours du scénario. Le diagramme à barres oranges représente le volume de production pour chaque journée, mesuré sur l'ordonnée à gauche des graphes. Les courbes correspondent aux taux de charge des ressources robotiques, que l'on peut lire sur l'axe de l'ordonnée à droite.

Afin de pouvoir comparer le système avec robots mobiles au cas où la ligne serait fixe, la Figure 5.26 présente le taux de charge de chaque robot fixe (courbes), le taux de charge moyen de ces robots (courbe en violet en gras), et le volume de production (diagramme à barres). On observe, au maximum (jour 2), un volume de production de 3040 moteurs, essence et diesel confondus. Le taux de charge des ressources est compris entre 1 % et 86 % avec une moyenne de 31 %.

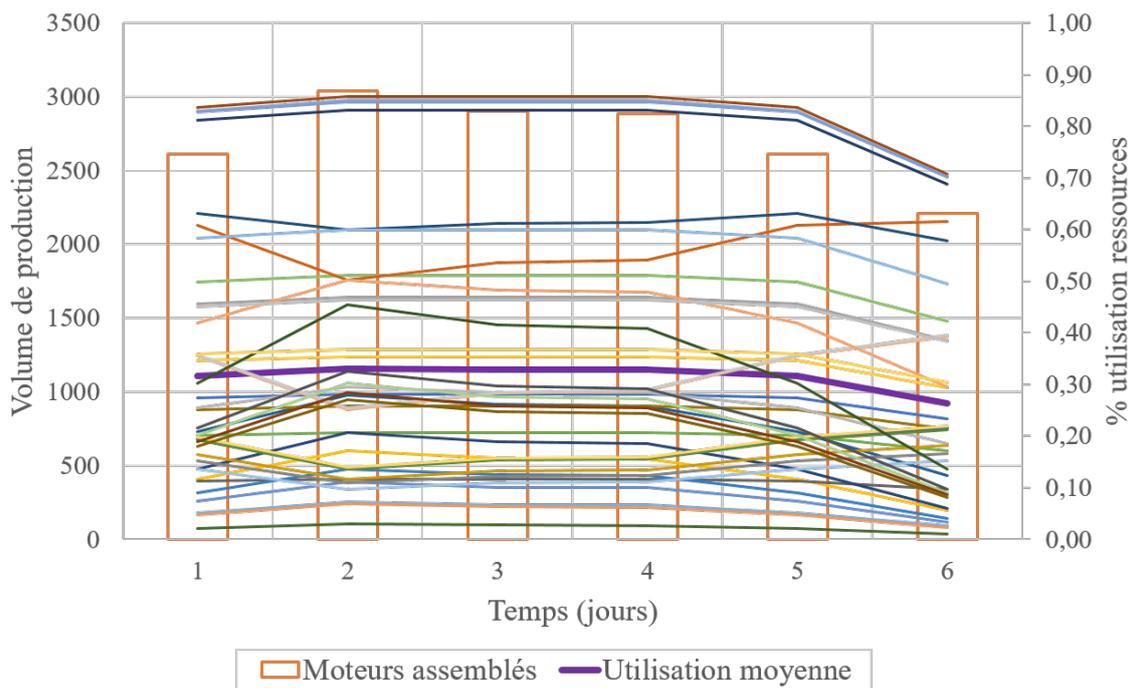


FIGURE 5.26 – Taux de charge des ressources pour le système fixe

Les résultats pour la ligne reconfigurable sont présentés par implantation. La Figure 5.27 présente les résultats pour la ligne en I.

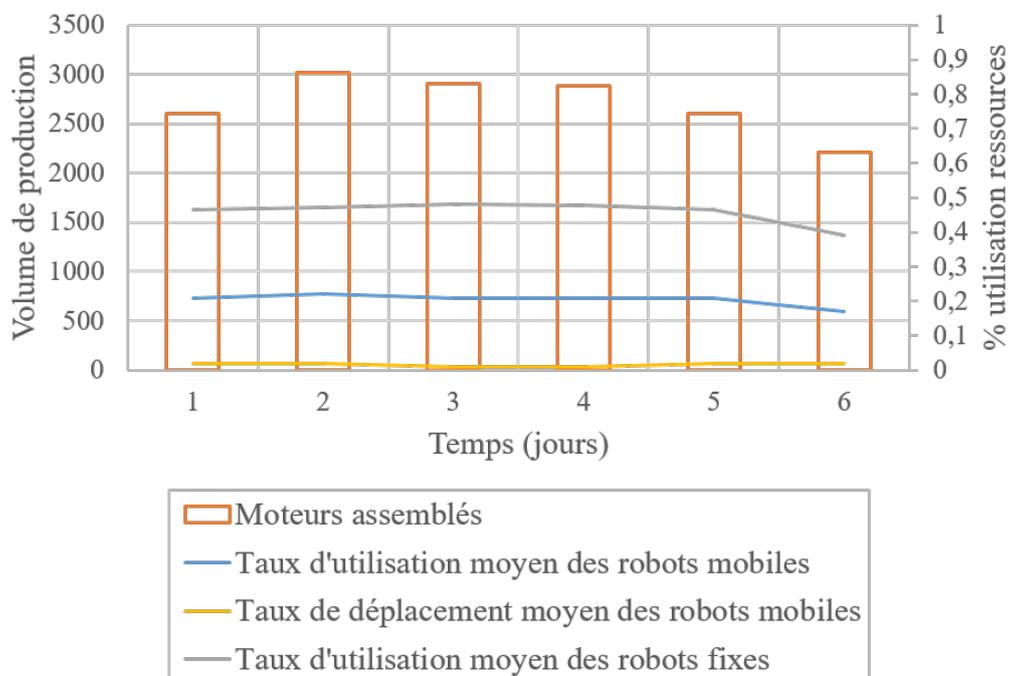


FIGURE 5.27 – Taux de charge des ressources pour le RAS - Implantation en I

Pour le deuxième jour du scénario, le nombre de moteurs produits est de 3018 moteurs, ce qui est inférieur au cas du système fixe. On peut en conclure qu'avec cette implantation et le nombre

de robots mobiles en place, la ligne est moins productive que le système fixe. La ligne compte à la fois des opérateurs et des ressources fixes, pour le contenu de travail commun aux deux types de moteurs, utilisées en moyenne à 46 %, et des robots mobiles, utilisés en moyenne à 20.5 %, qui réalisent les opérations spécifiques. Le taux de déplacement moyen des robots mobiles est de 1.7 %.

La performance du système pour l'implantation en U est présentée en Figure 5.28. Sur le scénario, le nombre maximum de moteurs produits par jour est de 3058, et les taux d'utilisation moyens des robots fixes et mobiles sont respectivement de 46.4 % et 20.2 %. Le taux de déplacement moyen des robots mobiles est de 1.3 %. Cette implantation est donc préférable à l'implantation en I.

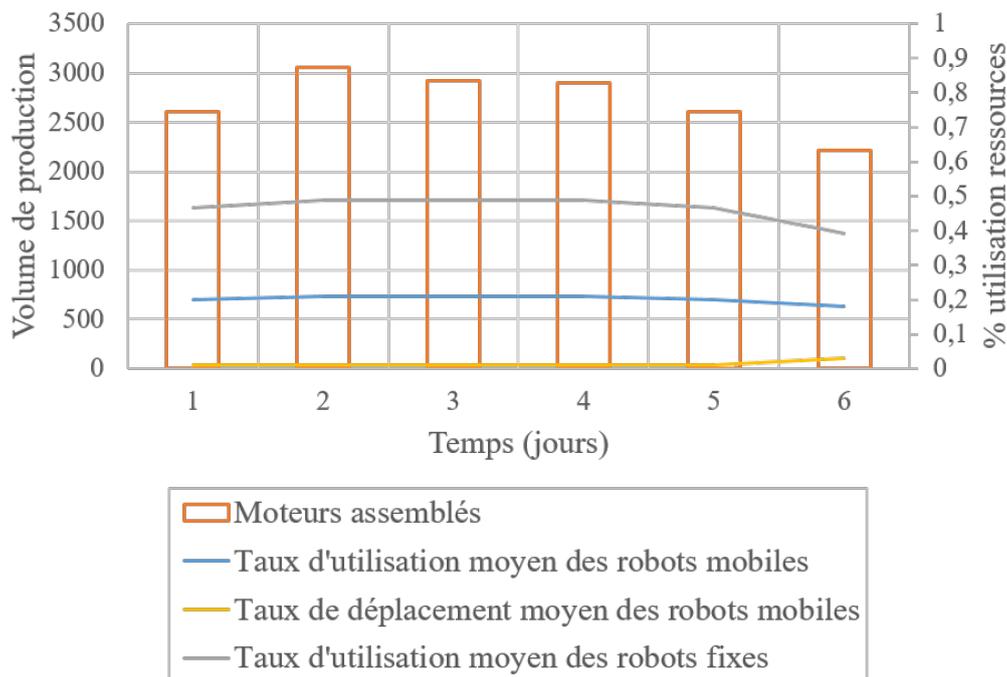


FIGURE 5.28 – Taux de charge des ressources pour le RAS - Implantation en U

La Figure 5.29 illustre la performance du système pour l'implantation en S avec deux implantations de stationnement pour les robots mobiles. Pour la ligne en S, le deuxième jour du scénario, 3066 moteurs sont assemblés. Les ressources fixes ont un taux de charge moyen de 46.3 %. Les taux d'utilisation des robots mobiles des emplacements 1 et 2 sont respectivement de 18.8 % et 17.8 %, et les taux de déplacement de 2 % et 0.2 %. Le résultat est donc le meilleur en nombre de moteurs assemblés, mais les ressources sont moins utilisées.

Le Tableau 5.7 récapitule les résultats du système fixe et des trois implantations avec robots mobiles en terme de performance. L'implantation reconfigurable donnant les meilleurs résultats est l'implantation en U. Pour cette configuration, le nombre de produits assemblés est le plus élevé, et le taux de déplacement des robots mobiles est le plus faible. En ce qui concerne le taux d'utilisation moyen des robots (moyenne des robots fixes et mobiles dans le cas d'une coexistence des deux types de ressources), il est équivalent pour le système fixe et les implantations en I et U avec robots mobiles.

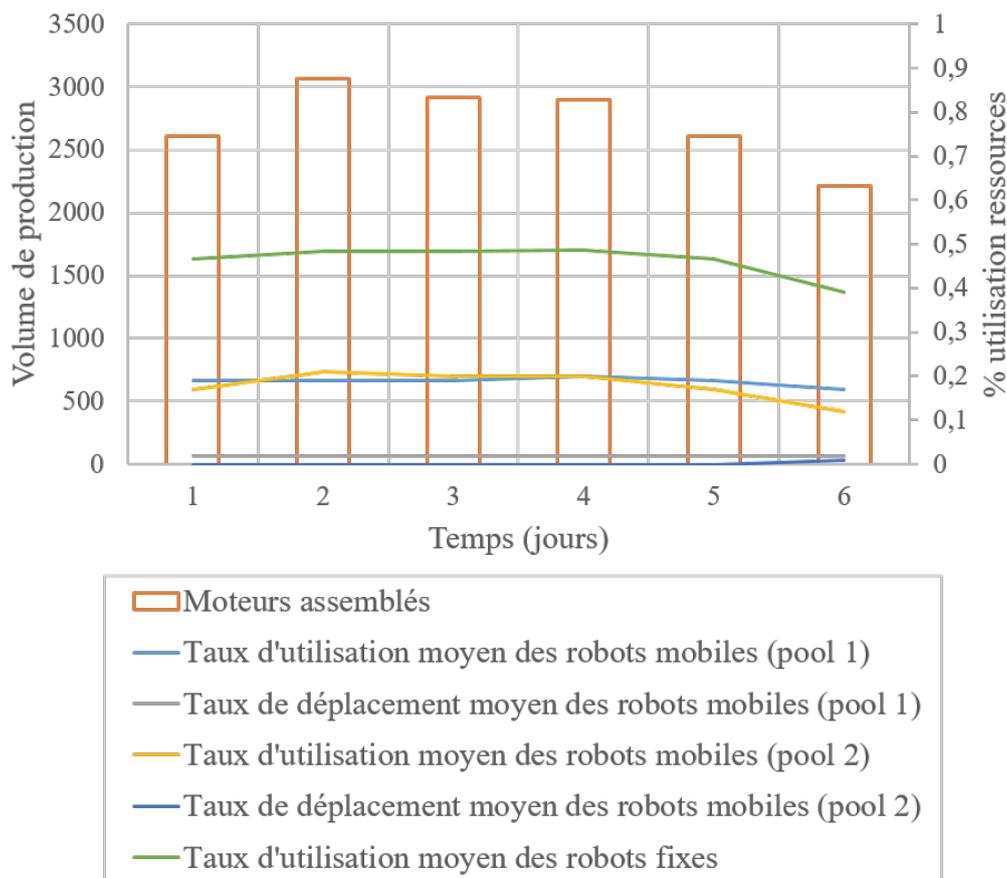


FIGURE 5.29 – Taux de charge des ressources pour le RAS - Implantation en S

Implantation	Nombre de produits assemblés	Utilisation moyenne des robots	Taux de déplacement des robots mobiles
Système fixe	16257	31.4 %	N/A
I	16235	31.3 %	1.7 %
U	16315	31.3 %	1.3 %
S	16308	29.5 %	1.6 %

Tableau 5.7 – Synthèse des résultats en performance du scénario de variation de ratio de mixte produit

### 5.5.4.3 Investissements

Les investissements pour la ligne fixe, la ligne reconfigurable avec robots déplaçables et les implantations en I, U et S de la ligne reconfigurable avec robots mobiles sont comparés (Figure 5.30). Concernant le système fixe, deux valeurs sont données : investissements correspondant au système fixe ancienne génération, et système fixe conçu avec des robots légers nouvelle génération, permettant une ligne plus compacte. Le système le moins coûteux est le système fixe avec nouveaux équipements.

Parmi les implantations reconfigurables, les montants varient en fonction du nombre de robots déplaçables et de robots mobiles installés sur la ligne. Le coût relativement élevé de la solution avec robots déplaçables s'explique par la stratégie, pour cette solution, d'installer

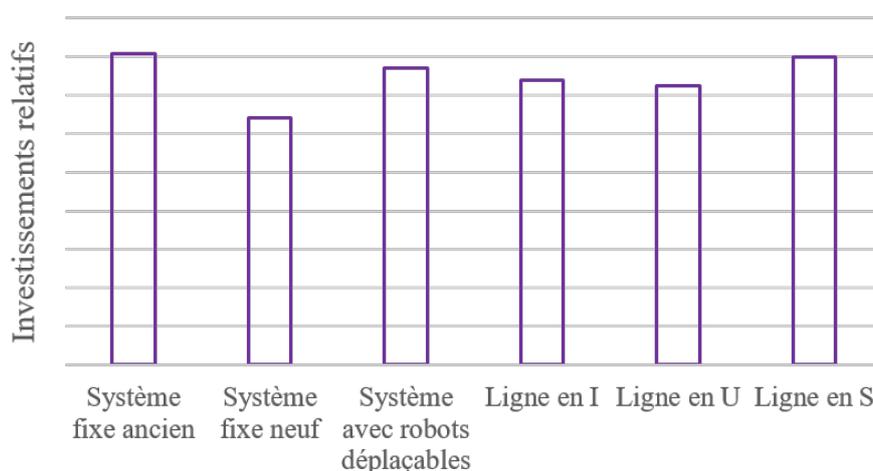


FIGURE 5.30 – Comparaison des investissements entre système fixe, système avec robots déplaçables et système avec robots mobiles pour une implantation en I, U et S

uniquement des robots déplaçables sur la ligne, et aucun robot fixe. Selon la proportion de robots de chaque type, un système avec robots fixes et mobiles peut être moins coûteux qu'un système composé uniquement de ressources déplaçables. Ceci explique pourquoi l'investissement pour le système avec robots déplaçables est plus élevé que les investissements pour les lignes en I et U avec robots mobiles.

L'implantation reconfigurable nécessitant le moins de robots, et donc un investissement plus faible, est l'implantation en U avec robots mobiles.

