

ParisTech
INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES
PARIS INSTITUTE OF TECHNOLOGY

ARTS ET MÉTIERS ParisTech

2016-ENAM-0057

École doctorale n° 432 : Science et Métiers de l'Ingénieur

Doctorat ParisTech

T H È S E

pour obtenir le grade de docteur délivré par

L'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers

Spécialité "Génie Industriel "

Présentée et soutenue publiquement par

Mahenina, Remiel FENO

Le 13 Décembre 2016

Analyse et évaluation de la reconfiguration d'une ligne de production
Application à l'assemblage en tôlerie automobile

Directrice de thèse : **Aline CAUVIN**
Co-encadrement de la thèse : **Alain FERRARINI**

Jury

M. Vincent CHAPURLAT, Professeur, LGI2P, Ecole des Mines d'Alès	Président
Mme Marija JANKOVIC, Professeur, LGI, Ecole Centrale de Paris	Rapporteur
M. Lionel AMODEO, Professeur, LOSI, Université de Technologie de Troyes	Rapporteur
M. Lionel ROUCOULES, Professeur, LSIS, Arts et Métiers ParisTech d'Aix-en-Provence	Examinateur
Mme Aline CAUVIN, Maitre de conférences HDR, LSIS, Aix-Marseille Université	Examinateur
M. Alain FERRARINI, Maitre de conférences, LSIS, Aix-Marseille Université	Examinateur
M. Ali SIADAT, Professeur, LCFC, Arts et Métiers ParisTech de Metz	Invité
M. Thomas DALANCON, Expert assemblage tôlerie, Renault SA	Invité

T H È S E

Arts et Métiers ParisTech - Centre d'Aix en Provence
Laboratoire des sciences de l'information et des systèmes (LSIS)

Avant-Propos

Ces travaux de recherche ont été menés dans le cadre d'une thèse CIFRE N° 0614 / 2012 entre :

— L'équipe Ingénierie Numérique des Systèmes Mécaniques (INSM) du Laboratoire des Sciences de l'Information et des Systèmes (LSIS) à l'Ecole Nationale des Arts et Métiers d'Aix-en-Provence.

— L'équipe avant-projet et process numérique du département assemblage tôlerie de Renault au Téchnocentre de Guyancourt.

Remerciements

Un très grand merci à mes directeurs de thèse Aline CAUVIN et Alain FERRARINI pour leur confiance et leur disponibilité. Je ne pourrais pas compter le nombre d'heures que vous avez passé à relire mes papiers. Merci pour la bonne humeur et le sérieux avec lequel vous avez su partager vos connaissances pour orienter mes réflexions sur différents sujets.

Ce travail n'aurait jamais abouti sans les conseils avisés et les encouragements de mon responsable industriel, Thomas DALANCON que je remercie vivement.

Je remercie aussi les rapporteurs et examinateurs qui ont bien voulu me faire l'honneur d'évaluer mes travaux de recherche, à savoir Mme Marija JANKOVIC, M. Lionel AMODEO, M. M. Vincent CHAPURLAT et M. Ali SIADAT.

Je remercie également le professeur Lionel ROUCOULES pour son accueil au sien de l'équipe INSM. Ses conseils avisés concernant la démarche de recherche en général m'ont été très bénéfiques.

Je tiens à remercier Loubna Kichou, Myriam Djaiet, Zakaria Moukkar et Slim Oueslati pour leurs contributions à ce travail par leurs apports sur différents sujets. Je vous souhaite de la réussite pour vos projets personnels et professionnels.

Je remercie mes amis ainsi que les personnes qui ont contribué de près ou de loin au bon déroulement de ma thèse.

Enfin, je remercie ma famille pour leur soutien et leurs encouragements. J'ai une pensée particulière pour mes parents qui sont parti durant ma thèse. Merci pour tout !

Remiel

Table des matières

Table des matières v

Introduction générale 1

Contexte, problématique et état de l'art 5

I Contexte et problématique 7
- I.1 Contexte industriel : assemblage tôlerie automobile . . . 9
  - I.1.1 Le processus d'assemblage de la caisse d'un véhicule . . . 10
  - I.1.2 Les parties prenantes d'un projet d'industrialisation . . . 11
  - I.1.3 Phases amont du processus d'industrialisation . . . 12
  - I.1.4 Besoins industriels : aide à la décision . . . 16
- I.2 Contexte scientifique : conception préliminaire de SdP . . . 17
  - I.2.1 Reconfiguration de ligne de production . . . 17
  - I.2.2 Evaluation des performances et prise de décision . . . 19
  - I.2.3 Modélisation des processus de fabrication / assemblage . . . 19
- I.3 Problématiques et objectifs de recherche . . . 20
  - I.3.1 Problématique : évaluation des choix de reconfiguration d'une ligne de production . . . 21
  - I.3.2 Objectifs de la thèse . . . 22
- I.4 Conclusions . . . 22

II Etat de l'art 25
- II.1 Reconfiguration de ligne de production . . . 27
  - II.1.1 Modélisation des processus de reconfiguration . . . 28

II.1.2 Les systèmes de production reconfigurables (RMS) 33
II.1.3 Approches existantes de reconfiguration de systèmes 34
II.1.4 Discussion 36
II.2 Evaluation des performances et prise de décision 36
II.2.1 Contexte de l'évaluation 37
II.2.2 Modélisation pour l'évaluation des performances 43
II.2.3 Les méthodes d'aide à la décision multicritère 49
II.3 Modélisation des processus de fabrication / assemblage 53
II.3.1 Gestion du cycle de vie des produits (PLM) 55
II.3.2 Le concept d'usine numérique 56
II.3.3 Gestion des processus de fabrication (MPM) 59
II.4 Bilan et positionnement 60
II.4.1 Synthèse des approches, méthodes et outils existants 61
II.4.2 Contributions 61

Propositions pour l'analyse et l'évaluation des choix de reconfiguration d'une ligne de production 63

III Reconfiguration progressive de lignes de production 65
III.1 Architecture et configuration de ligne de production 69
III.1.1 Architecture d'implantation de ligne 69
III.1.2 Configuration du processus d'assemblage 71
III.1.3 La reconfiguration à ces deux niveaux de décision 73
III.2 Analogie entre la reconfiguration et le réordonnancement 75
III.2.1 Principes de l'analogie 76
III.2.2 La méthode de réparation de planning 78
III.2.3 Transposition des concepts 82
III.3 Méthode de reconfiguration progressive de ligne de production 84
III.3.1 Eléments déclencheurs du processus de reconfiguration 85
III.3.2 Stratégie de reconfiguration 85
III.3.3 Opérations de reconfiguration 86
III.3.4 Les étapes de la méthode de reconfiguration 89
III.3.5 Métamodèle de la méthode de reconfiguration 90
III.4 Conclusions 91

IV Evaluation des choix de reconfiguration d'une ligne de production 93
IV.1 Les critères d'évaluation 95
IV.2 Les critères d'évaluation : point de vue projet 96
IV.2.1 L'investissement 96

IV.2.2 La flexibilité 97
IV.2.3 L'engagement des opérateurs 99
IV.3 Les critères d'évaluation : point de vue métier 100
IV.3.1 Concepts et modèles pour l'évaluation basée sur les règles métiers . 101
IV.3.2 Synthèse des résultats : matrice de décision 104
IV.3.3 Exemple d'évaluation des critères métier 105
IV.3.4 Conclusion sur l'évaluation des critères métier 108
IV.4 Evaluation globale et synthèse des solutions 108
IV.4.1 Approche multicritère : la méthode Prométhée 109
IV.4.2 Synthèse des solutions pour la prise de décision 112
IV.5 Conclusions 116

V Proposition d'un processus de revue numérique d'atelier 117
V.1 Revue d'étude industrielle 120
V.1.1 Objectifs d'une revue d'étude industrielle 120
V.1.2 Importance des représentations intermédiaires 121
V.1.3 Proposition d'un processus de revue numérique d'atelier 122
V.1.4 Expérimentations préliminaires 125
V.2 Préparation d'une revue numérique d'atelier 126
V.2.1 Import des données 127
V.2.2 Modification de l'architecture d'implantation d'atelier 128
V.2.3 Modification de la configuration d'une ligne de production 130
V.3 Déroulement d'une revue numérique d'atelier 131
V.3.1 Revue globale d'architecture d'implantation d'atelier 131
V.3.2 Revue détaillée d'une configuration de ligne de production 132
V.3.3 Constats et détection des interférences 134
V.4 Conclusions 135

Application industrielle 137

VI Application : assemblage des "ouvrants" d'une caisse de véhicule 139
VI.1 Contexte de l'étude : assemblage des ouvrants 141
VI.1.1 Généralités sur le processus d'assemblage des "ouvrants" 142
VI.1.2 Objectifs de l'étude 143
VI.1.3 Description de la configuration initiale 143
VI.1.4 Objectifs de production : capacité et diversité 144
VI.2 Recherche de solutions 145
VI.2.1 Mise en œuvre de la stratégie de reconfiguration 145
VI.2.2 Identification des solutions 146

VI.3 Evaluation des solutions 148
VI.3.1 Evaluation des critères métier 148
VI.3.2 Evaluation des critères projet 150
VI.4 Conclusions 155

VII Conclusion générale **159**
VII.1 Conclusions 160
VII.2 Perspectives 161

Liste des publications **163**

Références bibliographiques **173**

Liste des figures **177**

Liste des tableaux **179**

Terminologie **181**

Annexes **187**

A Compléments sur la méthode Prométhée **187**
A.1 Terminologie 188
A.2 Choix de la fonction de préférence 188
A.2.1 Données statistiques sur la distribution de l'évaluation 189
A.2.2 Définition du type de fonction critère 190
A.2.3 Définition du seuil de préférence 190

B Processus d'assemblage tôlerie automobile **193**
B.1 Notion de famille, plateforme et modèle de véhicule 194
B.2 Principes de gestion des flux d'assemblage 195
B.3 Architectures d'implantation de plancher arrière 196
B.3.1 Attributs détaillés d'une unité de production 197

Introduction générale

Les organisations industrielles font de plus en plus face à une augmentation de la fréquence de lancement de nouveaux produits et à des changements continus dans leurs systèmes de production. Par exemple, la fréquence d'introduction de nouveaux véhicules a pratiquement doublé depuis une dizaine d'années dans l'industrie automobile [Garel 96] [Midler 93]. Les changements liés à l'introduction d'un nouveau produit incluent la modification des contraintes de production et les modifications fréquentes des spécifications du nouveau produit. Le lancement d'un nouveau produit est un évènement très suivi, plus particulièrement dans l'industrie automobile. Cet évènement représente une perturbation sur la configuration du système de production existant. La réduction du cycle de vie des produits et l'augmentation du nombre de modèles et de variantes de produits poussent les industriels à prendre en compte les reconfigurations futures du système de production. La reconfiguration d'un système de production vise à faire évoluer rapidement et à moindre coût une unité de production [Lamotte 06] [Koren 10]. Cette reconfiguration doit être prise en compte dans les phases amont du projet, où les choix d'architecture sont à revoir [Rösiö 11] [Walla 11].