#### 5.5.4.4 Bilan Reconfigurabilité - Capacité des installations

La Figure 5.31 présente le graphe du taux d'utilisation de la capacité des installations en fonction du niveau de reconfigurabilité du système. Les taux d'utilisation sont supérieurs à 1, la demande client n'étant pas satisfaite tous les jours. Les résultats en terme d'utilisation sont similaires pour le système fixe et la ligne reconfigurable avec robots déplaçables ou mobiles.

#### 5.5.5 Conclusion du scénario

Ce scénario permet de conclure sur la pertinence de l'intégration de robots déplaçables ou mobiles, ainsi que sur la meilleure implantation de ligne, dans un cas de volume stable et de variations de mixte produit.

La Section 5.5.2 a permis de montrer de bons résultats pour le réglage du système (nombre de robots et allocation sur les postes) avec robots déplaçables.

Au regard des indicateurs de reconfigurabilité, performance et investissements, la solution avec robots mobiles paraît être la plus pertinente. Nous avons montré que pour cette solution, il est préférable de configurer la ligne de vingt postes en U.

Dans ce chapitre, nous aborderons un quatrième scénario afin de présenter l'apport de la démarche de conception sur un scénario avec variations en volume et en mixte produit.

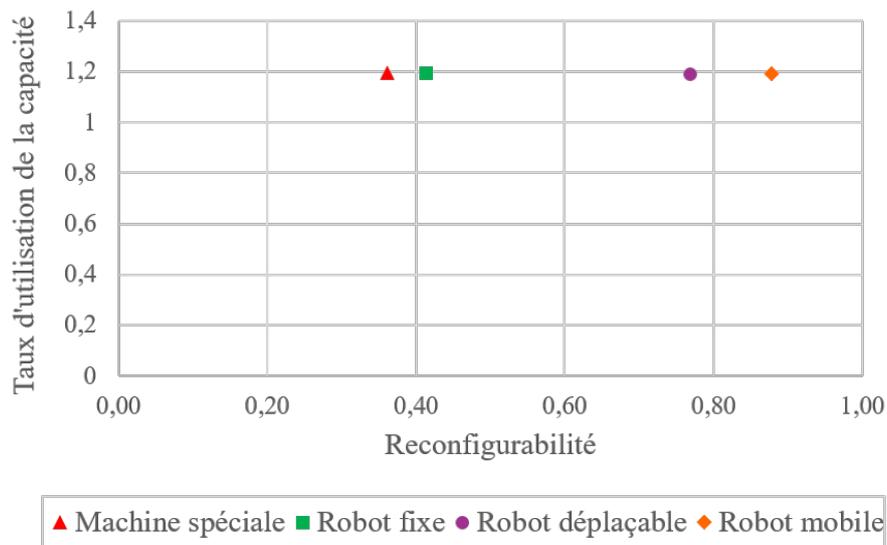


FIGURE 5.31 – Taux d’utilisation de la capacité en fonction de la reconfigurabilité du système - Comparaison de solutions techniques

## 5.6 Scénario de variation de volume et ratio de mixte produit

### 5.6.1 Scénario

Dans cette section, nous abordons un scénario multi-produits avec variations en volume. La variation de la demande, qui prend la forme de l’introduction du moteur essence EB sur une ligne assemblant déjà les moteurs diesel DVR, correspond aux années 5 et 6 du scénario présenté en Figure 5.2. Le volume et le ratio de mixte varient de manière linéaire au fur et à mesure de l’introduction de moteurs diesel sur la ligne, comme le détaille la Figure 5.32.

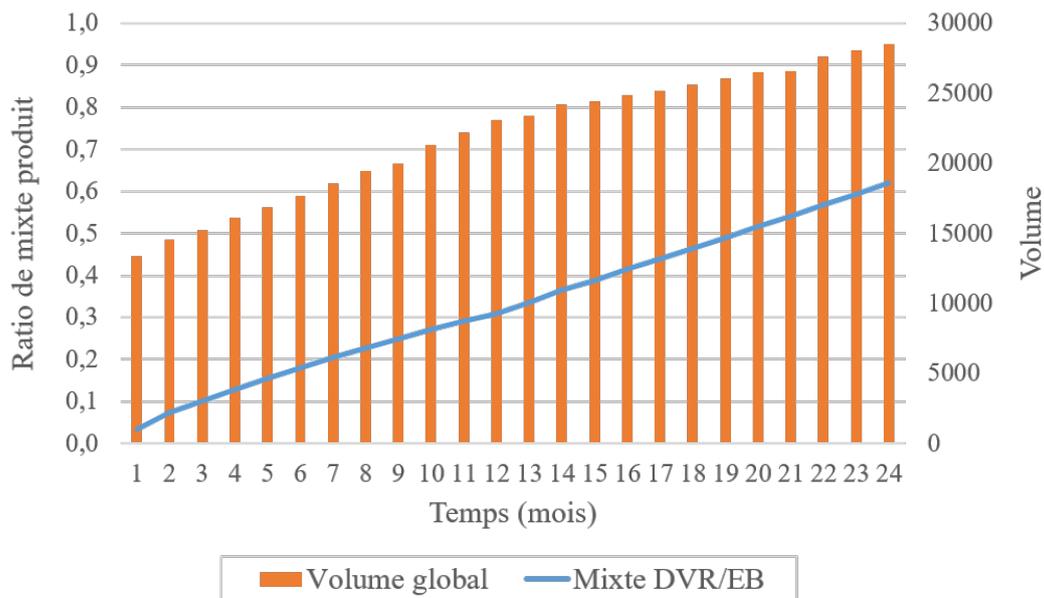


FIGURE 5.32 – Scénario de demande - Variation en mixte produit et volume

La démarche ne sera pas détaillée car les sections précédentes ont déjà présenté en détail les différentes étapes. Les règles de reconfiguration pour l'intégration de nouvelles ressources sont celles décrites dans les Sections 5.3.2.4 et 5.4.2.3.

Suite aux résultats de la section précédente, la solution avec robots mobiles et implantation en U est comparée à un système fixe.

## 5.6.2 Résultats

### 5.6.2.1 Reconfigurabilité

En terme de reconfigurabilité, les résultats sont identiques aux valeurs détaillées dans la Section 5.5.4.1.

### 5.6.2.2 Performance

Les taux de charge des ressources du le système fixe, qui compte 39 robots, sont présentés Figure 5.33. En début de scénario, les taux de charge sont compris entre 0 et 40 %. En fin de scénario, après augmentation du volume global suite à l'introduction d'un nouveau produit sur la ligne, les taux d'utilisation des robots fixes sont compris entre 2 % et 83 %, avec une moyenne de 31 %. La moyenne du taux de charge des ressources fixes sur l'ensemble du scénario est de 24.8 %.

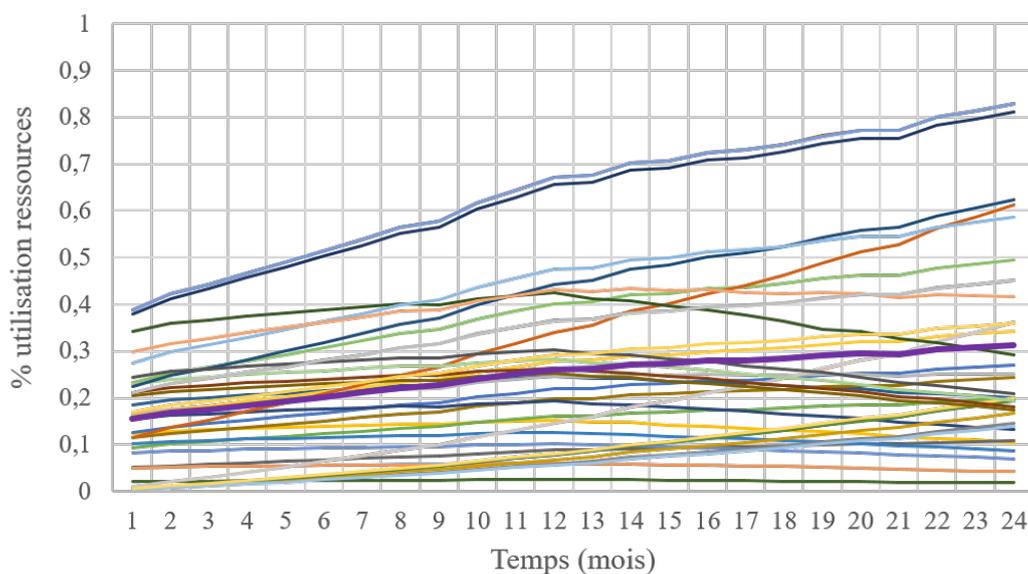


FIGURE 5.33 – Taux de charge des ressources pour le système fixe

La Figure 5.34 illustre le taux d'utilisation des ressources du système reconfigurable, ainsi que le nombre de ressources mobiles sur la ligne au cours du temps. En début de scénario, la ligne compte 5 robots mobiles. Les ressources sont intégrées lorsque nécessaires pour atteindre 23 ressources en fin de scénario.

Comme dans le scénario précédent, la ligne reconfigurable comprend des ressources fixes pour les tâches communes aux produits et mobiles pour les tâches spécifiques. En début de scénario,

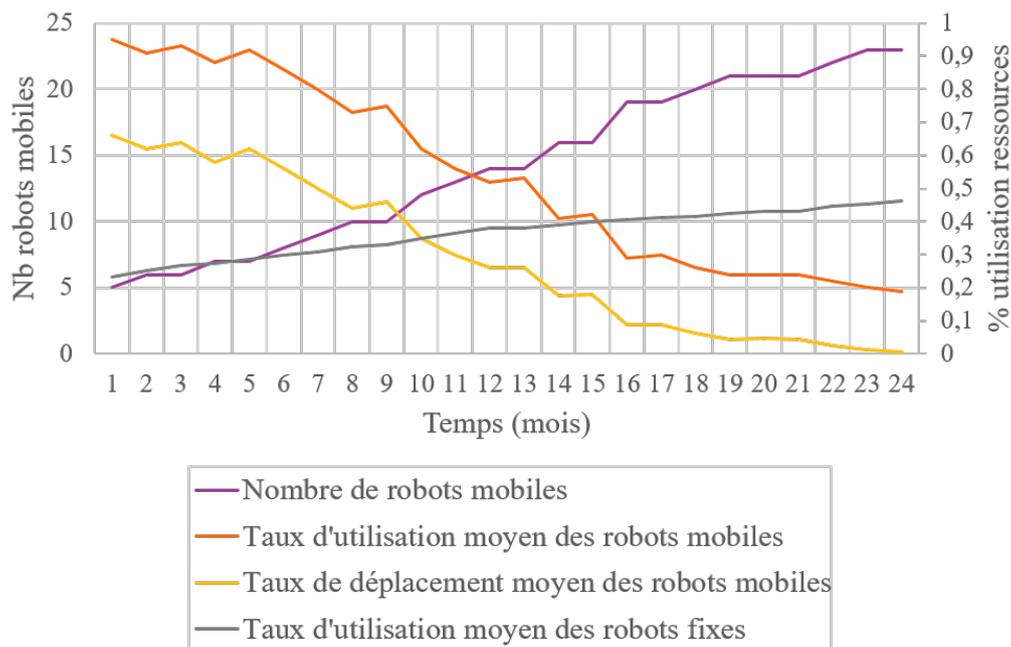


FIGURE 5.34 – Taux de charge des ressources du RAS

il y a peu de robots mobiles sur la ligne et ceux-ci se déplacent beaucoup entre les postes. Au fur et à mesure de l'augmentation en volume de la production en moteurs DVR, les robots mobiles sont ajoutés sur la ligne. On observe alors que les robots ont tendance à rester plus longtemps sur les mêmes postes d'assemblage, mais ils sont également moins chargés. Cela peut s'expliquer par le fait que le ratio de moteurs EB/DVR, aux alentours de 50 %, est le moins idéal. En effet, s'il arrive que les moteurs se suivent avec une alternance des deux types de produits dans le film de production, pour s'adapter à la différence de contenu de travail, les robots mobiles n'ont pas le temps de se déplacer à temps entre 2 postes pour être utile sur un autre poste, et vont avoir tendance à se "fixer" sur un poste. Cependant, étant donné la construction de la gamme, les ressources ne seront pas chargées au maximum de leur capacité, d'où un faible taux de charge des ressources mobiles en fin de scénario.

### 5.6.2.3 Investissements

Les investissements correspondant au scénario sont présentés Figure 5.35. Comme pour les scénarios précédents, les investissements dans le cas du système fixe sont antérieurs aux investissements pour la ligne reconfigurable. De même, le premier incrément pour le RAS est inférieur au montant de l'investissement pour le système fixe. Cependant, on observe que dès le quatrième mois après le démarrage de la production, le montant investi pour le RAS dépasse le coût du système fixe, pour atteindre une valeur 25 % supérieure en fin de scénario. En effet, en fin de scénario, le prix total d'investissement pour les robots mobiles est supérieur aux robots fixes, moins chers, même si moins de ressources sont installées.

L'avantage qu'apporte le RAS dans cette situation est de retarder les investissements, et de pouvoir réemployer les ressources sur d'autres lignes en cas de décroissance de la production (scénario non présenté ici).

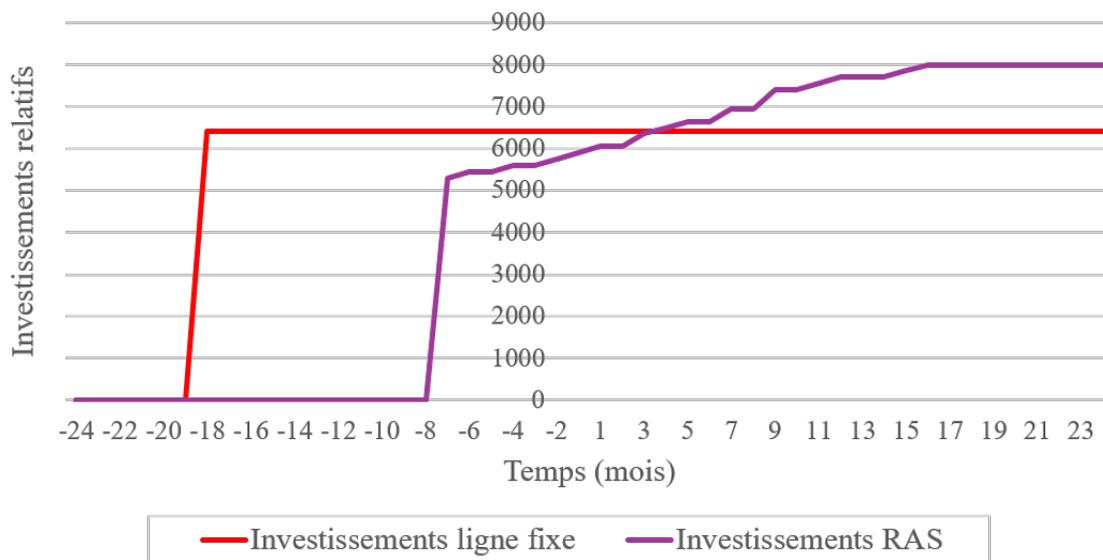


FIGURE 5.35 – Comparaison des investissements entre système fixe et système avec robots mobiles

#### 5.6.2.4 Bilan Reconfigurabilité - Capacité des installations

Pour ce scénario où le volume varie, le taux d'utilisation de la capacité est calculé pour le volume de production maximal sur l'ensemble du scénario. Sur la Figure 5.36, on peut observer qu'en fin de scénario, le système reconfigurable est utilisé à 94 % de sa capacité maximale en volume, quand le système fixe est utilisé à 90 %.

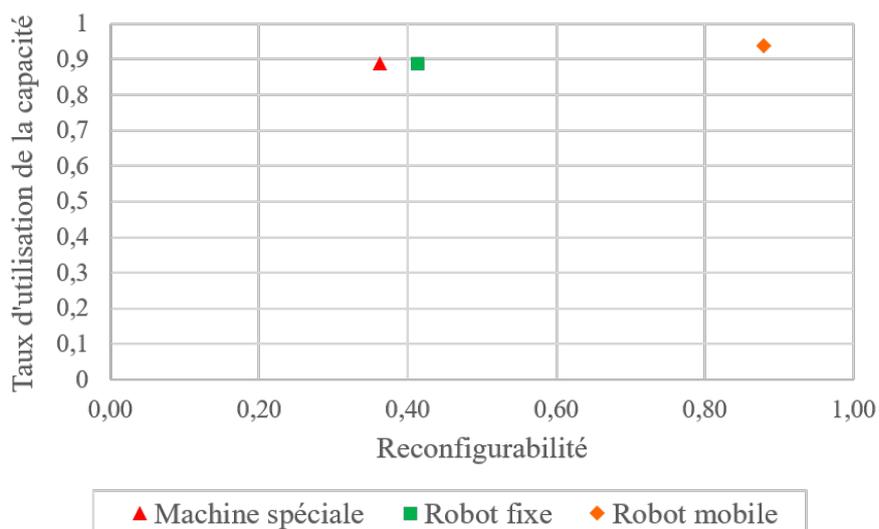


FIGURE 5.36 – Taux d'utilisation de la capacité en fonction de la reconfigurabilité du système - Comparaison des solutions techniques

### 5.6.3 Conclusion du scénario

Au regard des indicateurs de reconfigurabilité, performance et investissements, la solution reconfigurable avec robots mobiles est préférable pendant les premiers mois du scénario, puis s'avère moins avantageuse en terme de taux d'utilisation des ressources et montant des investissements. Cependant, la solution reconfigurable reste supérieure en ce qui concerne les délais des investissements : en effet, le système reconfigurable laisse 13 mois de plus pour effectuer le premier investissement dans la ligne.

Au final, il pourrait être intéressant de combiner les deux solutions, avec des robots mobiles en début de scénario, puis privilégier ensuite un complément d'investissement avec des robots déplaçables, moins coûteux. La caractéristique de déplacement rapide au cours d'une phase de production n'est en effet plus pertinente à partir d'un moment, comme le montrent les très faibles taux de déplacement des ressources en fin de scénario (Figure 5.34).

Ce constat peut s'expliquer par le fait que malgré les variations que subissent les installations, la tendance des variations en volume et en mixte produit est stable.

Nous avons présenté des scénarios de production variés à partir du cas d'usage présenté, et montré que suivant le contexte, le système reconfigurable peut être plus pertinent, ou moins pertinent que le système fixe. La démarche de conception du système reconfigurable développé dans la thèse permet bien d'accompagner ce choix en proposant une solution technologique et en l'évaluant à l'aide d'indicateurs quantitatifs.

La section suivante propose une évaluation de scénarios et une aide à la décision issue de l'analyse de risques et de la théorie d'aide à la décision.

## 5.7 Application de la théorie d'analyse des risques

Cette section présente l'application de la méthodologie d'aide à la décision présentée Section 4.4.2 sur un cas simple inspiré de la ligne d'assemblage présentée dans ce chapitre. Cette application a également fait l'objet d'une publication [Bea et al.20b].

Cette approche permet de qualifier le risque afin d'aider le décideur à le maîtriser. Il s'agit de mesurer l'attitude du décideur face au risque, et d'évaluer les caractéristiques du système reconfigurable qu'il souhaite prioriser. Puis, selon la probabilité du marché d'évoluer vers une tendance ou l'autre, il est possible d'orienter le décideur vers un choix objectif selon le profil de risque qui lui correspond.

### 5.7.1 Scénarios

Nous proposons d'étudier le problème à travers l'articulation de deux scénarios consécutifs, correspondant à deux événements d'évolution de marché.

Dans un premier temps, le décideur se trouve face à un premier choix d'investissement. Ce choix effectué, le marché évolue, montrant ainsi la pertinence ou non du choix effectué. Puis la procédure se répète, avec choix du décideur, puis évolution du marché. L'objectif de ce scénario est de simuler deux phases de reconfiguration et d'évolution de marché afin de modéliser un scénario semblable à une situation réelle dans un cas industriel.

Lors d'une phase de décision, dans le modèle proposé, il est possible de choisir entre :

- ne pas investir
- ajouter un robot fixe
- ajouter un robot déplaçable
- ajouter un robot mobile

Les probabilités d'occurrence des scénarios sont des données d'entrée du problème. Dans cette application, nous avons modélisé quatre tendances d'évolution du marché :

- baisse importante de la demande
- faible baisse
- faible augmentation
- forte augmentation

Les probabilités associées pour les deux périodes du scénario sont présentées en Figure 5.37.

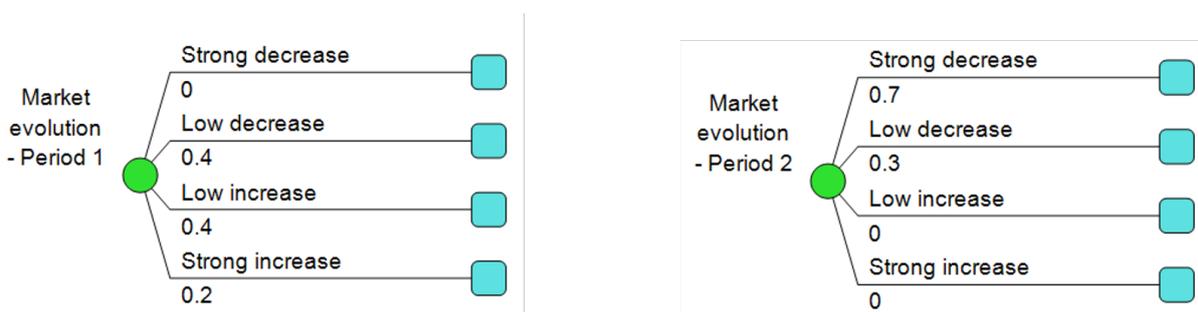


FIGURE 5.37 – Nœuds de chance et probabilités

## 5.7.2 Modèle

### 5.7.2.1 Fonction d'utilité

La fonction d'utilité est construite à partir des attributs du scénario et calculée grâce au logiciel ASSESS. Cette étape permet de construire une fonction objectif regroupant les indicateurs de performance, reconfigurabilité, coût et maturité ( $M_R$ ) d'une solution.

À partir des bornes des valeurs prises par les attributs, et de loteries équivalentes, la fonction d'utilité est déterminée. La fonction d'utilité fait transparaître le goût pour le risque du décideur (averse au risque ou ayant de l'attrait pour le risque).

La fonction d'utilité obtenue, entrée dans le logiciel d'aide à la décision DPL9, est présentée en Annexe C.

### 5.7.2.2 Diagramme d'influence

Les deux scénarios consécutifs se retrouvent dans le diagramme d'influence, présenté Figure 5.38. Chaque scénario est caractérisé par un nœud de décision (rectangle jaune) et un nœud de chance (ovale vert). Le choix de la stratégie d'investissement en période 1 influe sur les investissements effectués, le niveau de reconfigurabilité et le niveau de maturité, en fonction de la brique technologique sélectionnée. Puis le marché évolue, ce qui impacte les commandes et donc le taux de charge des machines. Le même scénario est reproduit une seconde fois.

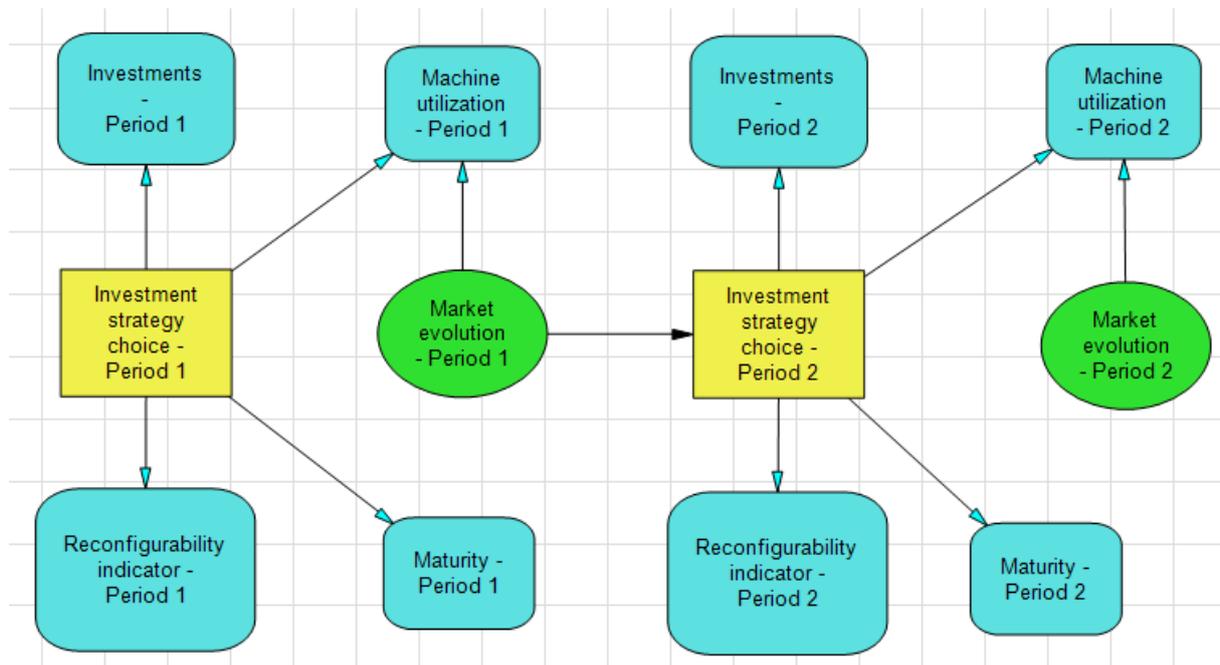


FIGURE 5.38 – Diagramme d'influence du cas industriel

### 5.7.2.3 Arbre de décision

La Figure 5.39 représente l'arbre de décision construit dans DPL9 correspondant au diagramme d'influence de la Figure 5.38. L'arbre est constitué de deux scénarios consécutifs (ici présentés sur deux lignes), eux-mêmes structurés en un nœud de décision puis un nœud de chance. L'arbre, symétrique, se termine par un nœud de valeur. Afin de rendre la lecture plus aisée, et toutes les ramifications étant identiques, DPL9 réduit le diagramme. La lecture se fait de la manière suivante : chaque branche du premier nœud de décision se divise en quatre branches après le premier nœud de chance, qui se divisent elles-mêmes en quatre branches au second nœud de décision, et ainsi de suite. L'arbre compte donc 256 ramifications.

## 5.7.3 Résultats

### 5.7.3.1 Choix suggéré

Après lancement de la simulation sous DPL9, on obtient une suggestion de choix compte tenu des probabilités d'occurrence des scénarios entrées dans le système et du degré d'aversion au risque du décideur. Un extrait de l'arbre de décision après évaluation des alternatives est présenté en Figure 5.40.

Pour notre cas d'étude, il nous est suggéré d'intégrer une ressource déplaçable en première période, puis de ne pas investir dans de nouvelles ressources en seconde période. En effet, le scénario de la première période simule une situation d'incertitude quand à l'évolution du marché vers une augmentation ou une diminution de la demande. Il est pertinent d'intégrer une ressource certes plus coûteuse qu'un robot fixe, mais qui pourra facilement être retirée du système dans un contexte incertain. Dans la deuxième période du scénario, nous avons modélisé une prévision certaine de décroissance de la demande, ce qui explique que le logiciel d'aide à la décision conseille de ne pas investir dans cette phase.



FIGURE 5.39 – Arbre de décision avec deux scénarios sous DPL9

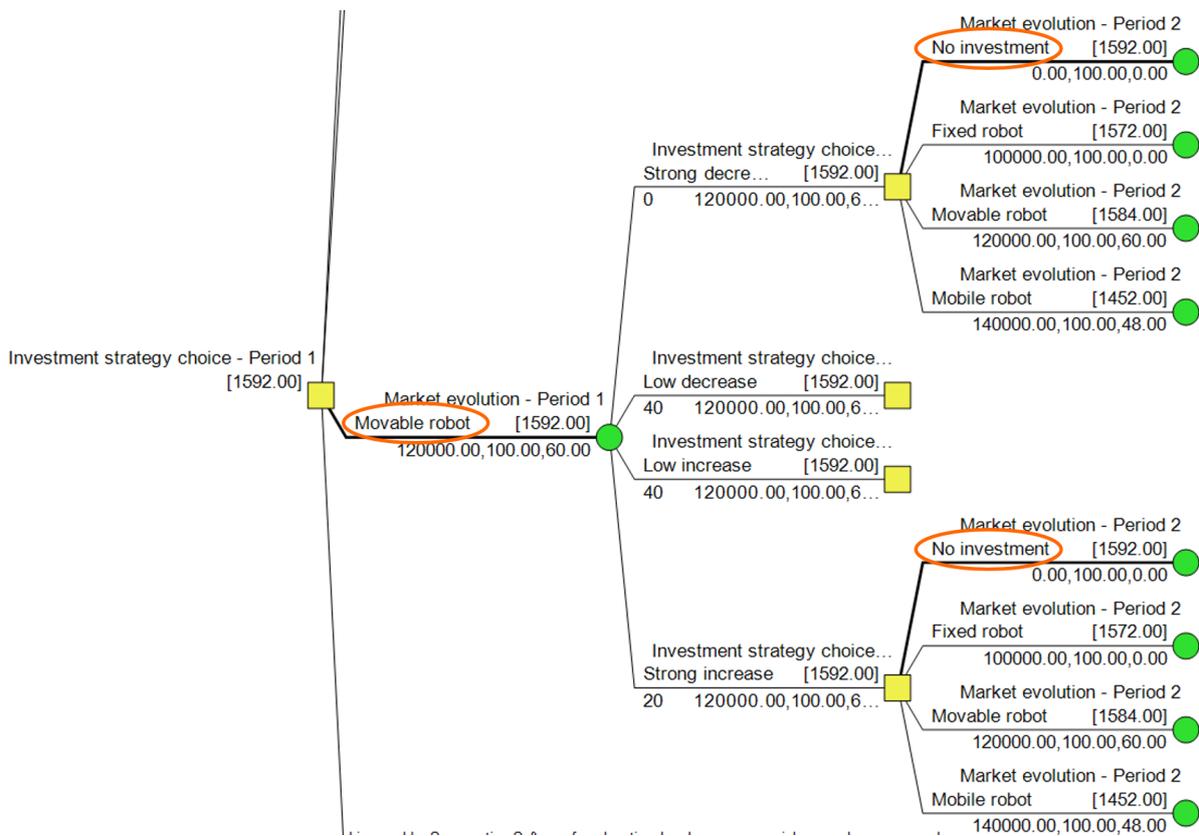


FIGURE 5.40 – Décision suggérée

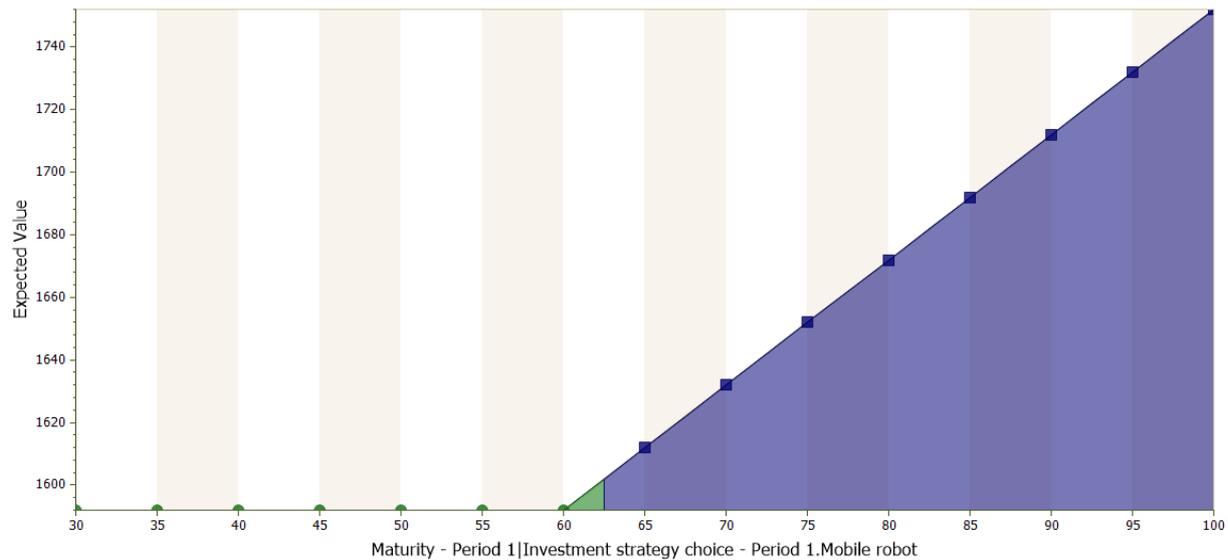


FIGURE 5.41 – Résultat de l'analyse de sensibilité sur l'indicateur de maturité du robot mobile

### 5.7.3.2 Analyse de sensibilité

Lors de l'analyse de sensibilité, nous avons la possibilité de permettre la variation d'un des attributs (paramètres) de la fonction d'utilité entre deux bornes. Ici, nous réalisons une analyse de la sensibilité sur le niveau de maturité des briques technologiques.