L'analyse des processus de reconfiguration du système de production permet d'identifier les différentes solutions et leurs impacts sur la performance initiale de la ligne de production [H. Garbie 14]. L'évaluation de ces processus de reconfiguration permet au décideur de faire un choix objectif et argumenté [Youssef 06]. Cette évaluation doit prendre en compte le résultat du processus, c'est à dire la configuration finale de la ligne, mais aussi le processus d'obtention qui implique un ensemble de modifications de la structure du système.

Dans la phase avant-projet d'industrialisation, plusieurs solutions process sont à évaluer en termes de coût d'investissement, de délai de mise en œuvre, de qualité et de flexibilité du système de production. Ces évaluations sont liées à des paramètres

structurants du système qu'il faudra faire correspondre aux besoins et aux objectifs du projet afin de maîtriser au plus tôt la performance du système. Les décisions prises lors de la phase avant-projet ont un impact considérable sur le reste du projet (Développement, intégration, démarrage). Dans le but d'améliorer ces décisions, nous étudions les méthodes et outils qui permettent dans un premier temps d'identifier les solutions et leurs impacts sur la configuration initiale du système, ensuite d'évaluer au plus tôt les solutions en fonction de critères de performances pertinents et enfin de valider la solution retenue à différents jalons du projet.

Afin de répondre à ces problématiques, ces travaux de thèse ont pour objectif d'orienter les choix parmi plusieurs architectures et configurations de ligne de production en phase avant-projet d'industrialisation. Cet objectif global se décline en trois sous objectifs :

— Etudier les processus de reconfiguration pour analyser l'impact des décisions sur la configuration initiale du système.

— Identifier et organiser les critères de performances pertinents afin d'évaluer les solutions dans les phases amont d'un projet.

— Elaborer un processus permettant de valider la faisabilité et la performance des solutions industrielles à différents jalon du projet.

Le manuscrit est subdivisé en cinq chapitres :
Le **chapitre 1** présente le contexte industriel et académique de la thèse. Nous nous appuyons sur une étude de terrain pour dégager la problématique et les objectifs de recherche.
Le **chapitre 2** présente les différentes approches d'analyse et d'évaluation des choix de reconfiguration d'un système de production. Cet état de l'art tente de regrouper les principales méthodes permettant d'explorer, d'évaluer et de choisir parmi un ensemble de solutions.
Le **chapitre 3** présente une approche progressive de la reconfiguration d'un système de production. Elle consiste à proposer aux décideurs les solutions en fonction de leurs impacts sur la configuration initiale d'une unité de production. Une analogie avec la méthode de réordonnancement est présentée pour identifier les concepts de base de la méthode [Feno 14].
Le **chapitre 4** propose une approche d'évaluation des solutions identifiées dans la phase d'analyse des processus de reconfiguration. L'évaluation se base sur des critères "métiers" qui caractérisent une configuration de ligne et des critères "projet" qui concernent le coût et le délai de reconfiguration de la ligne. La méthode d'analyse multicritère Prométhée est utilisée afin de modéliser le problème et fournir une synthèse pour la prise de décision [Feno 15a].
Le **chapitre 5** présente un processus de revue numérique d'atelier positionné dans les phases amont d'un projet d'industrialisation. On s'intéresse plus particulièrement à la

préparation des données à partir des solutions retenues et au déroulement d'une revue d'étude avec le processus proposé. L'intérêt de ces revues est de permettre aux équipes projet d'identifier au plus tôt les problèmes potentiels liés au développement, à l'intégration et au démarrage de la ligne de production [Feno 15b].

Le **chapitre 6** présente une application industrielle de la méthode d'analyse et d'évaluation des choix de reconfiguration d'une ligne de production. L'objectif est d'appliquer nos propositions dans le cadre de l'introduction d'un nouveau produit dans une usine existante. Le cas d'une unité d'assemblage de caisse automobile est utilisé pour illustrer la démarche.

Première partie

Contexte, problématique et état de l'art

Chapitre I

Contexte et problématique

"Le travail de la pensée ressemble au forage d'un puits ; l'eau est trouble d'abord, puis elle se clarifie." (Proverbe chinois)

Résumé

Ce chapitre présente le contexte industriel de ces travaux de thèse dans le domaine de l'assemblage tôlerie automobile. Le contexte scientifique est posé dans le cadre de la reconfiguration d'un système de production, de l'évaluation pour la prise de décision en avant-projet et de la modélisation des processus de fabrication pour les revues de projet. Ces contextes sont posés afin de dégager la problématique et les objectifs de recherche.

Sommaire

I.1 Contexte industriel : assemblage tôlerie automobile 9

I.1.1 Le processus d'assemblage de la caisse d'un véhicule 10

I.1.2 Les parties prenantes d'un projet d'industrialisation 11

I.1.3 Phases amont du processus d'industrialisation 12

I.1.4 Besoins industriels : aide à la décision 16

I.2 Contexte scientifique : conception préliminaire de SdP 17

I.2.1 Reconfiguration de ligne de production 17

I.2.2 Evaluation des performances et prise de décision 19

I.2.3 Modélisation des processus de fabrication / assemblage 19

I.3 Problématiques et objectifs de recherche 20

I.3.1 Problématique : évaluation des choix de reconfiguration d'une ligne de production 21
I.3.2 Objectifs de la thèse 22
I.4 Conclusions 22

Dans un marché de plus en plus concurrentiel, les industriels se fixent comme objectif de mieux utiliser leurs capacités industrielles en améliorant la flexibilité de leur ligne de production en fonction de la demande commerciale. Cette demande de flexibilité s'accompagne également d'une exigence de reconfigurabilité rapide des moyens de production existants pour accueillir les nouveaux produits en cours de développement, et cela dans des plannings de mise sur le marché de plus en plus courts. Dans le même temps, pour rester compétitif sur un marché mondial, les performances des lignes de production françaises et européennes doivent être renforcées par des investissements complémentaires ajustés aux évolutions des contraintes de production.

Pour satisfaire ces demandes, différentes solutions industrielles sont régulièrement comparées en termes de coûts, délais et performances dans les phases amont d'un projet d'industrialisation. Généralement les dossiers sont décidés sur la base d'un constat pragmatique d'équation technico-économique (analyse marginale de coût bénéfice). Dans l'automobile, cette analyse est optimisée pour un contexte industriel figé de 2 à 3 ans avant le lancement d'un nouveau véhicule sur le marché. Les décisions prises dans les phases amont d'un projet impactent très fortement l'organisation des lignes de production à moyen et à long terme soit de 5 à 10 ans. Ces décisions sont souvent délicates à prendre compte tenu de la complexité technique du système industriel (§ I.1.1).

C'est dans le cadre de l'analyse et de l'amélioration de ces décisions que ce travail de thèse a été initié. Afin de bien poser le cadre de l'étude, ce chapitre présente dans un premier temps le contexte industriel de la thèse, puis le contexte général des travaux de recherche et enfin la problématique soulevée et les objectifs de la thèse.

I.1 Contexte industriel : assemblage tôlerie automobile

Dans une usine de type carrosserie-montage (figure I.1), la production d'un véhicule comprend les étapes d'emboutissage, d'assemblage, de peinture et de montage. Dans la suite de ce travail définit la "caisse" de véhicule comme étant l'assemblage par soudure ou autres liaisons mécaniques de plusieurs pièces embouties qui constituent la carrosserie. Elle passe ensuite par les étapes de peinture et de montage. Les autres organes mécaniques tels que le moteur, la boite de vitesse et le châssis sont produits dans d'autres types d'usine.

Cette section propose une description du système d'assemblage d'une caisse automobile, suivi des différentes étapes d'un projet de développement véhicule et des besoins industriels à l'origine de ce travail de recherche.