La section précédente ayant montré une préférence pour la solution "robot déplaçable", nous avons choisi de conduire une analyse de sensibilité sur la maturité  $M_R$  de la solution "robot mobile". Nous faisons varier cet indicateur entre 0.30 et 1. Les résultats, en Figure 5.41, montrent que le changement de résultat intervient pour une valeur de  $M_R$  comprise entre 0.60 et 0.65 qui se lit en abscisse. L'ordonnée exprime la valeur espérée de la fonction d'utilité, et elle augmente une fois la valeur seuil de  $M_R$  atteinte.

La simulation a été rejouée pour une valeur de maturité du robot mobile  $M_R = 0.65$  au lieu de 0.48 comme précédemment. L'arbre de décision final est présenté en Figure 5.42. En première période, il est suggéré d'investir dans la ressource mobile au lieu de la ressource déplaçable. Ce résultat confirme l'analyse de sensibilité.

On peut en conclure que la maturité des briques technologiques  $M_R$ , qui est mesurée en fonction du TRL et du coût comparé à une solution équivalente fixe (voir détails Section 4.2.4), a un impact fort sur la solution suggérée par la théorie de l'aide à la décision. Il est intéressant de pouvoir utiliser l'outil et générer des scénarios au fur et à mesure de l'évolution des prévisions et de la montée en maturité des solutions technologiques. D'autres briques technologiques peuvent également être intégrées aux solutions proposées au décideur dans cette analyse.

### 5.7.4 Conclusion de l'analyse de risques

Sans supprimer la liberté du choix du décideur, qui peut dépendre d'un contexte qu'il est complexe de modéliser dans son ensemble, cette étude montre l'apport de la théorie de l'aide à la décision en complément de la démarche de conception du système reconfigurable.

La construction de la fonction objectif multi-attributs permet de prendre en compte les

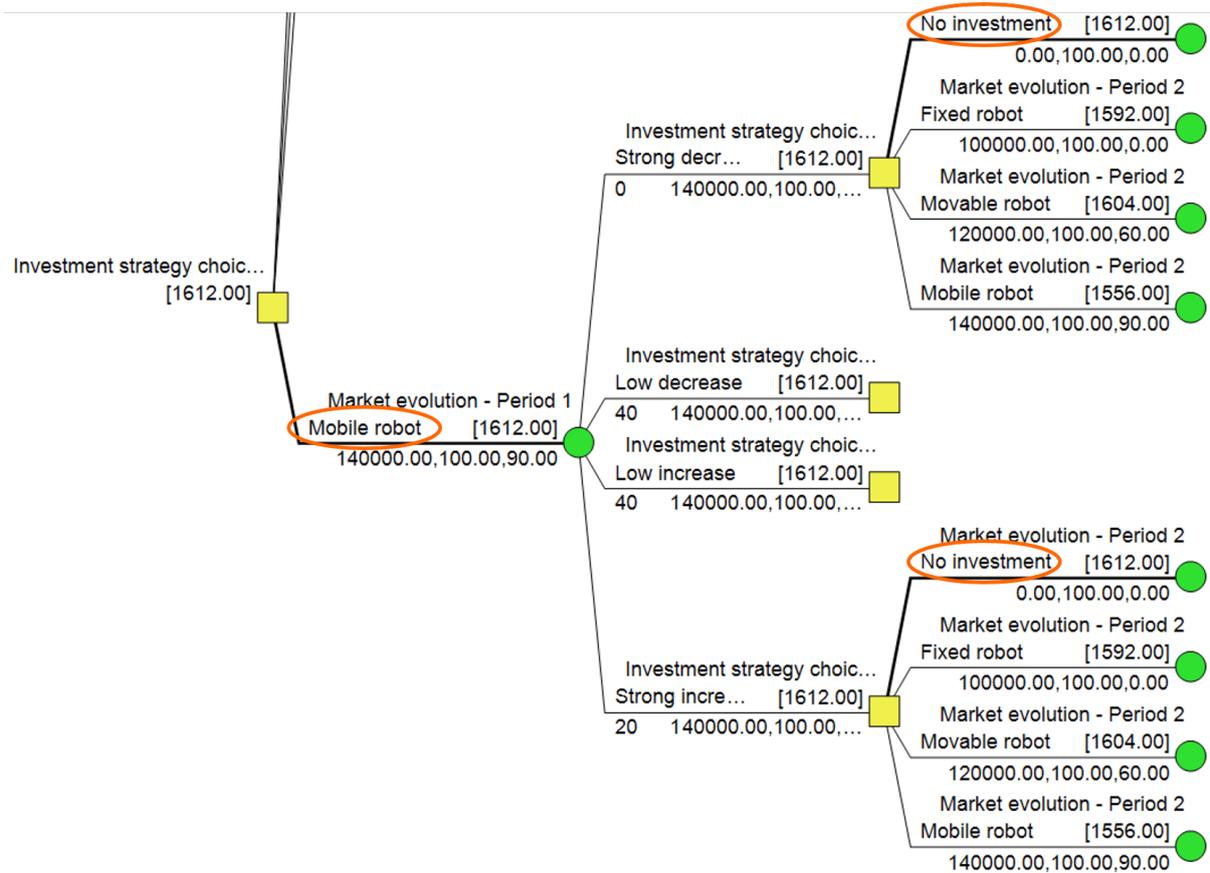


FIGURE 5.42 – Résultat après modification de l'indice de maturité du robot mobile

différents indicateurs présentés dans cette thèse. Grâce aux loteries équivalentes, les priorités et l'attitude face au risque du décideur sont prises en compte. En modélisant les évolutions futures du marché, il est possible de générer des simulations de l'évolution du système suite à des prises de décision.

La principale limite de la méthode réside dans la difficulté d'obtenir des prévisions quant à l'évolution du marché. Néanmoins, l'approche de la théorie d'aide à la décision permet un jugement supplémentaire afin de conseiller le décideur. Par ailleurs, la possibilité de procéder à une analyse de sensibilité permettant d'évaluer l'impact d'un paramètre sur le problème de conception du système reconfigurable, comme l'évolution du prix d'une solution encore peu mature aujourd'hui, est pertinente pour les industriels.

## 5.8 Conclusion

La démarche proposée a été appliquée à des scénarios variés du cas d'usage assemblage moteur du Groupe PSA. Les scénarios étudiés couvrent des cas de variations de la demande en volume et en ratio de mixte produit.

L'application de la démarche de conception du RAS a montré des résultats prometteurs en terme de niveau de performance, reconfigurabilité, et investissements. Ils sont mieux réalisés au moment opportun, permettant des investissements moindres et plus tardifs pour l'industriel.

En terme d'apport méthodologique, l'évaluation des configurations grâce aux indicateurs définis dans la thèse permet au décideur de connaître rapidement et précisément l'apport d'une brique technologique ou d'un changement d'implantation.

Pour finir, nous avons montré l'apport que peut avoir, en complément de la démarche de conception, la théorie de l'aide à la décision sur le choix de solution pour la conception d'un système en contexte incertain. Cette approche permet également d'évaluer la sensibilité d'une solution aux variations d'un paramètre, comme la montée en maturité d'une solution technologique.

La Figure 5.43 présente en synthèse l'apport de la démarche : à partir d'un contexte où l'installation industrielle est fixe, la démarche proposée apporte une solution de réglage de briques technologiques reconfigurables, avec un système évalué et ajusté, ce qui a pu être vérifié avec l'application sur un cas d'étude industriel dans ce chapitre.

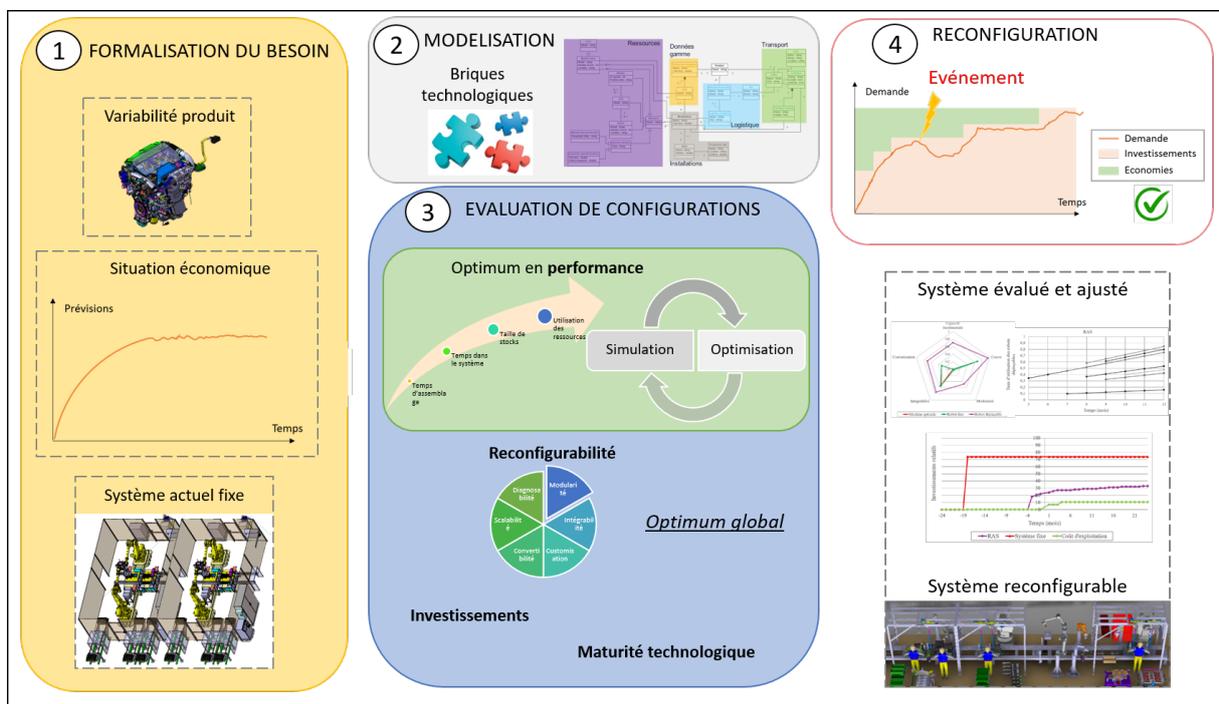


FIGURE 5.43 – Chapitre 5 : Démarche de conception appliquée à un cas industriel

## Chapitre 6

# Conclusion et perspectives

## 6.1 Conclusion du travail de recherche

Le contexte économique actuel ainsi que l'étude de l'état de l'art sur le sujet des systèmes reconfigurables ont montré la pertinence de ce sujet d'étude. Plus précisément, le sujet traité est la définition d'une démarche de conception pour le système reconfigurable.

Une revue de la littérature sur les méthodes d'évaluation de la reconfigurabilité des systèmes de production a permis de soulever le besoin de définir des indicateurs quantitatifs applicables à un large spectre de systèmes de production. Le Chapitre 2 présente les indicateurs, basés sur les caractéristiques de la reconfigurabilité définis par [Kor05] : *capacité incrémentale*, *convertibilité*, *modularité*, *intégrabilité*, et *customisation*.

La démarche de conception se divise en quatre étapes. En premier lieu, il est nécessaire d'identifier le besoin du cas d'usage en terme de reconfiguration et de flexibilité. Une fois le besoin défini, et les briques technologiques à implémenter connues, le système peut être modélisé en vue de tester divers scénarios de production. La troisième étape consiste à évaluer le système pour les scénarios de demande. Pour cela, un outil de simulation à événements discrets est utilisé, éventuellement couplé à un module d'optimisation selon le type de problème à résoudre. Durant cette étape, le système est ajusté à l'aide des indicateurs de performance et de reconfigurabilité obtenus. Le coût de la solution est également considéré. Enfin, la quatrième étape de la démarche consiste en la surveillance d'indicateurs de performance du système afin de surveiller l'adéquation entre la demande du marché et la capacité de production du système.

En ce qui concerne le couplage entre simulation et optimisation, deux approches ont été abordées : l'utilisation du module OptQuest commercialisé avec le logiciel de simulation Simul8, et le couplage entre un module sur mesure développé dans un environnement externe à la simulation. En fonction du type de problème à résoudre, une approche de couplage sera privilégiée par rapport à l'autre.

La démarche de conception a été appliquée à la transformation d'un système assemblage de groupes moto-propulseurs dans l'industrie automobile. La ligne de production d'origine est fixe, dédiée à la production d'une famille de produits similaires pour un volume donné. Cette ligne alterne actuellement postes manuels et cellules robotisées cloisonnées. Pour ce cas d'usage, un scénario de production sur 10 ans a été défini et étudié en appliquant la démarche de conception du RMS développée. Le système de production a été soumis à des contraintes de variation en volume et en ratio de mixte produit. Le résultat de l'étude permet de conclure que pour le scénario étudié, l'introduction de ressources robotisées modulaires et déplaçables est pertinente.

Enfin, par application de la théorie d'analyse des risques, l'attitude du décideur face au risque est mesurée. En fonction de l'aléa qu'il est prêt à affronter, et de l'importance qu'il accorde aux différents paramètres du système, nous pouvons lui proposer un réglage du système minimisant ce risque.

Dans le processus d'évaluation du système reconfigurable, la difficulté est de considérer et satisfaire des critères variés : critères de performance, reconfigurabilité, et coûts. En fonction des objectifs du décideur, un de ces trois objectifs peut être priorisé.

Les contributions principales de la thèse sont les suivantes :

- état de l'art sur les domaines suivants : moyens de mesure de la reconfigurabilité d'un système de production, démarches de conception du RMS, approche par optimisation, simulation ou couplage simulation-optimisation pour le réglage du système reconfigurable
- proposition d'une démarche de conception du système reconfigurable à destination des industriels

- définition d'indicateurs de reconfigurabilité pour le système d'assemblage basés sur les caractéristiques de la reconfigurabilité définies par [Kor05]
- définition d'un outil d'aide à la décision pour la conception du RMS
- couplage simulation - optimisation pour la résolution de trois problèmes consécutifs pour le réglage du système reconfigurable
- application de la théorie d'analyse des risques à la conception du RMS
- application à un cas d'étude industriel montrant un gain financier, une augmentation de la charge des ressources robotisées, et une augmentation du potentiel de reconfigurabilité du système, sur des scénarios de variations en volume et en ratio de mixte produit

Ce travail de thèse permet d'apporter une contribution dans le but d'accompagner les industriels dans la transformation de leurs installations pour être en mesure de suivre le marché fluctuant actuel auquel les lignes de production sont soumises. L'accompagnement vers une plus grande reconfigurabilité des systèmes de production s'inscrit dans les démarches Usines du Futur et Usine 4.0 menées actuellement chez les grands groupes comme les petites structures, et encouragées par les initiatives nationales comme l'Alliance Industrie du Futur en France ou Plattform Industrie 4.0 en Allemagne. Nous proposons des outils simples et concrets, facilement appréhendables et appropriables par les industriels. Les résultats obtenus sont mesurés par des métriques quantitatives ayant fait leurs preuves sur plusieurs scénarios d'un cas d'étude de l'industrie automobile.

## 6.2 Perspectives

Les résultats de ce travail ouvrent des perspectives industrielles et scientifiques qui pourront engendrer de nouveaux axes de recherche. La méthodologie présentée peut servir de point de départ de nouveaux développements.

L'approche par couplage simulation-optimisation pourrait être poursuivie avec d'autres algorithmes. Le module développé utilise un algorithme de recuit simulé, mais d'autres approches, comme les approches basées population, pourraient également donner de bons résultats.