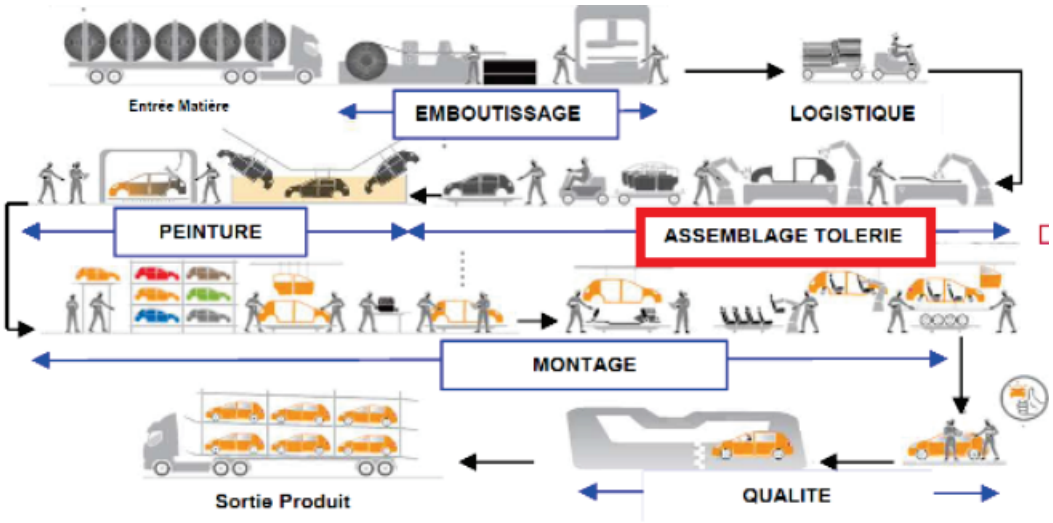


Figure I.1 – Etapes de fabrication d'un véhicule

I.1.1 Le processus d'assemblage de la caisse d'un véhicule

Les lignes d'assemblages de caisses automobiles sont caractérisées par la complexité du processus vu le nombre de pièces à assembler, la multitude d'opérations, d'équipements et de ressources associés. Pour donner un ordre d'idée, une caisse de véhicule comporte en moyenne 400 pièces qui sont assemblées à travers environ 200 opérations et 5000 points de liaisons.

Une ligne d'assemblage tôlerie est composée de plusieurs "unités d'assemblage" permettant d'assembler chacun des sous-ensembles d'une caisse de véhicule : la base roulante, les côtés de caisse, l'assemblage général, les ouvrants et le ferrage (figure I.2).

La base roulante (BR) représente l'assemblage du châssis du véhicule. Elle est composée d'une partie avant (UAV), d'un plancher central (CTL) et d'une partie arrière (UAR).

Les côtés de caisse (CDC) représentent l'assemblage des parties latérales du véhicule.

L'assemblage général (AG) consiste à assembler les côtés de caisse à la base roulante.

Les ouvrants (OUV) représentent l'assemblage des portes latérales, du capot, et de la porte de coffre.

Le ferrage (FER) consiste à assembler des ouvrants à la caisse assemblée du véhicule

En fonction des spécifications du nouveau véhicule, un certain nombre de postes de travail peuvent supporter des changements d'outillages grace à leur flexibilité. Ces changements d'outillages ne doivent pas pénaliser la capacité de production de la ligne car elle supporte la production d'autres véhicules. Dans la pratique, les investissements permettant un mixage des véhicules à la demande sans contrainte de production sont élevés. L'équilibre technico-économique du projet courant peut déboucher sur des

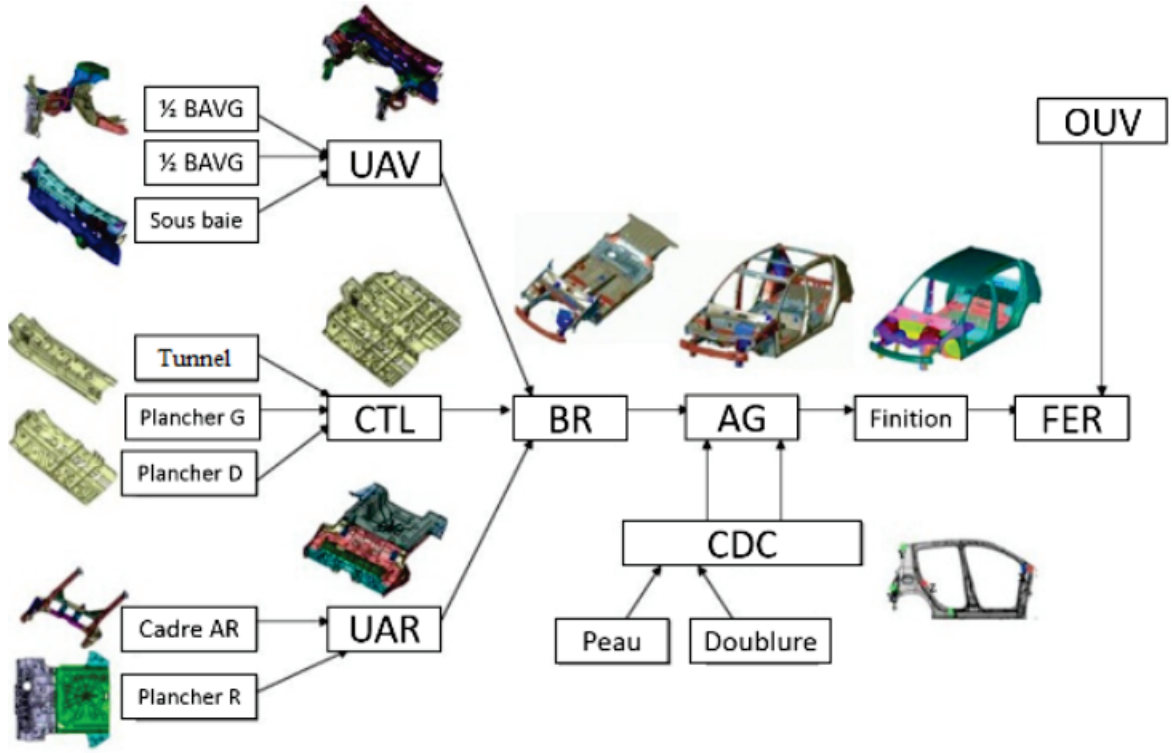


Figure I.2 – Processus d'assemblage de caisse automobile

contraintes de mixage de véhicules afin de limiter la fréquence de changement d'outillages et donc le coût de la solution technique. Lorsque la demande commerciale réelle s'écarte du mixage proposé en début de projet, la capacité de production de la ligne est directement impactée.

Toute une organisation est mise en place pour la conception et la réalisation des moyens de production. Il s'agit d'organisation en "plateau projet" [Garel 96] où les différents acteurs métiers sont affectés à un projet le temps d'une phase ou de tout le déroulement de celui-ci. Plusieurs parties prenantes interviennent dans un projet d'industrialisation.

I.1.2 Les parties prenantes d'un projet d'industrialisation

Trois parties prenantes interviennent dans le processus de développement d'une caisse de véhicule (figure I.3). Dans un premier temps, le bureau d'étude conçoit et spécifie les pièces de carrosserie. Ensuite, le bureau des méthodes conçoit et met en place les moyens de production en identifiant les contraintes de production. Enfin, l'usine de fabrication organise la production des véhicules en fonction du cadrage industriel et des objectifs de performance.

L'organisation du bureau des méthodes est liée aux phases du processus

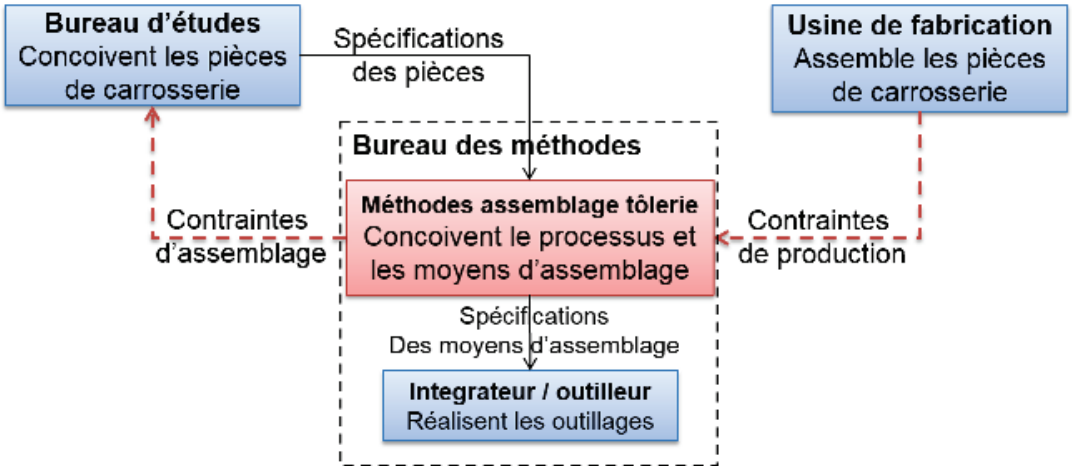


Figure I.3 – Les acteurs du processus de développement d'un véhicule

d'industrialisation (fig. I.5). La conception des moyens de production est réalisée en interne chez le constructeur dans les phases d'avant-projet et de développement. La mise en place de ces moyens de production est généralement réalisée par un intégrateur (entreprise partenaire) dans les phases de réalisation et d'intégration.

Les spécifications techniques des pièces du nouveau véhicule sont transmises par le bureau d'études. Ces données techniques permettent au bureau des méthodes de définir les moyens nécessaires permettant d'assembler chaque partie de la caisse du véhicule. Il s'appuie pour cela sur les informations dont il dispose sur la configuration actuelle du système d'assemblage. Des contraintes d'assemblage ou de faisabilité sont remontées au bureau d'études afin de proposer des modifications du produit.

Le bureau des méthodes doit prendre en compte les contraintes de production liées à l'usine de fabrication (ex : surface disponible, installations existantes, véhicules en cours de production...). Les spécifications des moyens d'assemblage et leurs performances associées font ensuite l'objet de contrat avec l'intégrateur.

L'organisation du projet fait intervenir ces différents acteurs à travers un processus d'industrialisation qui définit le délai du projet. Le paragraphe suivant décrit les différentes phases de ce processus et se focalise sur les phases amont.

I.1.3 Phases amont du processus d'industrialisation d'un véhicule

Le développement de la caisse d'un véhicule fait intervenir un processus de conception et un processus d'industrialisation. Le processus de conception vise à définir les spécifications de la caisse et de sa structure fonctionnelle, et le processus d'industrialisation vise à définir les moyens de production permettant d'assembler la caisse. C'est dans le cadre de ce processus d'industrialisation que nos travaux ont été

développés.

Le processus d'industrialisation est composé d'activités de type gestion de projet et d'activités de conception(figure I.4). La gestion du projet consiste à suivre l'évolution de la demande correspondant à la stratégie industrielle et des spécifications du système. Les activités de conception consistent à traduire la définition du produit en spécification du système d'assemblage.

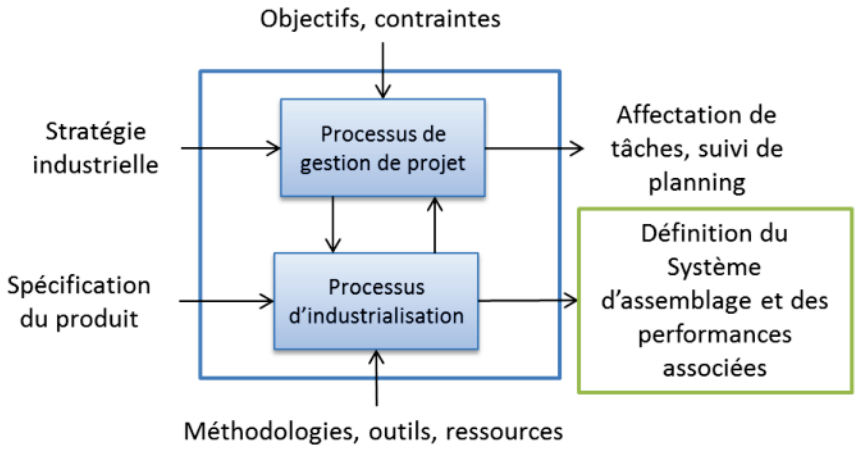


Figure I.4 – Données d'entrée et de sortie du processus d'industrialisation

Pour introduire un nouveau produit dans une ligne existante, on regarde dans un premier temps les contraintes du produit et des processus existants. L'idée par la suite est d'évaluer l'impact de chaque solution sur le système existant. Les contraintes du produit concernent les nouveaux composants ou nouvelles pièces du produit. Une différence entre deux structures d'assemblage du produit peut représenter une contrainte d'assemblage non négligeable.

Les contraintes du processus d'assemblage concernent le type d'installation existante, l'implantation et les ressources utilisées. (1) La contrainte d'implantation limite la surface disponible dans l'atelier. (2) Les ressources existantes ont un impact sur la faisabilité des nouvelles pièces.

Le processus d'industrialisation est composé de quatre phases (figure I.5) : une phase d'avant-projet, une phase de développement, une phase de réalisation des moyens et une phase d'intégration de ces moyens dans l'usine. L'industrialisation d'un véhicule consiste à concevoir et mettre en place le système industriel permettant de le fabriquer.

— **La phase d'avant-projet** permet de s'assurer que la conception des moyens d'assemblage est réalisable dans l'usine concernée. Une analyse de performance et de faisabilité technico-économique est réalisée.

— **La phase de développement** consiste à vérifier la faisabilité du produit par le processus (accessibilité, atteinte des objectifs de capacité). Cette phase permet de

s'assurer que le produit est réalisable avec le processus retenu.

— **La phase de réalisation** consiste à fabriquer les moyens d'assemblages et les outillages spécifiés dans la phase de développement.

— **La phase d'intégration et de démarrage** consiste à installer, mettre au point et démarrer les installations dans l'usine.

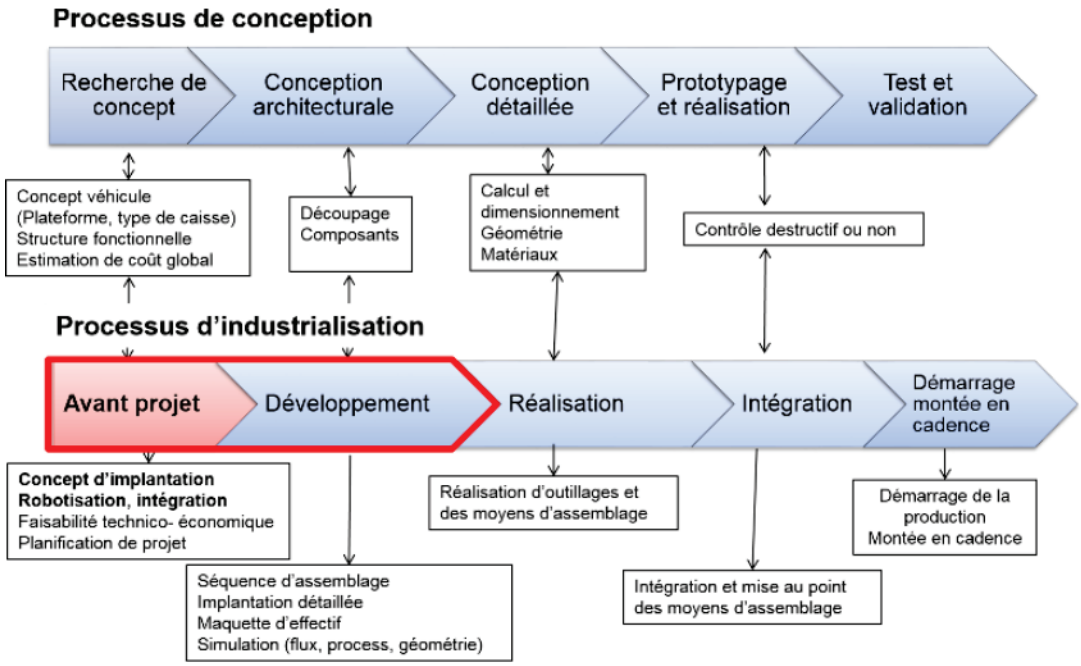


Figure I.5 – Processus de développement automobile

La phase d'avant-projet et la phase de développement, sont des phases déterminantes pour la spécification et la performance associée des moyens de production. Dans le paragraphe suivant nous détaillons la phase d'avant-projet et la phase de développement pour préciser leur importance dans le processus d'industrialisation.

I.1.3.1 Phase d'avant-projet

La phase d'avant-projet ("Rough factory planning" en anglais) consiste à optimiser le produit et son système de production, construire des scénarii de production et vérifier la cohérence avec les objectifs de coût, qualité et délai du projet.

Cette phase fait intervenir des activités telles que la sélection d'installations à développer ou à réutiliser, l'estimation de l'investissement correspondant aux équipements et à la mise en place des moyens de production. Au fur et à mesure de l'avancement du projet, la structure détaillée du système de production, les flux de pièces, la capacité de production à installer pour chaque ligne sont définis.

I.1.3.2 La phase de développement

La phase de développement consiste à détailler l'étude du concept d'implantation et les processus d'assemblage retenus dans la phase avant-projet et valider si le produit est réalisable dans l'usine avec ces processus. Plusieurs activités sont effectuées lors de cette phase :

— Réaliser les études de faisabilité et d'accessibilité pour l'ensemble des opérations d'assemblage à réaliser.

— Simuler le fonctionnement des lignes et de l'atelier complet.

— Définir l'implantation détaillée des processus d'assemblage dans l'usine.

Les enjeux de la phase de développement concernent le respect des spécifications et du planning d'études des solutions techniques retenues en phase avant-projet. Les éléments validés dans cette phase permettent d'éviter les problèmes de démarrage du véhicule dans l'usine.

I.1.3.3 Importance des phases amont d'un projet d'industrialisation :

Les phases amont d'un projet bénéficient de moins de support méthodologique que d'autres phases plus avancées de la conception [Rösiö 14]. Pourtant, les décisions qui y sont prises ont un impact important sur le reste du projet. En effet, les erreurs ou problèmes de fonctionnement identifiés à ce stade permettent d'éviter des modifications très coûteuses lors des phases d'intégration et de démarrage du système.

Bien que les enjeux de l'avant-projet soient importants en termes de coût et de délais de remise en cause des solutions, les processus de décisions dans ces phases amont restent peu formalisés et peu documentés [Geiskopf 04].

Ces phases du projet sont caractérisées par des délais de plus en plus courts et des informations incomplètes et incertaines.

Dans ce contexte industriel, nous avons décrit le processus d'assemblage puis situé les phases du processus d'industrialisation qui nous concernent. Le paragraphe suivant présente les besoins industriels à l'origine de cette thèse.

I.1.3.4 Recherche de compromis entre qualité, coût et délai

Dans cette phase, l'ingénierie doit atteindre trois principaux objectifs.

— Définir un processus permettant d'obtenir un produit de **qualité**, c'est à dire conforme aux exigences géométriques.

— Planifier et maîtriser rigoureusement les **coûts** d'investissements.

— Démarrer la production dans les **délais** pour livrer le véhicule à temps.

L'exercice difficile consiste donc à trouver des solutions conformes à ces trois attentes. En effet, si une solution ne permet pas d'atteindre les objectifs de production ou n'est pas en mesure de générer un niveau de qualité de produit acceptable, alors la solution doit être revue même si cela implique de retarder un lancement de fabrication (ex : commercialisation de la nouvelle espace décalée de 6 mois dû à des exigences de qualité). Parallèlement, les efforts de réduction des investissements ne doivent en aucun cas se faire au détriment de la qualité.

L'enjeu des décisions prises en phase avant-projet concernent l'engagement du projet sur un montant d'investissement qui correspond à la solution technique proposée et un délai de réalisation qui permet de respecter la date de démarrage de production prévue pour atteindre les volumes de production attendus.

I.1.4 Besoins industriels : aide à la décision

A partir des études menées sur le terrain, il a été possible d'établir l'ensemble des besoins industriels en ce qui concerne l'analyse et l'évaluation des choix de reconfiguration du système de production. Des besoins génériques ont été identifiés ainsi que des besoins spécifiques aux phases d'avant-projet et de développement.

Les besoins génériques du projet sont :

— Réduire les délais d'étude entre la définition des solutions industrielles et le démarrage de la production en usine.

— Evaluer et valider la **faisabilité** et les **performances** des solutions industrielles au plus tôt dans le projet.

Les besoins industriels spécifiques aux phases d'avant-projet sont :

— Construire des solutions permettant d'intégrer un nouveau véhicule en fonction des moyens de production existants, des véhicules en production et des volumes de production prévisionnels.