Les travaux d'intégration et d'automatisation de la démarche de conception pourront être poursuivis, avec Simul8 ou un autre logiciel de simulation. Ces développements permettraient de poursuivre la réalisation de l'outil d'aide à décision présenté dans la thèse. L'automatisation du processus de conception peut passer par l'intégration d'une base de données des outils et ressources disponibles, pouvant être sélectionnés par un système expert construit sur des règles de conception, reposant par exemple sur la corrélation entre un besoin en reconfigurabilité et le degré de reconfigurabilité des briques technologiques, calculé à l'aide des indicateurs présentés dans la thèse. Sur le plan de l'intégration verticale au sein des usines, la remontée des données terrain et le raccord entre le modèle de simulation à événements discrets de l'usine et les données réelles permettraient de disposer d'un jumeau numérique (Digital Twin) de l'usine. De cette manière, le système d'aide à la décision serait en mesure de proposer des solutions en adéquation avec l'état de l'usine en terme de disponibilité des machines, et en adéquation avec la commande client réelle.

Des travaux prometteurs portants sur la conception automatique de layout permettent d'envisager une approche similaire pour les systèmes reconfigurables [Hag et al.18].

Au sein de l'entreprise qui a accueilli les travaux de recherche, la démarche a été appliquée à l'atelier d'assemblage des moteurs. Il serait intéressant d'employer la méthode afin d'évaluer la pertinence en terme de reconfigurabilité d'autres ateliers : ferrage, peinture, et assemblage

véhicule. A la vue du cas d'étude, l'atelier d'assemblage véhicule, qui est l'étape de production d'un véhicule qui fait face à la plus grande variabilité produit, pourrait être étudié en priorité.

La démarche développée dans la thèse pourrait également servir à évaluer la pertinence de l'intégration des solutions techniques développées dans les projets européens H2020 auxquels le Groupe PSA a participé dernièrement : THOMAS, Versatile, et ScalABLE 4.0. Ces projets ont pour point commun le développement de solutions semblables, axées sur la mise en place d'un système d'information permettant l'intégration verticale des données de la ligne, le développement d'un jumeau numérique et le déploiement de robots collaboratifs sur plateformes mobiles.

# Glossaire

**Carry-over** : stratégie de réutilisation des machines et robots inexploités, prélevés sur une ancienne ligne et installés sur une nouvelle ligne. Le carry-over évite l'achat d'une ressource neuve.

**Film de production** : liste ordonnancée des produits en entrée de ligne.

**Kitting** : méthode d'approvisionnement qui consiste à préparer des kits de pièces par produit dans une zone dédiée. Le kit est acheminé sur la ligne d'assemblage vers le produit auquel il est correspond.

**Layout** : implantation de l'atelier.

**Makespan** : temps écoulé entre le début et la fin de la fabrication d'une liste de produits.

**Plug and Produce** : qualité d'un équipement lui assurant une intégration simple et rapide sur la ligne de production, pour un démarrage immédiat.

**Ramp-up** : temps correspondant à la montée en cadence de la production lors du démarrage ou redémarrage d'une ligne.

**Simheuristique** : approche de résolution d'un problème par couplage entre une métaheuristique pour l'optimisation et un modèle de simulation à événements discrets.

**Takt time** : maille de temps unitaire pour accomplir une tâche selon la demande client.

**Temps de reconfiguration** : intervalle de temps compris entre l'arrêt de la production et le redémarrage (début du ramp-up) de la ligne après transformation.

**Temps de setup** : temps de réglage de l'équipement, inclus le temps de reprogrammation.



# Bibliographie

- [Ade et al.16] O. T. ADENUGA, K. MPOFU et A. M. KANISURU. “Agent-based control system methodology for Reconfigurable Bending Press Machine”. In : *Procedia CIRP* 57 (2016), p. 362-367. ISSN : 22128271.
- [Afn02] AFNOR. *NF E60-182 : Taux de rendement synthétique (TRS), taux de rendement global (TRG)*. 2002.
- [Alb et al.14] F. ALBRECHT, O. KLEINE et E. ABELE. “Planning and Optimization of Changeable Production Systems by Applying an Integrated System Dynamic and Discrete Event Simulation Approach”. In : *Procedia CIRP* 17 (2014), p. 386-391. ISSN : 22128271. DOI : 10.1016/j.procir.2014.01.039.
- [Ale et al.07] K. ALEXOPOULOS, N. PAPAKOSTAS, D. MOURTZIS, P. GOGOS et G. CHRYSOLOURIS. “Quantifying the flexibility of a manufacturing system by applying the transfer function”. In : *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* 20.6 (2007), p. 538-547. DOI : 10.1080/09511920600930046.
- [AlG et al.15] T. ALGEDDAWY et H. ELMARAGHY. “Determining Granularity of Changeable Manufacturing Systems Using Changeable Design Structure Matrix and Cladistics”. In : *Journal of Mechanical Design* 137.4 (2015), p. 041702. ISSN : 1050-0472. DOI : 10.1115/1.4029515.
- [And et al.17a] A.-L. ANDERSEN, M. BEJLEGAARD, T. D. BRUNOE et N. KJELD. “Investigating the impact of product volume and variety on production ramp-up”. In : *Managing Complexity*. Sous la dir. de J. BELLEMARE ET AL. Springer Proceedings in Business and Economics. Switzerland : Springer International Publishing, 2017, p. 421-434.
- [And et al.17b] A.-L. ANDERSEN, T. D. BRUNOE, K. NIELSEN et C. RÖSIÖ. “Towards a generic design method for reconfigurable manufacturing systems”. In : *Journal of Manufacturing Systems* 42 (2017), p. 179-195. ISSN : 02786125. DOI : 10.1016/j.jmsy.2016.11.006.
- [And et al.17c] A.-L. ANDERSEN, H. ELMARAGHY, W. ELMARAGHY, T. D. BRUNOE et K. NIELSEN. “A participatory systems design methodology for changeable manufacturing systems”. In : *International Journal of Production Research* 2.3 (2017), p. 1-19. ISSN : 0020-7543. DOI : 10.1080/00207543.2017.1394594.
- [Ara et al.00] T. ARAI, Y. AIYAMA, Y. MAEDA, M. SUGI et J. OTA. “Agile Assembly System by “Plug and Produce””. In : *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 49.1 (2000), p. 1-4. ISSN : 00078506. DOI : 10.1016/S0007-8506(07)62883-2.

- [Aur et al.17] P. AURICH, A. NAHHAS, T. REGGELIN et M. KRIST. "Simulation based optimization of a four stage hybrid flow shop with sequence-dependent setup times and availability constraints". In : *16th International Conference on Modeling and applied Simulation* (2017).
- [Aza et al.13] A. AZAB, H. ELMARAGHY, P. NYHUIS, J. PACHOW-FRAUENHOFER et M. SCHMIDT. "Mechanics of change : A framework to reconfigure manufacturing systems". In : *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 6 (2013), p. 110-119.
- [Bea et al.19] A. BEAUVILLE DIT EYNAUD, N. KLEMENT, O. GIBARU, L. ROUCOULES et L. DURVILLE. "Identification of reconfigurability enablers and weighting of reconfigurability characteristics based on a case study". In : *Procedia Manufacturing* 28 (2019), p. 96-101. ISSN : 23519789.
- [Bea et al.18] A. BEAUVILLE DIT EYNAUD, N. KLEMENT, L. ROUCOULES, O. GIBARU et L. DURVILLE. "UML based reconfiguration rate analysis of assembly line depending on robot integration". In : *IFAC-PapersOnLine* 51-11 (2018), p. 1168-1173. ISSN : 24058963.
- [Bea et al.20a] A. BEAUVILLE DIT EYNAUD, N. KLEMENT, L. ROUCOULES, O. GIBARU et L. DURVILLE. "Framework for the design and evaluation of a reconfigurable production system based on mobile robot integration". In : *Journal Manufacturing Systems, submitted* (2020).
- [Bea et al.20b] A. BEAUVILLE DIT EYNAUD, N. KLEMENT, L. ROUCOULES, O. GIBARU et L. DURVILLE. "Risk and decision analysis for Reconfigurable Assembly System Design under uncertainties". In : *Submitted to MOSIM20 - 13th International Conference on Modeling, Optimization and Simulation* (2020).
- [Bel et al.18] F. BELKADI, M. COLLEDANI, M. URGO, A. BERNARD, G. COLOMBO, G. BORZI et A. ASCHERI. "Modular design of production systems tailored to regional market requirements : A frugal innovation perspective". In : *16th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing INCOM 2018*. Sous la dir. de M. MACCHI, L. MONOSTORI et R. PINTO. Elsevier, 2018, p. 96-101.
- [Ben et al.16] Y. BENAMA, T. ALIX et N. PERRY. "Framework definition for the design of a mobile manufacturing system". In : *Advances on mechanics, design engineering and manufacturing*. Sous la dir. de Benoit EYNARD, Vincenzo NIGRELLI, Salvatore Massimo OLIVERI, Guillermo PERIS-FAJARNES et Sergio RIZZUTI. Lecture Notes in Mechanical Engineering. New York NY : Springer Berlin Heidelberg, 2016, p. 111-118. ISBN : 978-3-319-45780-2. DOI : 10.1007/978-3-319-45781-9-12.
- [Ben16] N. BENKAMOUN. "Systemic design methodology for changeable manufacturing systems". Thèse de doct. Clermont-Ferrand : Université Blaise Pascal - Clermont II, 2016.
- [Ben et al.14] N. BENKAMOUN, W. ELMARAGHY, A.-L. HUYET et K. KOUISS. "Architecture Framework for Manufacturing System Design". In : *Procedia CIRP* 17 (2014), p. 88-93. ISSN : 22128271. DOI : 10.1016/j.procir.2014.01.101.
- [Ben et al.15] N. BENKAMOUN, K. KOUISS et A.-L. HUYET. "An Intelligent Design Environment for Changeability Management - Application to Manufacturing Systems". In : *Proceedings of the 20th International Conference on Engineering Design (ICED15)* (2015).

- [Bor et al.19] M. BORTOLINI, A. FERRARINI, F. G. GALIZIA et C. MORA. “Implementation of Reconfigurable Manufacturing in the Italian Context : State-of-the-Art and Trends”. In : *Procedia Manufacturing* 39 (2019), p. 591-598. ISSN : 23519789.
- [Bor et al.18] M. BORTOLINI, F. G. GALIZIA et C. MORA. “Reconfigurable manufacturing systems : Literature review and research trend”. In : *Journal of Manufacturing Systems* 49 (2018), p. 93-106. ISSN : 02786125.
- [Bru et al.17] T. D. BRUNOE, A.-L. ANDERSEN et K. NIELSEN. “Reconfigurable Manufacturing Systems in Small and Medium Enterprises”. In : *Managing Complexity*. Sous la dir. de J. BELLEMARE ET AL. Springer Proceedings in Business and Economics. Switzerland : Springer International Publishing, 2017, p. 205-213.
- [Bue et al.17] J. BUERGIN, J. BEISECKER, S. FISCHER, B. GEIER, H. TUTSCH, S. MERCAMP et G. LANZA. “Generation of Planned Orders and their Matching with Customer Orders in Multi-variant Series Production”. In : *Procedia CIRP* 61 (2017), p. 499-504. ISSN : 22128271. DOI : 10.1016/j.procir.2016.11.159.
- [Bue et al.18a] J. BUERGIN, S. HELMING, J. ANDREAS, P. BLAETTCHEN, Y. SCHWEIZER, F. BITTE, B. HAEFNER et G. LANZA. “Local order scheduling for mixed-model assembly lines in the aircraft manufacturing industry”. In : *Production Engineering* (2018). ISSN : 1863-7353. DOI : 10.1007/s11740-018-0852-x. URL : <https://doi.org/10.1007/s11740-018-0852-x>.
- [Bue et al.18b] J. BUERGIN et al. “Robust assignment of customer orders with uncertain configurations in a production network for aircraft manufacturing”. In : *International Journal of Production Research* (2018), p. 1-15. ISSN : 0020-7543. DOI : 10.1080/00207543.2018.1482018.
- [Cer et al.20] A. CERQUEUS, X. DELORME et A. DOLGUI. “Analysis of the scalability for different configurations of lines”. In : *Reconfigurable Manufacturing Systems : From Design to Implementation*. Sous la dir. de L. BENYOUCEF. Series in Advanced Manufacturing. Springer, 2020.
- [Chi et al.17] M. CHICA et A. A. JUAN PREZ. “Why Simheuristics? Benefits, Limitations, and Best Practices When Combining Metaheuristics with Simulation”. In : *SSRN Electronic Journal* (2017). ISSN : 1556-5068. DOI : 10.2139/ssrn.2919208.
- [CIR14] CIRP, éd. *Dictionary of Production Engineering/Wörterbuch der Fertigungstechnik/Dictionnaire des Techniques de Production Mechanique Vol IV : Assembly/Montage/Assemblage*. Aufl. 2011. Berlin : Springer Berlin, 2014. ISBN : 3642431038.
- [Cle et al.13] R. T. CLEMEN et T. REILLY. *Making Hard Decisions with DecisionTools - 3rd Edition*. South-Western, Mason, 2013. ISBN : 978-0-538-79757-3.
- [Col et al.18] M. COLLEDANI, A. YEMANE, G. LUGARESI, N. FRIGERIO, G. BORZI, A. BASSI et D. CALLEGARO. “A Decision Support Methodology for the Design of Reconfigurable Assembly Systems”. In : *16th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing INCOM 2018*. Sous la dir. de M. MACCHI, L. MONOSTORI et R. PINTO. Elsevier, 2018, p. 108-115.
- [Deb et al.02] K. DEB, A. PRATAP, S. AGARWAL et T. MEYARIVAN. “A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm : NSGA-II”. In : *IEEE Transactions on Evolutionary Computation* 6.2 (2002), p. 182-197.

- [Deh et al.17] M. DEHGHANIMOHAMMADABADI, M. REZAEIAHARI et T. K. KEYSER. “Sim-heuristic of patient scheduling using a table-experiment approach — Simio and Matlab integration application”. In : *2017 Winter Simulation Conference (WSC)*. IEEE, 2017, p. 2929-2939. ISBN : 978-1-5386-3428-8. DOI : 10.1109/WSC.2017.8248015.
- [Dem et al.17] H. I. DEMIR, C. ERDEN, M. IPEK et O. UYGUN. “Solving Weighted Number of Operation Plus Processing Time Due-Date Assignment, Weighted Scheduling and Process Planning Integration Problem Using Genetic and Simulated Annealing Search Methods”. In : *Industrial Journal of Industrial and Manufacturing Engineering* 11.1 (2017).
- [EIM et al.16] H. ELMARAGHY et W. ELMARAGHY. “Smart Adaptable Assembly Systems”. In : *Procedia CIRP* 44 (2016), p. 4-13. ISSN : 22128271. DOI : 10.1016/j.procir.2016.04.107.
- [EIM et al.17] H. ELMARAGHY, M. MOUSSA, W. ELMARAGHY et M. ABBAS. “Integrated Product/System Design and Planning for New Product Family in a Changeable Learning Factory”. In : *Procedia Manufacturing* 9 (2017), p. 65-72. ISSN : 23519789.
- [Esk et al.11] H. ESKANDARI, E. MAHMOODI, H. FALLAH et C. D. GEIGER. “Performance analysis of commercial simulation-based optimization packages : OptQuest and Witness Optimizer”. In : *Proceedings of the 2011 Winter Simulation Conference (WSC)* (2011), p. 2363-2373.
- [Fig et al.14] G. FIGUEIRA et B. ALMADA-LOBO. “Hybrid simulation–optimization methods : A taxonomy and discussion”. In : *Simulation Modelling Practice and Theory* 46 (2014), p. 118-134.
- [Fis11] G. S. FISHMAN. *Discrete-event simulation : Modeling, programming, and analysis*. Springer series in operations research and financial engineering. New York et London : Springer, 2011. ISBN : 1475735529.
- [Fra et al.20] G. FRAGAPANE, D. IVANOV, M. PERON, F. SGARBOSSA et J. O. STRANDHAGEN. “Increasing flexibility and productivity in Industry 4.0 production networks with autonomous mobile robots and smart intralogistics”. In : *Annals of Operations Research* (2020), p. 1-19.
- [Fra et al.16] E. FRANCALANZA, J. C. BORG et C. CONSTANTINESCU. “A Fuzzy Logic Based Approach to Explore Manufacturing System Changeability Level Decisions”. In : *Procedia CIRP* 41 (2016), p. 3-8. ISSN : 22128271. DOI : 10.1016/j.procir.2015.12.011.
- [Fu02] M. C. FU. “Optimization for simulation : Theory vs. practice”. In : *INFORMS Journal on Computing* 14.3 (2002), p. 192-215.
- [Gar13] I. H. GARBIE. “A methodology for the reconfiguration process in manufacturing systems”. In : *Journal of Manufacturing Technology Management* 25.6 (2013), p. 891-915. DOI : 10.1108/JMTM-06-2011-0064.
- [Gau et al.19] L. GAUSS, D. P. LACERDA et M. A. SELBITTO. “Module-based machinery design : a method to support the design of modular machine families for reconfigurable manufacturing systems”. In : *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* (2019), p. 1-26. DOI : 10.1007/s00170-019-03358-1.