— Comparer différentes configurations d'atelier/gamme d'assemblage pour choisir celle qui permet d'obtenir un meilleur compromis entre le coût, le délai et les performances.

— Prendre en compte les évolutions possibles du contexte industriel et des spécifications du produit qui interviennent au cours du projet.

Les besoins industriels spécifiques aux phases de développement sont :

— Analyser l'impact des modifications sur la configuration du système existant.

— Identifier le plus tôt possible les problèmes potentiels pour les résoudre avant que la mise en service de la ligne de production ne soit effective.

Dans cette section, nous avons posé le contexte industriel de la thèse. Des problématiques liées à l'introduction d'un nouveau produit ont été évoquées. Les besoins d'une orientation concernant les choix à réaliser lors des phases amont du processus d'industrialisation ont été identifiés. La section suivante présente le contexte général dans lequel ce travail de recherche a été développé.

I.2 Contexte scientifique : conception préliminaire de système de production

Les décideurs sont faces à plusieurs choix et disposent généralement de peu d'informations, ce qui les place dans une situation d'imprécision et d'incertitude. Leurs connaissances et leurs expériences permettent de compenser l'impact lié à cette situation. Notre démarche vise à réduire le besoin en expertise afin que les concepteurs (expérimentés ou non) puissent converger rapidement vers de bonnes solutions.

Dans un premier temps, nous décrivons le contexte d'une reconfiguration de système de production. En effet, 40% des nouveaux projets réutilisent complètement les installations existantes, 40% les modifient et 20% seulement développent des nouveaux processus [Minhas 12]. Ensuite, pour chaque solution de reconfiguration identifiée, nous posons le contexte de l'évaluation des performances et la prise de décision. Enfin, nous présentons le contexte d'une modélisation des processus de fabrication pour valider la faisabilité et les performances d'une solution.

I.2.1 Reconfiguration de ligne de production

Ce travail se positionne dans un contexte de reconfiguration d'une ligne de production vu que la plupart des projets d'introduction de nouveau produit réutilisent ou modifient les moyens de production existants.

Initialement, un système industriel est conçu puis intégré dans l'environnement de l'usine pour fabriquer un nouveau produit (fig. I.6). Durant la phase de production plusieurs décisions concernant les évolutions possibles du système sont à prendre, plus particulièrement lors de l'introduction d'un nouveau produit ou de changement de la demande. Une analyse des évolutions possibles du système permet d'identifier trois scénarios :

1. Le système existant permet de fabriquer le nouveau produit avec peu ou pas de modifications d'un point de vue technique et financier. Les modifications se limitent à du paramétrage (ex : trajectoire de robot ou programmation des moyens de préhension de pièces).

2. Le système existant permet de fabriquer le nouveau produit à condition d'effectuer des modifications conséquentes sur sa structure. Il doit être reconfiguré pour s'adapter au nouveau produit.

3. Réutiliser le système existant n'est pas rentable car les modifications à réaliser sont trop importantes par rapport aux conditions d'exploitations et aux performances qu'il permet d'atteindre. Il est nécessaire de concevoir une nouvelle ligne.

Les deux premiers cas concernent la reconfiguration du système où différents niveaux de modification sont à effectuer (figure I.6). Il est possible que la reconfiguration nécessite également la conception de nouveaux moyens d'assemblage en cas d'innovation sur le produit (ex : assemblage par collage, laser ...). A la fin d'une phase de reconfiguration, les nouveaux éléments du système sont intégrés puis remis en production.

La fréquence d'occurrence d'une reconfiguration de système est de plus en plus élevée à cause de la réduction des cycles de vie des véhicules et donc à l'augmentation de l'introduction de nouveaux produits dans les usines existantes. Cette phase est répétée plusieurs fois durant le cycle de vie du système tandis que la phase de conception a lieu en début de son cycle de vie. La fréquence d'occurrence d'une reconfiguration de système est de plus en plus élevée à cause de la réduction des cycles de vie des véhicules et donc à l'augmentation de l'introduction de nouveaux produits dans les usines existantes. Cette phase est répétée plusieurs fois durant le cycle de vie du système tandis que la phase de conception a lieu en début de son cycle de vie.

En fin de vie, un système d'assemblage est souvent démonté et ses composants (robots, outillages, convoyeurs ...) sont réutilisés pour d'autres unités de production.

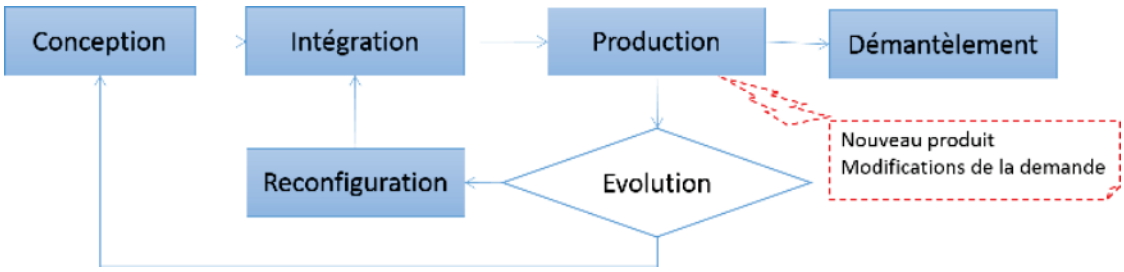


Figure I.6 – Etapes du cycle de vie d'un système industriel

L'analyse des processus de reconfiguration nous permet d'identifier plusieurs solutions et de mettre en évidence leurs impact sur le système existant. Afin de quantifier et de comparer ces solutions, une évaluation des performances de cet impact est nécessaire pour une prise de décision objective et argumentée.

I.2.2 Evaluation des performances et prise de décision

Cette thèse se positionne également dans le contexte de l'évaluation pour la prise de décision. L'évaluation des performances est une étape clé dans les choix de reconfiguration d'un système de production puisque plusieurs solutions sont étudiées puis détaillées à travers des cycles de proposition, évaluation et décision. Evaluer permet de sélectionner parmi plusieurs solutions et permet ainsi de limiter la recherche de solutions en mettant en lumière la faisabilité et les performances des solutions potentielles.

L'évaluation d'une solution doit faciliter la prise de décision en identifiant les leviers de performance qui permettent d'améliorer la solution. Un levier de performance est une variable d'action sur laquelle on peut agir pour faire évoluer cette activité pour l'atteinte d'un objectif de performance. La réutilisation des moyens de production existants est, par exemple, un des principaux leviers permettant de réduire les coûts et les délais d'un projet.

Afin d'améliorer la performance d'un système, il convient d'identifier les inducteurs qui influencent les performances considérées. Un inducteur est un facteur qui impacte le niveau de performance d'une activité [Berrah 02].

I.2.3 Modélisation des processus de fabrication / assemblage

Les décisions qui sont prises en avant-projet ont un impact aussi bien sur la configuration initiale du système mais aussi sur le planning de développement. Afin de supporter ces décisions, plusieurs informations provenant de multiples sources sont à analyser. Il s'agit de données relatives aux métiers qui contribuent à la performance de l'usine (implantation, logistique, process, automatisme...). Nous étendons cette réflexion à la modélisation des processus de fabrication / assemblage afin de valider la solution retenue à différents jalons du projet.

Outre les enjeux industriels et technologiques qui visent à réduire les délais de développement, l'intérêt scientifique d'une étude sur la modélisation des processus de fabrication consiste à formaliser et structurer les connaissances (processus, standards, règles métiers, représentations intermédiaires) manipulées lors de la spécification du système.

La figure I.7 présente le contexte de l'intégration de l'ingénierie produit et processus de fabrication. L'axe vertical représente le processus de conception et l'axe horizontal représente le processus d'industrialisation. Deux interactions nous intéressent dans ce processus : d'une part (1) les interactions entre le développement du produit et les exigences de production qui définissent le point de départ d'un projet d'industrialisation, d'autre part, (2) les interactions entre la planification de production et le développement

du produit qui définissent les contraintes à intégrer au produit pour faciliter sa fabrication.

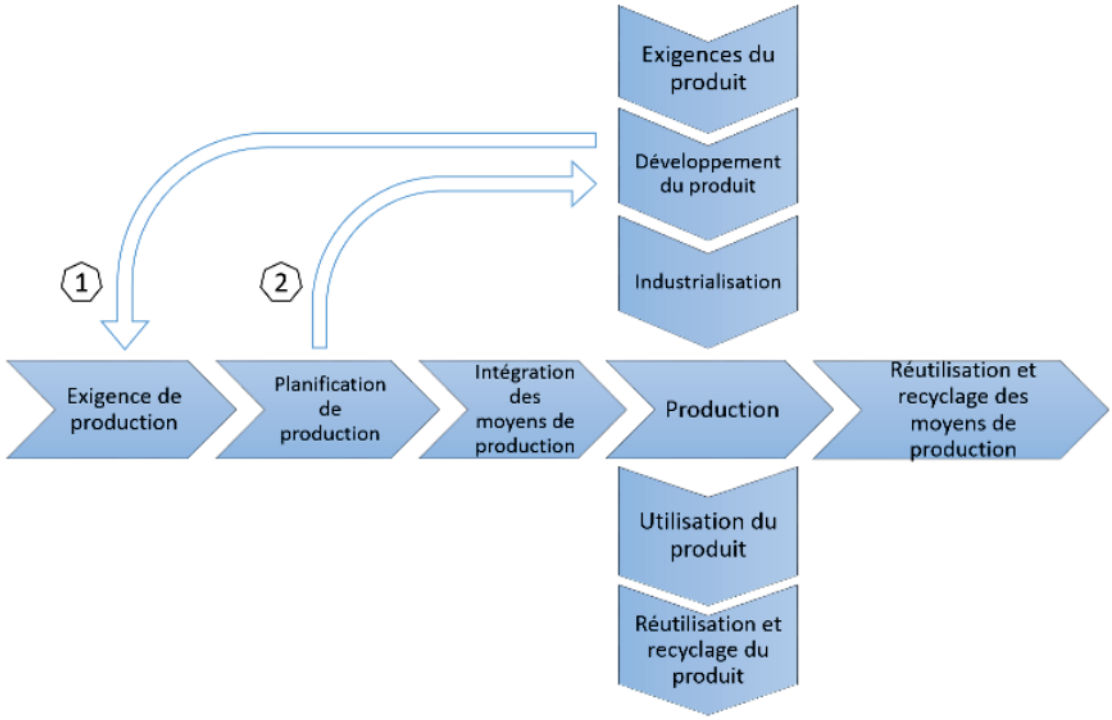


Figure I.7 – Intégration de l'ingénierie produit et processus [EFFRA 12]

Dans cette section nous avons mis en évidence les besoins industriels et les enjeux de notre recherche. Nous avons également posé le contexte scientifique qui est principalement axé sur l'aide à la décision dans le contexte d'une reconfiguration de système et la gestion des informations nécessaires à ce processus de reconfiguration. La section suivante pose les problématiques liées à ce contexte d'étude et définit les objectifs de recherche.

I.3 Problématiques et objectifs de recherche

Cette section soulève les problématiques liées à l'analyse et l'évaluation des choix de reconfiguration de lignes de production dans le cas de l'assemblage de caisse automobile. Nous posons les enjeux d'une recherche sur l'amélioration des performances des systèmes. Ensuite, nous définissons les objectifs de recherche et enfin nous décrivons la démarche et les approches méthodologiques proposées.

I.3.1 Problématique : évaluation des choix de reconfiguration d'une ligne de production

La problématique porte sur l'analyse et l'évaluation des choix de reconfiguration de ligne de production en avant-projet d'industrialisation.

En vue d'introduire un nouveau produit dans une usine existante, plusieurs décisions concernant les évolutions possibles du système de production sont à prendre. Dans la phase avant-projet, différentes solutions process sont à évaluer en termes de coût d'investissement, de délai de mise en œuvre, de qualité et de flexibilité du système de production. Les décisions prises dans cette phase ont un impact considérable sur les autres phases du projet, notamment les phases de développement, d'intégration et de démarrage. Elles impactent évidemment la configuration initiale du système de production. Dans la pratique, ces choix dépendent essentiellement de l'expérience des ingénieurs et chefs de projets. En effet, il est difficile d'avoir une vision détaillée de l'impact des modifications à mettre en place pour une solution donnée. De ce fait, l'identification des conflits entre métiers se fait tardivement dans le projet.

Pour chaque unité de production de l'atelier, si le système actuel peut assembler le nouveau produit, on peut garder la même configuration, sinon, on doit modifier la configuration existante. Dans le cas où les modifications sont trop importantes et n'est pas rentable par rapport à développer un nouveau processus, on peut soit choisir une configuration pré-définie soit concevoir une nouvelle configuration spécifique. L'avantage de garder la même configuration est de pouvoir réutiliser entièrement les moyens existants donc un coût négligeable. Par contre certaines pièces ne seront pas faisables. Une nouvelle configuration prédéfinie a comme avantage d'avoir des performances déja validées, par contre le coût est souvent élevé. Concevoir une nouvelle configuration spécifique permet d'avoir des performances adaptées aux besoins spécifiques du projet mais nécessite des délais d'études et d'integration plus importantes.

La question problématique à laquelle cette thèse tente d'apporter des réponses est : **Comment reconfigurer une ligne de production en réutilisant au mieux les moyens de production existants afin de minimiser les coûts et les délais d'exécution du projet ?**

Les enjeux de l'amélioration des performances en conception et industrialisation sont traditionnellement liés au tryptique qualité, coût et délai. L'enjeu de cette étude en particulier est de maîtriser les choix de reconfiguration et les performances du système industriel dès la phase amont du projet afin de réduire les délais de développement.

Les enjeux industriels des décisions de reconfiguration concernent la nature même de l'activité d'assemblage automobile. En effet, l'assemblage est la partie du processus de fabrication la plus sensible à l'introduction de nouveaux véhicules. Le ratio entre

l'investissement spécifique [1] et capacitaire [2] est élevé (env. 1/4) par rapport aux autres phases de fabrication tel que l'emboutissage (env. 1/100), la peinture (env. 1/100) ou le montage (env. 1/50)). Ce ratio montre l'influence de la diversité du produit sur la configuration du système d'assemblage.

I.3.2 Objectifs de la thèse

D'une manière générale, les travaux de thèse ont pour objectif d'orienter les choix parmi plusieurs conceptions de système de production en phase avant-projet d'industrialisation. Dans le but de fournir une aide à la décision pour orienter ces décisions, l'objectif de ce travail consiste à :

— Etudier les processus de reconfiguration pour analyser l'impact des décisions sur la configuration initiale du système.

— Identifier et organiser les critères de performance pertinents pour proposer une méthode d'évaluation applicable dans les phases amont d'un projet.

— Elaborer un processus permettant de valider la faisabilité et la performance des solutions industrielles à différents jalon du projet.

I.4 Conclusions

La reconfiguration de systèmes de production dans le contexte particulier de l'assemblage de caisse automobile est un processus complexe. Les phases amont du processus d'industrialisation font intervenir une phase d'avant-projet et une phase de développement. Les décisions prises lors de ces phases ont un impact considérable sur le reste du projet en termes de coût, de délai et de qualité. Le besoin industriel dans ce contexte particulier est d'orienter les choix de configuration du système afin de valider sa faisabilité et ses performances au plus tôt dans le projet.

Sur le plan scientifique, le travail de recherche vise à contribuer à l'amélioration des performances des systèmes par une maîtrise des choix de reconfiguration dans le contexte d'une reconfiguration du système. En effet, la majorité des projets d'industrialisation se développent dans des usines existantes. L'intégration de nouveaux produits consiste principalement à déterminer le niveau de réutilisation et de reconfiguration des moyens de production. Afin de faciliter les processus de reconfiguration et réduire les délais de développement, une formalisation des informations liées aux processus de décision est nécessaire (processus, règles métiers,

1. Spécifique : correspond à des moyens d'assemblage spécifiques à un seul produit
2. Capacitaire : correspond à des moyens d'assemblage communs à plusieurs produits

représentations intermédiaires). Il s'agit principalement de données techniques relatives aux spécifications du système de production.

Plusieurs questions ont été soulevées suite à cette analyse : comment reconfigurer le système de production de manière à réutiliser au mieux les moyens de production existants afin de minimiser les coûts et les délais du projet ? Comment évaluer et valider les solutions au plus tôt dans le projet ?

Dans le chapitre suivant, nous investiguons plus particulièrement les approches, méthodes et outils permettant d'explorer, d'évaluer et de choisir parmi plusieurs solutions. Nous abordons également la gestion des informations relatives aux activités d'ingénierie de production pour modéliser le processus de fabrication retenu en vue de le valider.

Chapitre II

Etat de l'art

"Le premier savoir est le savoir de mon ignorance : c'est le début de l'intelligence." (Socrate)

Résumé

Ce chapitre présente les différentes approches d'analyse, d'évaluation et de validation des choix de reconfiguration des systèmes de production. Cet état de l'art tente de regrouper les principales méthodes permettant d'explorer, d'évaluer et de valider un ensemble de solutions industrielles. Les travaux sont ensuite positionnés dans le cadre de la modélisation et l'évaluation des choix de reconfiguration d'un système de production en phase avant-projet d'industrialisation.

Sommaire

II.1 Reconfiguration de ligne de production 27
II.1.1 Modélisation des processus de reconfiguration 28
II.1.2 Les systèmes de production reconfigurables (RMS) 33
II.1.3 Approches existantes de reconfiguration de systèmes 34
II.1.4 Discussion 36
II.2 Evaluation des performances et prise de décision 36
II.2.1 Contexte de l'évaluation 37
II.2.2 Modélisation pour l'évaluation des performances 43
II.2.3 Les méthodes d'aide à la décision multicritère 49

II.3 Modélisation des processus de fabrication / assemblage . . . 53
II.3.1 Gestion du cycle de vie des produits (PLM) 55
II.3.2 Le concept d'usine numérique 56
II.3.3 Gestion des processus de fabrication (MPM) 59
II.4 Bilan et positionnement 60
II.4.1 Synthèse des approches, méthodes et outils existants 61
II.4.2 Contributions 61

Ce chapitre propose un état de l'art sur les méthodes et approches permettant de modéliser, évaluer et valider une configuration de lignes de production. Plusieurs approches, méthodes et outils susceptibles de répondre à notre problématique sont présentés et positionnés dans le contexte de l'assemblage automobile. Nous montrons leurs intérêts, leurs incompatibilités ou leurs limites dans la résolution de notre problème.

Le premier paragraphe propose une analyse des approches permettant de reconfigurer un système en posant les différentes terminologies utilisées dans ce domaine. Elle introduit les concepts de base et les méthodes permettant de définir l'espace des solutions. La deuxième section présente les approches d'évaluation des performances pour la prise de décision. La troisième section présente des approches de modélisation des processus de fabrication, en présentant les méthodes et outils permettant de gérer et partager les informations nécessaires pour l'ingénierie de production. L'objectif est de construire les solutions en intégrant l'ensemble des données nécessaires permettant de valider une configuration du système.

II.1 Reconfiguration de ligne de production

La reconfiguration de systèmes de production peut se positionner dans deux contextes différents : en phase de conception et en phase de pilotage.

Dans la phase de conception, une reconfiguration de ligne correspond à un ensemble de changement de la configuration du système pour un nouveau besoin (volume, produit). Ces changements peuvent aller de simple modifications d'outillage à la reconfiguration complète de la ligne. L'objectif est plutôt l'adéquation entre les objectifs de performance et les spécifications du système.

Dans la phase de pilotage, la reconfiguration consiste à changer d'état pour faire face à des aléas de production. Dans le contexte particulier de systèmes manufacturiers reconfigurables (RMS : Reconfigurable manufacturing systems [Koren 10]), l'objectif initial de conception est la reconfigurabilité.