- [Gha et al.16] S. GHANEI et T. ALGEDDAWY. "A New Model for Sustainable Changeability and Production Planning". In : *Procedia CIRP* 57 (2016), p. 522-526. ISSN : 22128271. DOI : 10.1016/j.procir.2016.11.090.
- [Gko et al.19] C. GKOURNELOS, N. KOUSI, A. C. BAVELOS, S. AIVALIOTIS, C. GIANNOULIS, G. MICHALOS et S. MAKRIS. "Model based reconfiguration of flexible production systems". In : *Procedia CIRP* 86 (2019), p. 80-85. ISSN : 22128271.
- [Goe13] K. D. GOEPEL. "Implementing the analytic hierarchy process as a standart method for multi-criteria decision making in corporate enterprises". In : *Proceedings of the International Symposium on the Analytic Hierarchy Process* (2013).
- [Goo04] P. GOODWIN. "Decision trees and influence diagrams". In : *Decision Analysis for Management Judgment - 3rd Edition*. Sous la dir. de P. GOODWIN et G. WRIGHT. Wiley, 2004, p. 143-164. ISBN : 0-470-86108-8.
- [Gou et al.14] M. GOURGAND, N. GRANGEON et N. KLEMENT. "Activities planning and resource Assignment on Multi-place Hospital System - Exact and Approach Methods Adapted from the Bin Packing Problem". In : *HEALTHINF 2014 - Proceedings of the International Conference on Health Informatics*. Angers, France, 2014, p. 117-124. DOI : 10.5220/0004803901170124.
- [Gyu et al.12] D. GYULAI, Z. VÉN, A. PFEIFFER, J. VÁNCZA et L. MONOSTORI. "Matching Demand and System Structure in Reconfigurable Assembly Systems". In : *Procedia CIRP* 3 (2012), p. 579-584. ISSN : 22128271. DOI : 10.1016/j.procir.2012.07.099.
- [Had et al.17] H. HADDOU BENDERBAL, M. DAHANE et L. BENYUCEF. "Flexibility-based multi-objective approach for machines selection in reconfigurable manufacturing system (RMS) design under unavailability constraints". In : *International Journal of Production Research* 55.5 (2017), p. 1-19. ISSN : 0020-7543. DOI : 10.1080/00207543.2017.1321802.
- [Had et al.18] H. HADDOU-BENDERBAL, M. DAHANE et L. BENYUCEF. "Modularity assessment in reconfigurable manufacturing systems (RMS) design : an Archived Multi-Objective Simulated Annealing-based approach". In : *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 94.1-4 (2018), p. 729-749.
- [Hag et al.18] S. HAGEMANN et R. STARK. "Automated Body-in-White Production System Design : Data-based Generation of Production System Configurations". In : *Proceedings of 4th International Conference on Frontiers of Educational Technologies* (2018), p. 192-196.
- [Has et al.12] M. A. HASAN, J. SARKIS et R. SHANKAR. "Agility and production flow layouts : An analytical decision analysis". In : *Computers & Industrial Engineering* 62.4 (2012), p. 898-907. ISSN : 03608352. DOI : 10.1016/j.cie.2011.12.011.
- [Has et al.19] S. E. HASHEMI PETROODI, A. BEAUVILLE DIT EYNAUD, N. KLEMENT et R. TAVAKKOLI-MOGHADDAM. "Simulation-based optimization approach with scenario-based product sequence in a reconfigurable manufacturing system (RMS) : A case study". In : *IFAC-PapersOnLine* 52.13 (2019), p. 2638-2643. ISSN : 24058963. DOI : 10.1016/j.ifacol.2019.11.605.
- [Haw et al.16] S. HAWER, N. BRAUN et G. REINHART. "Analyzing Interdependencies between Factory Change Enablers Applying Fuzzy Cognitive Maps". In : *Procedia CIRP* 52 (2016), p. 151-156. ISSN : 22128271. DOI : 10.1016/j.procir.2016.07.015.

- [Hee et al.15] A. HEES et G. REINHART. "Approach for production planning in reconfigurable manufacturing systems". In : *Procedia CIRP* 33 (2015), p. 70-75. ISSN : 22128271.
- [Hon et al.07] K.K.B. HON et S. XU. "Impact of Product Life Cycle on Manufacturing Systems Reconfiguration". In : *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 56.1 (2007), p. 455-458. ISSN : 00078506. DOI : 10.1016/j.cirp.2007.05.109.
- [Hu et al.11] S. J. HU, J. KO, L. WEYAND, H. A. ELMARAGHY, T. K. LIEN, Y. KOREN, H. BLEY, G. CHRYSOLOURIS, N. NASR et M. SHPITALNI. "Assembly system design and operations for product variety". In : *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 60.2 (2011), p. 715-733. ISSN : 00078506. DOI : 10.1016/j.cirp.2011.05.004.
- [Hua et al.18] S. H. HUANG, G. X. WANG, S. M. WANG, C. ZENG, H. W. WANG et Y. YAN. "Multi-scale Configuration Design Method of Reconfigurable Manufacturing System Based on Living System Theory". In : *2018 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)* (2018).
- [Hue et al.16] G. HUETTEMANN, C. GAFFRY et R. H. SCHMITT. "Adaptation of Reconfigurable Manufacturing Systems for Industrial Assembly ? Review of Flexibility Paradigms, Concepts, and Outlook". In : *Procedia CIRP* 52 (2016), p. 112-117. ISSN : 22128271. DOI : 10.1016/j.procir.2016.07.021.
- [Jac et al.97] S. H. JACOBSON, A. W. JOHNSON, K. A. SULLIVAN, M. A. FLEISCHER et A. KUMAR. "Metaheuristics for a Flexible Assembly System Design Problem". In : *Journal of Heuristics* 3 (1997), p. 139-159.
- [Jai et al.13] A. JAIN, P. K. JAIN, Felix T.S. CHAN et S. SINGH. "A review on manufacturing flexibility". In : *International Journal of Production Research* 51.19 (2013), p. 5946-5970. ISSN : 0020-7543. DOI : 10.1080/00207543.2013.824627.
- [Jin et al.97] J. JINA, A. K. BHATTACHARYA et A. D. WALTON. "Applying lean principles for high product variety and low volumes : Some issues and propositions". In : *Logistics Information Management* 10.1 (1997), p. 5-13. ISSN : 0957-6053. DOI : 10.1108/09576059710159655.
- [Jov et al.03] F. JOVANE, Y. KOREN et C. R. BOËR. "Present and Future of Flexible Automation : Towards New Paradigms". In : *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 52.2 (2003), p. 543-560. ISSN : 00078506. DOI : 10.1016/S0007-8506(07)60203-0.
- [Jua et al.15] A. A. JUAN, J. FAULIN, S. E. GRASMAN, M. RABE et G. FIGUIERA. "A review of simheuristics : Extending metaheuristics to deal with stochastic combinatorial optimization problems". In : *Operations Research Perspectives* 2 (2015), p. 62-72.
- [Kap et al.18] A. KAPITANOV, V. MITROFANOV et S. EGOROV. "A study of reconfigurable production system performance". In : *MATEC Web of Conferences* 224 (2018).
- [Kee74] R. L. KEENEY. "Multiplicative utility functions". In : *Operations Research* 22.1 (1974), p. 22-34.
- [Kha et al.14] U. KHALEEQ UZ ZAMAN et A. A. BAQAI. "Mixed Model Assembly Line Sequencing by Minimizing Utility Work and Using Genetic Algorithm". In : *Proceedings of the ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition - 2014*. New York N.Y. : ASME, 2014, V011T14A030. ISBN : 978-0-7918-4960-6. DOI : 10.1115/IMECE2014-38000.

- [Kle14] N. KLEMENT. “Planification et affectation de ressources dans les réseaux d soin : analogie avec le problème du bin packing, proposition de méthodes approchées”. Thèse de doct. Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II, 2014.
- [Kor05] Y. KOREN. “Reconfigurable Manufacturing and Beyond (Keynote paper)”. In : *CIRP 3rd International Conference on Reconfigurable Manufacturing*. 2005.
- [Kor et al.17] Y. KOREN, X. GU et W. GUO. “Reconfigurable manufacturing systems : Principles, design, and future trends”. In : *Frontiers of Mechanical Engineering* 48.2 (2017), p. 527. ISSN : 2095-0233. DOI : 10.1007/s11465-018-0483-0.
- [Kor et al.99] Y. KOREN, U. HEISEL, F. JOVANE, T. MORIWAKI, G. PRITSCHOW, G. ULSOY et H. VAN BRUSSEL. “Reconfigurable Manufacturing Systems”. In : *Annals of the CIRP* 48 (1999), p. 527-540.
- [Kor et al.10] Y. KOREN et M. SHPITALNI. “Design of reconfigurable manufacturing systems”. In : *Journal of Manufacturing Systems* 29.4 (2010), p. 130-141. ISSN : 02786125. DOI : 10.1016/j.jmsy.2011.01.001.
- [Kou et al.19] N. KOUSI, S. KOUKAS, G. MICHALOS et S. MAKRIS. “Scheduling of smart intra-factory material supply operations using mobile robots”. In : *International Journal of Production Research* 57.3 (2019), p. 801-814. ISSN : 0020-7543.
- [Kra et al.12] A. KRAUSS, J. JÓSVAI et E. MÜLLER. “Use of Optimisers for the Solution of Multi-objective Problems”. In : *Use cases of discrete event simulation*. Sous la dir. de Steffen BANGSOW. New York : Springer, 2012, p. 331-362. ISBN : 978-3-642-28776-3. DOI : 10.1007/978-3-642-28777-0-16.
- [Kur et al.17] K. A. KURNIADI et K. RYU. “Development of IOT-based Reconfigurable Manufacturing System to solve Reconfiguration Planning Problem”. In : *Procedia Manufacturing* 11 (2017), p. 965-972. ISSN : 23519789. DOI : 10.1016/j.promfg.2017.07.201.
- [Lac et al.03] P. LACOMME, C. PRINS et M. SEVAUX. *Algorithmes de graphes*. Eyrolles. 2003. ISBN : 2-212-11385-4.
- [Lan et al.01] R. G. LANDERS, B. K. MIN et Y. KOREN. “Reconfigurable machine tools”. In : *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 50.1 (2001), p. 269-274. ISSN : 00078506.
- [Las et al.16] M. LASSAGNE et F. BAUDOIN. *Modéliser un problème de décision dans l'incertain : arbre de décision et diagramme d'influence*. Saint-Malo : Congrès Lambda Mu 20, 2016.
- [Mag et al.18] I. MAGANHA, C. SILVA et L. M. FERREIRA. “Understanding reconfigurability of manufacturing systems : An empirical analysis”. In : *Journal of Manufacturing Systems* 48 (2018), p. 120-130. ISSN : 02786125.
- [Mag et al.19] I. MAGANHA, C. SILVA, N. KLEMENT, A. BEAUVILLE DIT EYNAUD, L. DURVILLE et S. MONIZ. “Hybrid optimisation approach for assignment and sequencing decision-making in reconfigurable assembly lines”. In : *IFAC-PapersOnLine* 52.13 (2019), p. 1367-1372. ISSN : 24058963.
- [Mar et al.04] R. T. MARLER et J. S. ARORA. “Survey of multi-objective optimization methods for engineering”. In : *Structural and Multidisciplinary Optimization* 26 (2004), p. 369-395.

- [Mär et al.11] L. MÄRZ, W. KRUG, O. ROSE et G. WEIGERT. *Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik : Praxisorientierter Leitfaden mit Fallbeispielen*. VDI-Buch. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011. ISBN : 3642145361.
- [Meh et al.00] M. G. MEHRABI, A. G. ULSOY et Y. KOREN. "Reconfigurable Manufacturing Systems : Key to Future Manufacturing". In : *Journal of Intelligent Manufacturing* 11.4 (2000), p. 403-419. ISSN : 09565515. DOI : 10.1023/A:1008930403506.
- [Mic et al.16] G. MICHALOS, N. KOUSI, S. MAKRIS et G. CHRYSOLOURIS. "Performance Assessment of Production Systems with Mobile Robots". In : *Procedia CIRP* 41 (2016), p. 195-200. ISSN : 22128271. DOI : 10.1016/j.procir.2015.12.097.
- [Mit et al.14] K. K. MITTAL et P. K. JAIN. "An Overview of Performance Measures in Reconfigurable Manufacturing System". In : *Procedia Engineering* 69 (2014), p. 1125-1129.
- [Möl08] N. MÖLLER. *Bestimmung der Wirtschaftlichkeit wandlungsfähiger Produktionssysteme*. T. 212. Forschungsberichte / IWB. München : Utz, 2008. ISBN : 3831607788.
- [Mon et al.15] S. MONIZ, A. MARQUES, S. CARVALHO et J. PINHO DE SOUSA. "A simulation-optimization approach for production planning and scheduling". In : *International IIE Conference 2015* (2015).
- [Nap et al.19] A. NAPOLEONE, A.-L. ANDERSEN, A. POZZETTI et M. MACCHI. "Reconfigurable Manufacturing : A Classification of Elements Enabling Convertibility and Scalability". In : *Advances in Production Management Systems. Production Management for the Factory of the Future* 566 (2019), p. 349-356.
- [Nap et al.18] A. NAPOLEONE, A. POZZETTI et M. MACCHI. "Core Characteristics of Reconfigurability and their Influencing Elements". In : *IFAC-PapersOnLine* 51.11 (2018), p. 116-121. ISSN : 24058963.
- [Nyh et al.10] P. NYHUIS, G. REINHART et E. ABELE, éd. *Wandlungsfähige Produktionssysteme*. Schriftenreihe der Hochschulgruppe für Arbeits- und Betriebsorganisation e.V. (HAB). Berlin : Gito, 2010. ISBN : 3942183153.
- [Par et al.16] A. PARAMASIVAM, M. RAJMOHAN et K. SURYA PRAKASA RAO. "Performance Evaluation of Reconfigurable Assembly Line". In : *Middle-East Journal of Scientific Research* 24 (11) (2016), p. 3635-3643.
- [Pas93] Z. J. PASEK. "An adaptive assembly system for automotive applications". Thèse de doct. University of Michigan, 1993.
- [Pui et al.17] E. PUIK, D. TELGEN, L.J.M. VAN MOERGESTEL et D. CEGLAREK. "Assessment of reconfiguration schemes for Reconfigurable Manufacturing Systems based on resources and lead time". In : *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 43 (2017), p. 30-38.
- [Rei00] G. REINHART. "Change in thinking and acting". In : *Proceedings of Münchener Kolloquium* (2000).
- [Rös et al.18] C. RÖSIÖ, T. ASLAM, K. B. SRIKANTH et S. SHETTY. "Towards an assessment criterion of reconfigurable manufacturing systems within the automotive industry". In : *CARV 2018*. Elsevier, 2018.
- [Ryb et al.16] J. RYBICKA, A. TIWARI et S. ENTICOTT. "Testing a Flexible Manufacturing System Facility Production Capacity through Discrete Even Simulation : Automotive Case Study". In : 10.4 (2016).

- [Saa80] T. L. SAATY. *Multicriteria Decision Making : The Analytic Hierarchy Process*. McGraw-Hill. New York, 1980.
- [Sal et al.19] M. A. SALIBA, S. AZZOPARDI, C. PACE et D. ZAMMIT. “A heuristic approach to module synthesis in the design of reconfigurable manufacturing systems”. In : *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 102 (2019), p. 4337-4359.
- [Set et al.90] A. K.a SETHI et S. P. SETHI. “Flexibility in manufacturing : A survey”. In : *International Journal of Flexible Manufacturing Systems* 2.4 (1990). ISSN : 0920-6299. DOI : 10.1007/BF00186471.
- [Sil15] L. SILVA BELISARIO. “Contribution de l’apprentissage par simulation à l’auto-adaptation des systèmes de production”. Thèse de doct. 2015.
- [Soh et al.14] S. SOHRT, Z. SEIBOLD, T. KRÜHN, L. PRÖSSDORF, L. OVERMEYER et K. FURMANS. “Buffering Algorithms for Modular, Decentralized Controlled Material Handling Systems”. In : *1st Symposium on Automated Systems and Technologies (AST)*. Garbsen, 2014.
- [Sou et al.13] M. SOUIER, Z. SARI et A. HASSAM. “Real-time rescheduling metaheuristic algorithms applied to FMS with routing flexibility”. In : *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 64 (2013), p. 145-164.
- [Sta13] International Organization for STANDARDIZATION. *Systèmes spatiaux — Définition des Niveaux de Maturité de la Technologie (NMT) et de leurs critères d’évaluation*. 2013.
- [Tch et al.12] D. TCHOFFA, L. DUTA et A. EL MHAMEDI. “Decision analysis in Management of Industrial Incidents”. In : *IFAC Proceedings Volumes* 45.6 (2012), p. 951-955. ISSN : 14746670.
- [Tho et al.98] A. THOMAS et S. LAMOURI. “Industrial Management in the Process Industry”. In : *IFAC Proceedings Volumes* 31.15 (1998), p. 841-846. ISSN : 14746670. DOI : 10.1016/S1474-6670(17)40657-4.
- [Tol et al.19] T. A. M. TOLIO et M. C. MAGNANINI. “The Paradigm of Pit-Stop Manufacturing”. In : *AMP 2019 : Proceedings of the 4th International Conference on the Industry 4.0 Model for Advanced Manufacturing* (2019), p. 35-47.
- [Tou et al.18] F. A. TOUZOUT et L. BENYOUCEF. “Multi-objective sustainable process plan generation in a reconfigurable manufacturing environment : exact and adapted evolutionary approaches”. In : *International Journal of Production Research* 57.8 (2018), p. 2531-2547. ISSN : 0020-7543.
- [Tou et al.19] F. A. TOUZOUT et L. BENYOUCEF. “Multi-objective multi-unit process plan generation in a reconfigurable manufacturing environment : a comparative study of three hybrid metaheuristics”. In : *International Journal of Production Research* 57.24 (2019), p. 7520-7535. ISSN : 0020-7543.
- [Tve et al.74] A. TVERSKY et D. KAHNEMAN. “Judgement under uncertainty : heuristics and biases”. In : *Utility, Probability, and Human Decision Making*. Sous la dir. de D. WENDT et C. VLEK. Theory and Decisions Library. Dordrecht : Springer, 1974, p. 141-162.
- [Voo et al.12] F. A. VOORHORST, A. AVAI et C. R. BOËR. “Optimizing a Highly Flexible Shoe Production Plant Using Simulation”. In : *Use cases of discrete event simulation*. Sous la dir. de Steffen BANGSOW. New York : Springer, 2012, p. 131-145. ISBN : 978-3-642-28776-3.

- [Wan et al.17] G. X. WANG, S. H. HUANG, Y. YAN et J. J. DU. "Reconfiguration schemes evaluation based on preference ranking of key characteristics of reconfigurable manufacturing systems". In : *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 89.5-8 (2017), p. 2231-2249. ISSN : 0268-3768. DOI : 10.1007/s00170-016-9243-7.
- [Wan et al.13] W. WANG et Y. KOREN. "Design Principles of Scalable Reconfigurable Manufacturing Systems". In : *IFAC Proceedings Volumes* 46.9 (2013), p. 1411-1416. ISSN : 14746670. DOI : 10.3182/20130619-3-RU-3018.00185.
- [Wey et al.11] M. WEYRICH, S. SCHNELL et P. STRATIL. "Simulation of an Automotive Supplier Plant towards Designing optimally flexible Manufacturing Systems". In : *21st International Conference on Production Research ICPR21, Innovation in Product and Production* (2011).
- [Wie et al.04] H. P. WIENDAHL et C. L. HEGER. "Justifying Changeability. A Methodical Approach to Achieving Cost Effectiveness". In : *Journal for Manufacturing Science and Production* 6.1-2 (2004), p. 6. ISSN : 2191-0375. DOI : 10.1515/IJMSP.2004.6.1-2.33.
- [Wie et al.07] H.-P. WIENDAHL, H. A. ELMARAGHY, P. NYHUIS, M. F. ZÄH, H.-H. WIENDAHL, N. DUFFIE et M. BRIEKE. "Changeable Manufacturing - Classification, Design and Operation". In : *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 56.2 (2007), p. 783-809. ISSN : 00078506. DOI : 10.1016/j.cirp.2007.10.003.
- [Wu92] B. WU. *Manufacturing Systems Design and Analysis*. Dordrecht : Springer Netherlands, 1992. ISBN : 978-0-412-40840-3. DOI : 10.1007/978-94-011-3128-5.
- [You et al.06] A. M. A. YOUSSEF et H. A. ELMARAGHY. "Assessment of manufacturing systems reconfiguration smoothness". In : *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 30 (2006), p. 174-193.
- [You et al.07] A. M. A. YOUSSEF et H. A. ELMARAGHY. "Optimal configuration selection for Reconfigurable Manufacturing Systems". In : *International Journal of Flexible Manufacturing Systems* 19.2 (2007), p. 67-106. ISSN : 0920-6299. DOI : 10.1007/s10696-007-9020-x.
- [Zür et al.17] M. ZÜRN, M. REICHENBACH, T. REICHLING, J. HODAPP et U. BERGER. "Smarte Produktionsassistenz für wandlungsfähige Fabrik". In : *atp edition* 59.05 (2017), p. 44. ISSN : 2364-3137. DOI : 10.17560/atp.v59i05.1852.

# Annexe A

## Questionnaire

### A.1 Questionnaire

Le questionnaire conçu à partir des questionnaires développés par [Mag et al.18] et [And et al.17b] est présenté sur les pages suivantes. La dernière partie du questionnaire (section C) correspond à l'analyse AHP pour la pondération des critères de reconfigurabilité.

# Introduction

La ligne de production considérée consiste en des tâches

- De fabrication
- D'assemblage

Précisez le domaine (tôlerie, usinage culasse, assemblage moteur, etc.)

Quel est le volume de production annuel moyen de la ligne citée ?

Combien de familles produit sont couvertes ?

Combien de variantes sont couvertes au sein d'une même famille de produits ?

## SECTION A

A1. Comment décririez-vous la complexité du produit considéré ?

Conception modulaire du produit	1	2	3	4	5	6	7	Conception rigide du produit
Peu d'éléments dans la nomenclature	1	2	3	4	5	6	7	Nomenclature complexe
Peu d'opérations nécessaires	1	2	3	4	5	6	7	Grand nombre d'opérations nécessaires

A2. En quelle mesure êtes-vous d'accord avec les déclarations suivantes ?

	Strongly disagree	Disagree	Somewhat disagree	Neither agree or disagree	Somewhat agree	Agree	Strongly agree
La demande client varie très fortement suivant les semaines.	1	2	3	4	5	6	7
Le volume de production varie très fortement suivant les semaines.	1	2	3	4	5	6	7
Le ratio de mix produit effectivement réalisé varie très fortement d'une semaine à l'autre.	1	2	3	4	5	6	7
Les besoins en approvisionnement (volume et mix produit) varient fortement selon les semaines.	1	2	3	4	5	6	7
Les produits sont caractérisés par un grand nombre de modifications techniques (vie série).	1	2	3	4	5	6	7
Les fournisseurs ont fréquemment besoin d'apporter des modifications aux produits dont ils approvisionnent l'usine.	1	2	3	4	5	6	7

A3. En quelle mesure êtes-vous d'accord avec la déclaration suivante ?

	Strongly disagree	Disagree	Somewhat disagree	Neither agree or disagree	Somewhat agree	Agree	Strongly agree
La configuration de l'implantation change plusieurs fois par an.	1	2	3	4	5	6	7

A4. Choisissez la déclaration qui correspond le mieux au système de production de votre entreprise.

- Les produits sont distribués immédiatement après avoir reçu la commande client.
- Les opérations d'assemblage sont effectuées seulement après avoir reçu la commande client.
- La production débute après avoir reçu la commande.
- Les produits sont conçus et fabriqués seulement après avoir reçu la commande client.

A5. *Quelle importance ont les critères suivants lors d'une modification du layout du système de production ?*

	Not at all important	Not very important	Somewhat important	Neither important or unimportant	Somewhat important	Very important	Extremely important
Quantité d'en-cours	1	2	3	4	5	6	7
Lead time	1	2	3	4	5	6	7
Cadence	1	2	3	4	5	6	7
Coût du flux d'approvisionnement (log)	1	2	3	4	5	6	7
Coût du transport du produit entre les postes	1	2	3	4	5	6	7
Utilisation des ressources	1	2	3	4	5	6	7
Ressources humaines	1	2	3	4	5	6	7
Minimisation des surfaces	1	2	3	4	5	6	7
Capacité d'adapter la taille d'équipe au ratio de volume à produire.	1	2	3	4	5	6	7

A6. *Comment est caractérisée la configuration de l'implantation de l'atelier ?*

- Implantation centrée process
- Implantation centrée produit
- Implantation cellulaire

A7. *A quelle fréquence est-il nécessaire de moderniser le process ?*

## SECTION B

B1. *En quelle mesure êtes-vous d'accord avec les déclarations suivantes ?*

	Strongly disagree	Disagree	Somewhat disagree	Neither agree or disagree	Somewhat agree	Agree	Strongly agree
Les équipements du système de production peuvent être facilement ajoutés ou retirés de l'implantation	1	2	3	4	5	6	7
Les équipements se divisent en modules fonctionnels qui peuvent être simplement ajoutés/supprimés	1	2	3	4	5	6	7
L'équipement principal peut facilement être réorganisé dans le but d'obtenir une configuration adaptée pour produire de nouveaux produits	1	2	3	4	5	6	7
Le système de transport de matériaux et produits entre les postes de travail permet une transformation aisée du flux de produits, selon le type de produit	1	2	3	4	5	6	7
Le système de production est basé sur une construction modulaire permettant d'intégrer rapidement des modules matériels ou logiciels	1	2	3	4	5	6	7

B2. *En quelle mesure êtes-vous d'accord avec les déclarations suivantes ?*

	Strongly disagree	Disagree	Somewhat disagree	Neither agree or disagree	Somewhat agree	Agree	Strongly agree
Il est possible d'intégrer rapidement et de manière fiable un nouvel équipement grâce à des interfaces mécaniques et logicielles.	1	2	3	4	5	6	7
Les installations sont pilotées par un système à architecture ouverte.	1	2	3	4	5	6	7
Le système de production permet une intégration simple d'équipements nouveaux.	1	2	3	4	5	6	7
Les équipements matériels et le système de pilotage ont été conçus de manière à pouvoir intégrer facilement et rapidement de nouveaux composants.	1	2	3	4	5	6	7

*B3. En quelle mesure êtes-vous d'accord avec les déclarations suivantes ?*

	Strongly disagree	Disagree	Somewhat disagree	Neither agree or disagree	Somewhat agree	Agree	Strongly agree
L'implantation des équipements dans l'atelier a été définie en considérant toute une famille de produits.	1	2	3	4	5	6	7
La capacité du système de production et sa flexibilité ont été conçus afin de répondre au besoin de production d'une famille de produits	1	2	3	4	5	6	7
Le système de pilotage, basé sur une architecture ouverte, peut être adapté afin de piloter exactement les fonctions désirées	1	2	3	4	5	6	7

*B4. En quelle mesure êtes-vous d'accord avec les déclarations suivantes ?*

	Strongly disagree	Disagree	Somewhat disagree	Neither agree or disagree	Somewhat agree	Agree	Strongly agree
Les équipements du système de production peuvent aisément être transformés afin de répondre à des changements des besoins en production en terme de volume produit.	1	2	3	4	5	6	7
Il est facile d'arrêter puis de redémarrer les installations ou une machine et de les/la reconfigurer afin d'accueillir la production d'un nouveau produit.	1	2	3	4	5	6	7
Il est possible de produire ou assembler deux produits différents s'ils appartiennent à la même famille produit.	1	2	3	4	5	6	7
Il est possible de produire ou assembler deux produits différents s'ils appartiennent à deux familles distinctes.	1	2	3	4	5	6	7
Le système de production permet un changement aisé entre les produits existants et peut s'adapter à de nouveaux produits dans le futur.	1	2	3	4	5	6	7

**PROCESS**

*B4.1 Quelles sont les dimensions géométriques du produit et comment cela diffère-t-il entre les variantes ?*

- L - différence <30%
- M - différence 30-60%
- H - différence >60%

*B4.2 En quelle proportion les dimensions géométriques du produit seront-elles amenées à varier dans les prochaines générations et prochaines variantes du produit ?*

- L - différence <30%
- M - différence 30-60%
- H - différence >60%

*B4.3 En quelle mesure les besoins process sont-ils différents selon les variantes ?*

- L - différence <30%
- M - différence 30-60%
- H - différence >60%

*B4.4 Comment les exigences pour le process pour les prochaines générations de produits et de variantes devraient-elles différer en comparaison aux besoins actuels ?*

- L - différence <30%
- M - différence 30-60%
- H - différence >60%

*B4.5 A quel point les spécifications pour le design des nouveaux produits sont-elles imprévisibles ?*

- L - prédictabilité <10%
- M - prédictabilité 10-50%
- H - prédictabilité >50%

**PRODUIT**

*B4.6 A quelle fréquence une nouvelle variante ou une nouvelle génération de produit est-elle introduite ?*

*B4.7 Comment l'introduction de nouveaux produits est-elle prévue d'évoluer les 3 à 5 prochaines années ?*

- L - pas d'évolution ou diminution
- M - augmentation <30%
- H - augmentation >30%

**MIX**

*B4.8 En quelle mesure y a-t-il une fluctuation en volume au sein des variantes selon les périodes de planification ?(ex : de semaine en semaine)*

- L - différence <10%
- M - différence 10-30%
- H - différence >30%

*B4.9 Comment la fluctuation du volume de production des variantes est-elle prévue d'évoluer les 3 à 5 prochaines années ?*

- L - pas d'évolution ou diminution
- M - augmentation <30%
- H - augmentation >30%

*B5. En quelle mesure êtes-vous d'accord avec les déclarations suivantes ?*

	Strongly disagree	Disagree	Somewhat disagree	Neither agree or disagree	Somewhat agree	Agree	Strongly agree
La capacité de production peut être modifiée en ajoutant/retirant des composants.	1	2	3	4	5	6	7
Le système de production est très réactif aux pannes.	1	2	3	4	5	6	7
Il est facile d'ajouter des équipements quelle que soit l'étape de production, sans interrompre la ligne sur une durée prolongée.	1	2	3	4	5	6	7
Le temps de cycle peut être modifié dans un laps de temps court.	1	2	3	4	5	6	7

## VOLUME

*B5.1 En quelle mesure le volume de production total varie actuellement entre les différentes périodes de planification ?*

- L - différence <10%
- M - différence 10-30%
- H - différence >30%

*B5.2 Comment la fluctuation du volume de production produit est-elle prévue d'évoluer les 3 à 5 prochaines années ? : Diminution (<30%)*

- L - pas d'évolution ou diminution
- M - augmentation <30%
- H - augmentation >30%

*B5.3 A quel point le volume de production total est-il imprévisible ?*

- L - précision <10%
- M - précision 10-30% à l'année
- H - précision >30% au delà

*B5.4 Comment l'imprévisibilité concernant le volume de production produit est-elle prévue d'évoluer les 3 à 5 prochaines années ?*

- L - pas d'évolution ou diminution
- M - augmentation <30%
- H - augmentation >30%

*B5.5 A quel point l'échéance pour le lancement d'un nouveau produit sur le marché est-elle imprévisible ?*

- L - précision <10%
- M - précision 10-50%
- H - précision >50%

*B6. En quelle mesure êtes-vous d'accord avec les déclarations suivantes ?*

	Strongly disagree	Disagree	Somewhat disagree	Neither agree or disagree	Somewhat agree	Agree	Strongly agree
Le système de production peut identifier automatiquement les produits défectueux, identifier la cause racine et corriger les paramètres du système de production liés au défaut.	1	2	3	4	5	6	7
Le système de production comprend des appareils permettant le contrôle qualité des produits en temps réel.	1	2	3	4	5	6	7
Le système de production dispose d'équipements d'inspection pouvant être reconfigurés aisément pour être employés sur différentes stations.	1	2	3	4	5	6	7
Pendant la montée en cadence, des équipements permettent la détection précoce de défauts et leur correction. (fréquence augmentée)	1	2	3	4	5	6	7

	Strongly disagree	Disagree	Somewhat disagree	Neither agree or disagree	Somewhat agree	Agree	Strongly agree
Le système de production peut identifier automatiquement les problèmes de qualité et les causes racines, mais une intervention est nécessaire afin de les corriger.	1	2	3	4	5	6	7

## SECTION C

Comparez les critères suivants un à un.