Notre problématique s'intéresse à l'analyse et l'évaluation des solutions de reconfiguration d'un système de production. Trois niveaux de problèmes peuvent être étudiés :

1. Problèmes d'architecture : qui consistent à déterminer les composants du système et leurs interactions.
2. Problèmes de configuration : déterminer l'organisation d'un composant du système dans une architecture définie dans le but d'atteindre un objectif.
3. Problèmes de pilotage : déterminer les variables du processus (vitesse de déplacement

de robots...) de sorte qu'une configuration puisse être déployée pour remplir la tâche d'une manière satisfaisante.

Dans la suite de ce travail, nous allons nous intéresser aux problèmes liés à l'architecture et à la configuration et non au pilotage.

Les paragraphes suivants proposent quelques définitions autour de la reconfiguration des systèmes puis décrivent les principales caractéristiques des systèmes reconfigurables. Ensuite nous introduisons quelques éléments concernant le processus de reconfiguration et enfin quelques approches de reconfiguration existantes.

Définitions autour de la reconfiguration d'un système

Une configuration est un état correspondant à un arrangement des composants d'un système pour répondre au besoin de production. Il s'agit de l'aménagement d'un ensemble d'équipements permettant de réaliser des opérations de fabrication [Pierreval 01]. La notion de configuration est relative à un ensemble d'éléments qui peuvent être paramétrés et interconnectés dans le sens de l'ingénierie système. Elle peut être définie comme la traduction d'une exigence du système (ex : produire à une cadence donnée) en une organisation de ses éléments (organisation des ressources).

La reconfiguration est un processus permettant d'atteindre une configuration souhaitée à partir d'une configuration existante (fig III.1). Elle comprend les actions d'ajout, de suppression et/ou de réorganisation de façon rentable des composants et des fonctions d'un système. Il peut s'agir d'un changement d'architecture de ligne ou d'une modification de l'affectation des ressources pour introduire un nouveau produit sur une ligne existante [Kovalev 12].

La reconfigurabilité est la capacité à faire évoluer rapidement et à moindre coût une unité de production [Farid 07].

Dans un problème de configuration, on s'intéresse à prévoir l'état du système sur l'ensemble de son cycle de vie. Dans un problème de reconfiguration, on s'intéresse à une phase bien définie du cycle de vie du système, c'est à dire son évolution vers plusieurs configurations envisageables.

II.1.1 Modélisation des processus de reconfiguration

Un processus de reconfiguration en systémique correspond à une modification de la position d'au moins un objet dans le référentiel temps/espace. La reconfiguration d'un système de production fait intervenir des transformations temporelles et spatiales. Ces transformations sont caractérisées par :

— La date du changement et la durée de sa propagation. Le déclenchement de la reconfiguration du système correspond à la décision d'introduire le nouveau produit dans l'usine. La durée de sa propagation dépend des solutions envisagées.

— L'amplitude du changement représente l'impact des modifications à apporter au système. Par exemple, si un nouveau véhicule nécessite un capot en aluminium, l'amplitude de ce changement représente les modifications nécessaires à apporter à la structure du système d'assemblage permettant d'assembler ce capot.

— Le rythme du changement définit la fréquence d'introduction d'un nouveau produit. Dans l'automobile par exemple, cette fréquence est de l'ordre de 2 à 3 par an. Elle varie également d'une usine à l'autre.

Dans la figure II.1 le processus de reconfiguration est considéré comme un processus de changement de plusieurs niveaux d'une usine [Georgoulias 10]. Ce processus comporte quatre phases :

1. Définition des modifications : il s'agit de définir les orientations concernant les évolutions possibles du système de production.
2. Planification des modifications : il s'agit de planifier les travaux permettant de réaliser les modifications identifiées par rapport à la date de démarrage prévue.
3. Choix parmi un ensemble de modifications : il s'agit de prendre une décision sur une seule orientation qui soit cohérente avec les objectifs de performances de coût, de délai et de qualité.
4. Implémentation des modifications : il s'agit de réaliser les travaux nécessaires aux dates prévues dans le planning.

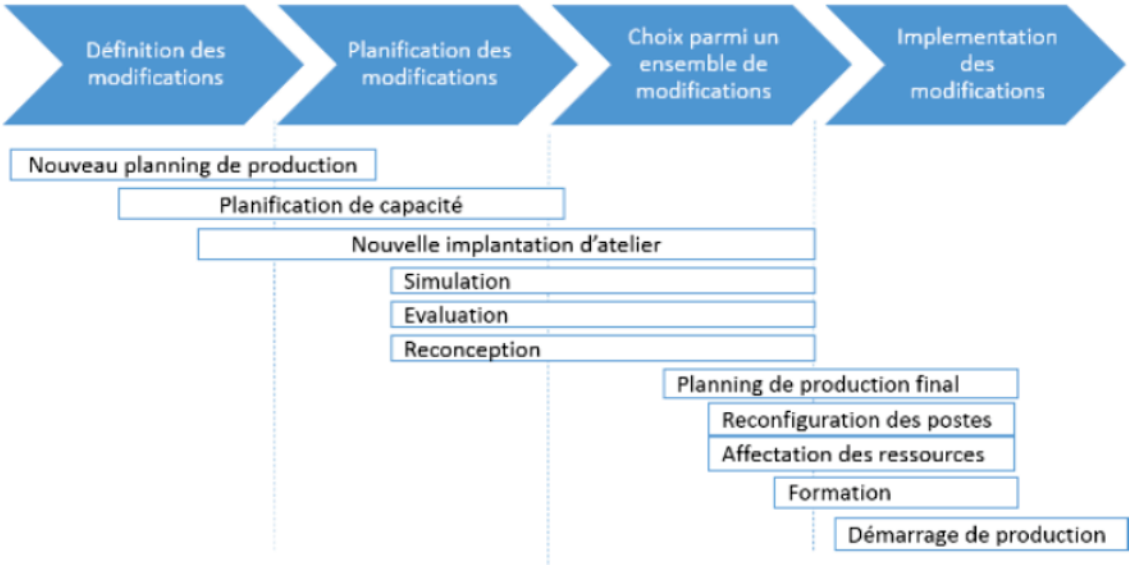


Figure II.1 – Processus global de reconfiguration

Dans ce processus de gestion des changements, les boucles entre les étapes de définition et de planification des modifications ne sont pas explicitées. Des choix, que nous développerons en détail dans la suite de ce manuscrit, sont toutefois réalisés lors de ces itérations.

II.1.1.1 Facteur de déclenchement du processus de reconfiguration

Les principaux facteurs de reconfiguration du système de production sont les modifications du produit et des contraintes industrielles. On distingue les catégories de modifications liées aux :

— Caractéristiques du produit : ensemble de caractéristiques du produit (Ex :Nombre d'opérations d'assemblage, type de pièce...)

— Caractéristiques du système de production : ensemble de caractéristiques du système de production (Ex : Capacités de production, niveau de robotisation ...)

Après avoir décrit plusieurs scénarios d'évolution du produit, les décideurs doivent identifier pour chaque scénario les solutions de reconfiguration possibles du système permettant de répondre à ces évolutions.

Différentes configurations possibles peuvent correspondre à un même scénario, ce qui conduit à plusieurs niveaux de performance en termes de capacité et de coût de production. Une approche permettant d'adresser cette décision consiste à choisir la configuration qui propose une capacité maximale avec un coût de production minimum et de réitérer ce raisonnement à chaque modification du produit ou de la demande.

Le problème dans cette approche, c'est que, étant donné une meilleure configuration pour un scénario A donné et une meilleure configuration pour un scénario B censé se présenter après A, la reconfiguration peut ne pas être faisable techniquement dans le planning du projet ou bien peut être tout simplement trop coûteuse. Même dans le cas où les solutions sont techniquement faisables, le processus de reconfiguration peut conduire à un résultat non performant au global.

Il s'agit d'un problème dynamique et stochastique dans lequel les scénarios sont incertains et le décideur cherche à minimiser une fonction de performance (ex : coût, flux de trésorerie) sur une période donnée. Ce problème est souvent rencontré dans l'industrie avec le volume comme seule exigence de reconfiguration. Il s'agit dans ce cas d'un problème connu de gestion de capacité.

II.1.1.2 Langages de modélisation des processus

Les choix réalisés dans les processus de conception et de reconfiguration sont fortement liés aux critères de performance du système de production. La modélisation des processus

permet de faire le lien entre ces activités et leurs résultats.

Il est donc nécessaire de modéliser les processus de reconfiguration afin d'analyser l'impact des décisions (choix de reconfiguration) sur les performances du système. Dans ce contexte, la modélisation des processus nous permettra de formaliser les différents niveaux de choix et de décrire le cheminement qui permet d'identifier les solutions.

Plusieurs langages de modélisation existent pour décrire un processus en général. Nous étudions plusieurs de ces langages pour représenter différentes stratégies de reconfigurations de lignes de production.

Les langages présentés ci-dessous se basent sur le concept d'activité (figure II.2) puisqu'un processus est une succession d'activités. Une activité est définie comme une fonction de transformation d'entrées (informations ou matière) en sorties (informations ou matière) au moyen de mécanismes (hommes ou machines). L'exécution de l'activité est déclenchée par un ou plusieurs contrôles [ISO 9001].

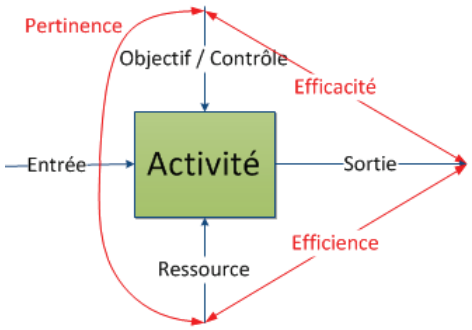


Figure II.2 – Concept d'activité et performances associées

BPMN : Le Business Process Management Notation est un langage graphique récemment développé par l'Object Management Group (OMG 2009) qui permet de capturer les processus métier. L'avantage de ce langage de modélisation est de fournir une notation commune aux différents utilisateurs (domaine métier, fonctionnel, logiciel). Un diagramme BPMN est principalement composé de quatre éléments de base. Des nœuds de graphe, des objets de flux, des conteneurs (swimlanes) et des artefacts. Il possède un vocabulaire riche et visuel adapté aux besoins de la conception de processus complexes.