*De votre point de vue, pour chaque paire de critère, quel est le critère le plus important au regard de la reconfigurabilité du système de production?*

Modularité : Equipements et logiciels sous forme de modules fonctionnels

Intégrabilité : Capacité d'intégrer un nouvel équipement de manière rapide et simple

Customisation : Capacité de réglage du système de production adapté à une famille de produits en particulier

Convertibilité : Capacité à changer aisément les fonctionnalités du système pour répondre à de nouveaux besoins de production

Capacité d'incrémentation : Capacité d'augmentation ou diminution du volume de production

Capacité de diagnostic : Capacité de détection de pannes et défauts qualité

Modularité	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Intégrabilité
Modularité	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Customisation
Modularité	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Convertibilité
Modularité	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Capacité d'incrémentation
Modularité	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Capacité de diagnostic
Intégrabilité	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Customisation
Intégrabilité	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Convertibilité
Intégrabilité	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Capacité d'incrémentation
Intégrabilité	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Capacité de diagnostic
Customisation	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Convertibilité
Customisation	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Capacité d'incrémentation
Customisation	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Capacité de diagnostic
Convertibilité	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Capacité d'incrémentation
Convertibilité	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Capacité de diagnostic
Capacité d'incrémentation	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Capacité de diagnostic



## Annexe B

# Modèles Simul8

Cette Annexe présente les modèles de simulation de la ligne pilote du cas d’usage industriel traité au Chapitre 5. Le logiciel utilisé est Simul8 2019 Version 26.0 Build 3677.

### B.1 Modèle EB

La Figure B.1 montre le modèle Simul8 pour la ligne mono-produit du moteur essence EB, cité Sections 5.3 et 5.4.

Dans cette vue, les cases bleues correspondent aux postes de travail, au nombre de 20, et les activités à l’intérieur des postes correspondent au détail des tâches d’assemblage. Le modèle contient également des stocks, visible par exemple en entrée de chaque station de travail sur la gauche. Les ressources, opérateurs ou robots, sont visible à droite des postes où ils sont requis.

### B.2 Modèle du mixte produit EB-DVR

La Figure B.2 montre le modèle Simul8 pour la ligne multi-produits produisant les moteurs essence EB et diesel DVR. Le scénario de ratio de mixte produit variable s’y réfère dans la Section 5.5.

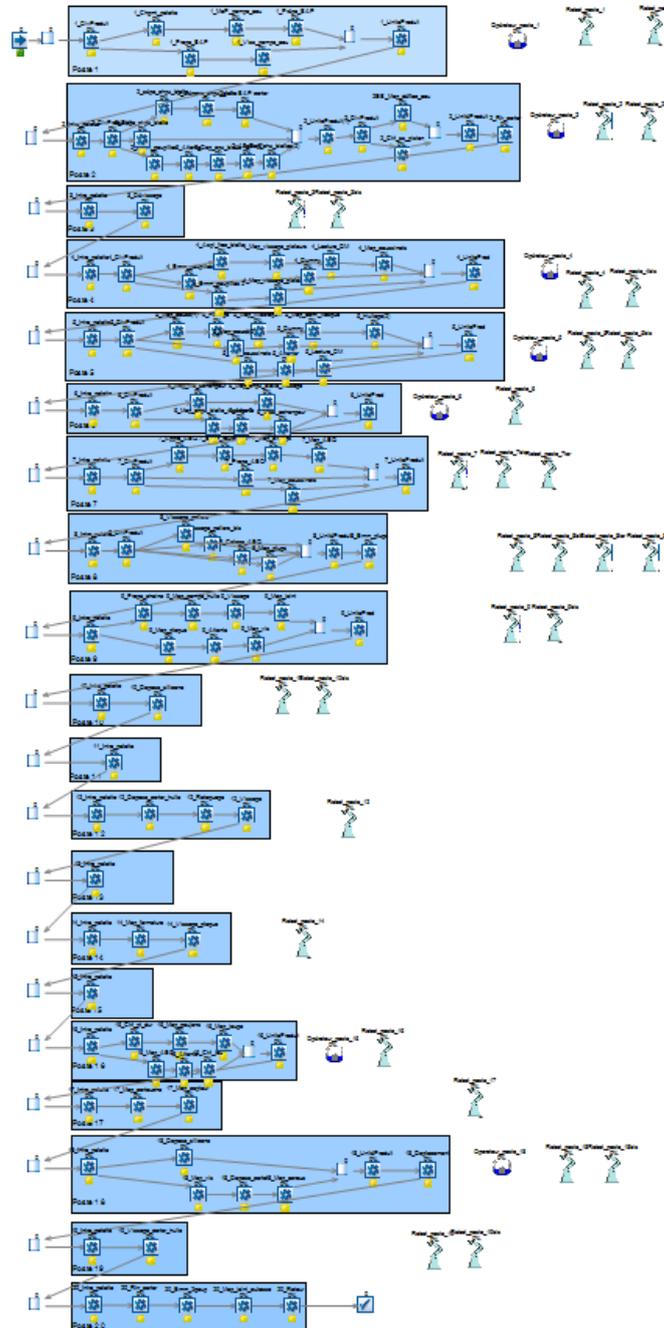


FIGURE B.1 – Modèle Simul8 de la ligne mono-produit EB

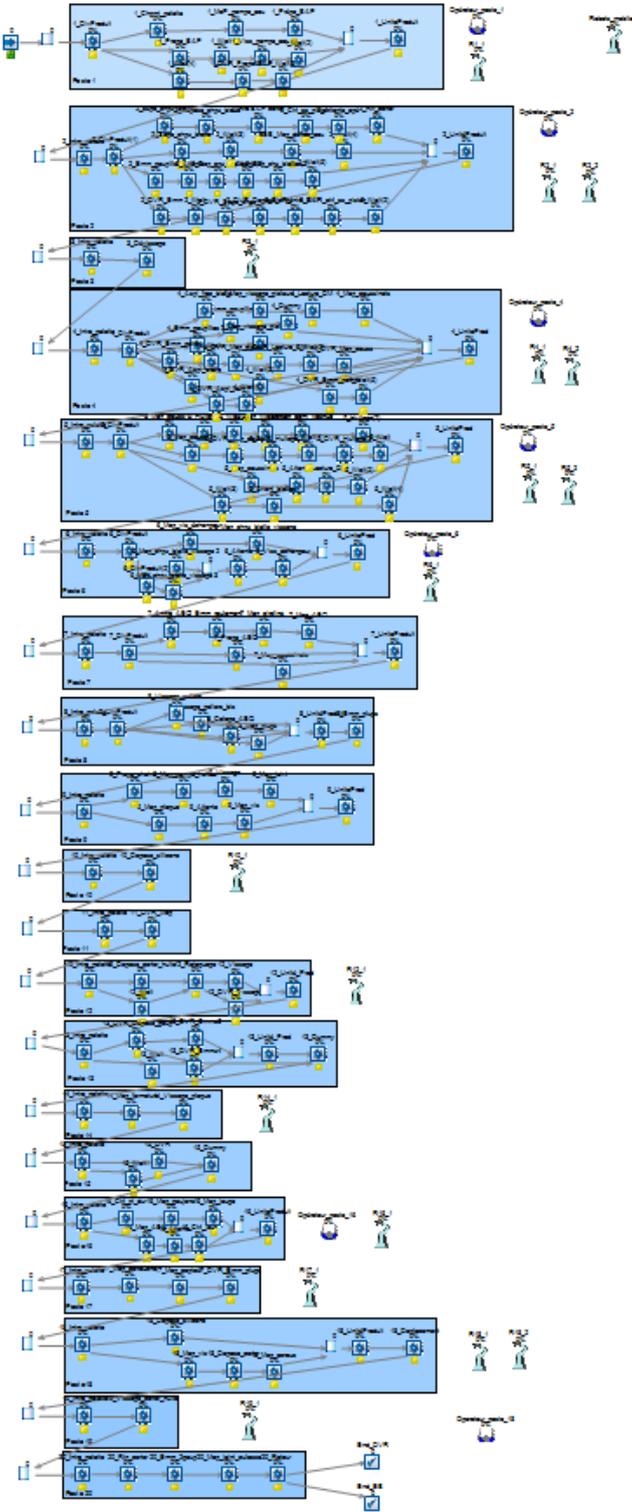


FIGURE B.2 – Modèle Simul8 de la ligne multi-produits EB-DVR



## Annexe C

# Théorie d'analyse des risques

### C.1 Flux de données

La Figure C.1 illustre les flux de données entre les modules utilisés pour l'analyse des risques dans la démarche de conception du système reconfigurable, abordée Section 4.4.2.

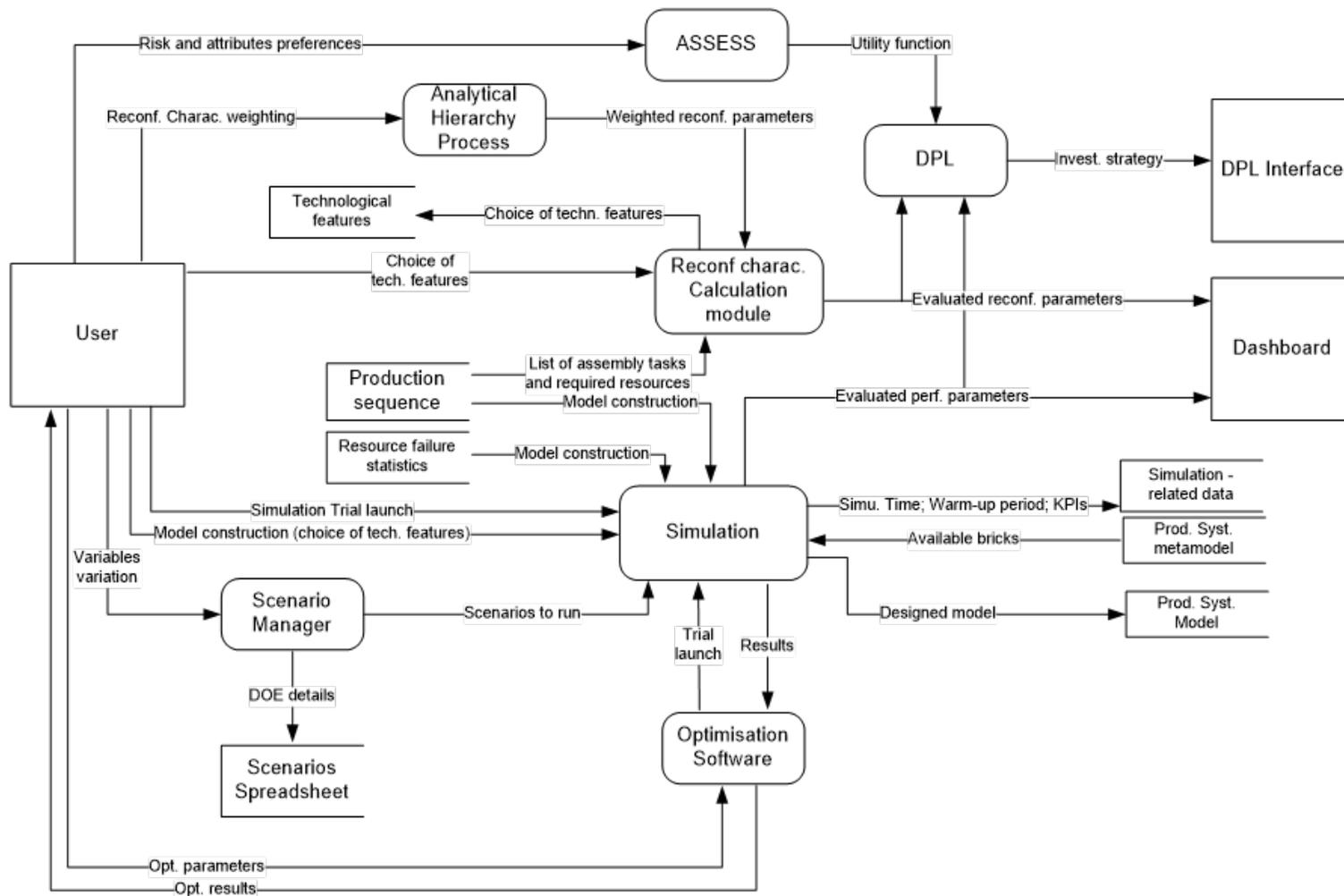


FIGURE C.1 – Diagramme de flux de données avec analyse des risques

## C.2 Fonction d'utilité multi-attributs

Cette section présente la construction de la fonction d'utilité pour la résolution de problème de décision dans l'incertain, à laquelle les Sections 4.4.3.3 et 5.7.2.1 font référence.

La Formule C.1 présente la formule générique de la fonction d'utilité avec quatre attributs, définie par [Kee74].

$$F(u_1, u_2, u_3, u_4) = [(1 + K * k_1 * u_1)(1 + K * k_2 * u_2)(1 + K * k_3 * u_3)(1 + K * k_4 * u_4) - 1] * \frac{1}{K} \quad (\text{C.1})$$

Grâce à l'évaluation des attributs via le logiciel ASSESS, les fonctions d'utilité et les constantes suivantes sont générées par le logiciel pour chaque attribut :

$$K = 0.91$$

**Investissements :**

$$u_1 = \left( \frac{\text{Investissement} + 140000}{140000} \right)^{2.874}$$

$$k_1 = 0.25$$

**Taux d'utilisation des ressources :**

$$u_2 = \left( \frac{\text{Taux d'utilisation}}{100} \right)^{0.57}$$

$$k_2 = 0.4$$

**Maturité  $M_R$  :**

$$u_3 = \left( \frac{M_R}{100} \right)^{2.941}$$

$$k_3 = 0.1$$

**Reconfigurabilité  $R$  :**

$$u_4 = \left( \frac{R}{100} \right)^{1.357}$$

$$k_4 = 0.05$$





**Résumé :** L'industrie est à la recherche d'un nouveau type de moyens de production, flexibles et reconfigurables, permettant un investissement incrémental suivant la demande du marché. Les lignes de production actuelles de moteurs dans l'industrie automobile sont dédiées à une famille de produits, pour une cadence donnée. L'introduction d'un nouveau produit nécessite de lourds investissements et un arrêt prolongé des lignes. Les installations futures doivent permettre des variations en volume et en type de produits, en utilisant les ressources à leur capacité maximale dans un souci de rentabilité. L'objectif est l'élaboration d'une démarche de conception du système reconfigurable. Des solutions, faisant appel à la robotique collaborative et mobile et à des principes de modularité de l'équipement, sont proposées et évaluées via simulation. La configuration présentant le meilleur compromis performance-reconfigurabilité-investissements est retenue. L'attitude du décideur face au risque est également prise en compte, afin de le guider au mieux lors la conception.

**Mots clés :** Reconfigurabilité, Démarche de conception, Aide à la décision

**Abstract :** The automotive industry is interested in a new type of flexible and reconfigurable production system, enabling an incremental investment in production facilities adapted to market changes. Actual engine production lines in the automotive industry are dedicated to a single product and to a given throughput. To introduce a new product family, the firm has to invest in new facilities and to stop the production flow. The main objective of this thesis is to develop a framework for the design, evaluation and reconfiguration of the production system. Solutions based on the integration of mobile robots as modules of the system are proposed, tested in simulation environments and rated. The selection of the appropriated production system is based on a compromise between performance, reconfigurability, and investments. The decider's behavior towards risk is also studied, to propose the best choice according to his objectives and profile, taking into account the evolution profile of the market.

**Keywords :** Reconfigurable Assembly Systems (RAS), Reconfigurability, Design approach