Event-driven Process Chain (EPC) : Il s'agit d'une méthode de modélisation de processus proposée par l'architecture ARIS (Scheer 1992). Un diagramme EPC comprend principalement des fonctions, des évènements et des connecteurs logiques. Un diagramme EPC est très lisible et compréhensible par des acteurs métiers. Il possède des liens vers d'autres éléments d'architecture d'entreprise.

IDEF3 : il s'agit d'un langage descriptif qui permet de modéliser les processus en se basant sur le concept d'unité de comportement (UDC) [Vernadat 99]. Ces UDC

modélisent l'aspect fonctionnel d'un processus et sont connectées par des éléments de jonction et des liens (Et, Ou, Ou exclusif). Cette méthode permet de capturer les aspects fonctionnels et comportementaux d'un processus mais ne met pas en évidence l'aspect organisationnel. Elle est toutefois compréhensible et accessible pour communiquer aisément.

Diagramme d'activité d'UML Il s'agit d'un diagramme comportemental d'UML (Unified Modelling Language). Il permet de représenter le déclenchement d'événements en fonction des états du système et de modéliser des comportements parallélisables. Le diagramme d'activité est également utilisé pour décrire un flux de travail (workflow). Les principaux concepts sont l'action, l'action structurée, les décisions, les jointures et les éléments de liaisons.

SysML : "System Modeling Language" est une extension d'UML normalisée par l'OMG (Object Management Group) en 2004 pour pallier les manques d'UML en matière d'ingénierie système. UML étant plus adéquat pour les systèmes d'informations, les concepts relatifs aux logiciels (ex : objet, classe) ont été remplacés par des éléments plus neutres (ex : bloc).

Chacun de ces langages permet de représenter un processus métier (ex : reconfiguration de système d'assemblage), toutefois il existe des différences notables entre eux. Le tableau suivant en fait une synthèse, en proposant les avantages et inconvénients inhérent à notre besoin de modélisation. Ce n'est pas forcément valable dans le cas général.

Langage	Avantages	Inconvénients
BPMN	Langage commun entre les métiers et les développeurs Richesse et expressivité du formalisme	La richesse du vocabulaire peut compliquer la méthode
EPC	Richesse des liens vers d'autres éléments d'architecture du système Lisibilité et compréhensibilité	Langage plutôt proche des métiers.
IDEF3	Syntaxe riche et à l'origine des autres langages	Modèle ancien. Nécessite IDEF0 pour définir les conditions d'entrée ou de sortie
UML	Facile à prendre en main	Diagramme plutôt orienté systèmes d'information
SysML	Plutôt orienté ingénierie système	Approche top down principalement

Tableau II.1 – Avantages et inconvénients des langages de modélisation de processus

Le tableau II.2 présente les différentes vues que ces langages permettent de modéliser. Il s'agit principalement des vues fonctionnelles, structurelles et comportementales d'un

système.

	BPMN	EPC	UML	IDEF3	SYSML
Fonctionnel	Oui	Non	Partiel	Oui	Oui
Structurel	Non	Non	Oui	Non	Oui
Comportemental	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui

Tableau II.2 – Synthèse des langages de modélisation

Nous souhaitons établir une vision comportementale du processus de reconfiguration. En recoupant les avantages et les inconvénients de chaque langage (tableau II.1) avec les points de vue qu'ils permettent de modéliser, le langage SYSML nous semble plus intéressant. En effet, il permet de répondre à l'ensemble des besoins de modélisation d'une ligne de production (fonctionnelle, structurelle, comportemental) et de ses processus de reconfiguration.

Dans cette section, nous avons vu différentes approches permettant d'aborder le problème de reconfiguration d'une ligne de production. Plusieurs méthodes de modélisation de ces processus ont été présentées. La section suivante développe les caractéristiques d'un système de production reconfigurable. Une meilleure compréhension des propriétés de ce type de système permettra d'en saisir les avantages.

II.1.2 Les systèmes de production reconfigurables (RMS)

Les systèmes de production reconfigurables RMS (Reconfigurable Manufacturing Systems) sont une réponse à la variation des conditions d'exploitation et de conduite de système de production dans un contexte incertain.

Plusieurs travaux ont fait un état de l'art des systèmes manufacturiers reconfigurables, de leurs enjeux et des caractéristiques à prendre en compte durant leur conception [Bi 08] [Berruet 14] [Koren 10].

Les systèmes de production reconfigurables sont connus pour leur changement rapide de capacités (la quantité des produits fabriqués) et de fonctionnalités (types de produits) afin de s'adapter à la demande du marché.

Un système reconfigurable se définit comme un système disposant d'une **architecture**, constituée des entités composant le système, ainsi que d'une **configuration** spécifiant comment ces entités sont utilisées afin de répondre à un objectif [Berruet 14].

II.1.2.1 Caractéristiques des systèmes de production reconfigurables

Afin de garantir la réactivité attendue, les RMS doivent être conçus en tenant compte de plusieurs propriétés dont la modularité, la convertibilité, l'extensibilité et l'intégrabilité

[Wiendahl 07].

— **La modularité** : Facilité d'ajout ou de suppression d'éléments modulaires (logiciel ou matériel) sans affecter toute la ligne.

— **La convertibilité** : capacité à se restructurer avec un minimum d'effort pour la réalisation d'un nouveau type de produit (Long terme).

— **L'extensibilité** : capacité du système à augmenter ou à diminuer sa capacité de production (Moyen terme).

— **L'intégrabilité** : Capacité d'un système à intégrer les éléments modulaires dans le système rapidement et à moindre coût.

Ces caractéristiques donnent à un système en général son caractère reconfigurable et peuvent être pris en compte dans la phase de conception.

Le processus de reconfiguration possède d'autres caractéristiques similaires à différents types de systèmes. [Lamotte 06] propose une liste d'éléments invariants à un processus de reconfiguration dans le domaine des systèmes automatisés de production (SAP), des systèmes informatiques, électroniques, et mécaniques.

II.1.3 Approches existantes de reconfiguration de systèmes

Il existe plusieurs approches permettant d'aborder, de modéliser ou de résoudre un problème de reconfiguration. En fonction de l'objectif visé par l'étude ou des spécificités du domaine d'application, différentes approches existent dans la littérature. Dans ce paragraphe nous présentons une liste non exhaustive d'approches qui s'intéressent aux mécanismes de reconfiguration de systèmes et à leur évaluation pour la prise de décision.

II.1.3.1 Approche "upgrade to performance"

Il s'agit de mettre en œuvre un processus permettant d'améliorer les performances d'un système dans différentes situations de "renouvellement" [Zolghadri 15]. Quatre situations de renouvellement sont concernées : la rénovation, la modernisation, l'extension et la conversion. L'approche s'intéresse à la performance du système au niveau de ses services, de ses structures et de ses fonctions.

L'objectif de cette approche est d'assurer une mise à niveau d'un système à une performance donnée. Cette approche a été utilisée dans le contexte de développement d'un outil support à la propagation de changement (Logiciel ARM). La démarche d'analyse consiste à (1) quantifier et qualifier un changement, puis (2) analyser la propagation du changement.

Les systèmes d'assemblage dans l'automobile sont principalement concernés par les situations d'extension et de conversion. Dans ce contexte, on cherche plutôt à proposer aux décideurs le niveau de renouvellement qui serait plus pertinent en fonction des objectifs et des contraintes du projet (conversion ou extension). En d'autres termes, quel niveau de reconfiguration est plus intéressant en fonction des objectifs du projet.

II.1.3.2 Approche par l'analyse de l'évolution d'un système

D'autres approches [Geiskopf 04] proposent une modélisation de l'évolution de systèmes de production en se basant sur les principes d'innovation (TRIZ). En analysant les contradictions d'évolution, techniques et physiques, le concepteur du système peut formaliser les orientations d'évolution du système. Par exemple, l'introduction de nouvelles ressources engendre une évolution du système qui nécessite de résoudre des contradictions techniques et économiques.

La mise en évidence de ces contradictions n'est pas faite systématiquement dans le cas de projets d'industrialisation de véhicule. En effet, les concepteurs s'intéressent plutôt à répondre à un cahier des charges et ont souvent peu de visibilité sur les conflits que la solution engendrera sur d'autres métiers. De ce fait, les contradictions sont plutôt identifiées et résolues lors d'instances de revue d'études collaboratives pilotées par un architecte (§ V.1).

II.1.3.3 Approche par l'analyse des options réelles

Les décisions de reconfiguration et de réutilisation de moyens d'assemblage ont été modélisées comme la valeur d'une option financière pour pallier les limites des études de rentabilité basées sur la valeur nette actualisée [Fleschutz 08]. Cette dernière ne permet pas d'évaluer la flexibilité associée à la réutilisation de moyens de production. La figure II.3 montre la frontière d'applicabilité des approches basée sur la valeur actualisée et les options réelles. L'évaluation basée sur les options réelles est plus pertinente lorsque l'irréversibilité et l'incertitude de la décision sont élevées [Yannou 08a].

La théorie de "l'option réelle" peut être appliquée aux problèmes de conception comme technique d'évaluation de projet. Elle s'appuie sur le principe des options financières et permet de prendre en compte la flexibilité des décisions des managers. La réalisation de projets tels que la modernisation, l'extension ou la conversion de moyens d'assemblage crée non seulement des richesses mais aussi des opportunités d'investissement que l'on doit considérer dans le calcul de la valeur. Une option réelle est un droit et non une obligation d'investir dans le futur.

Il s'agit donc d'un outil d'aide à la décision stratégique qui permet de prendre en

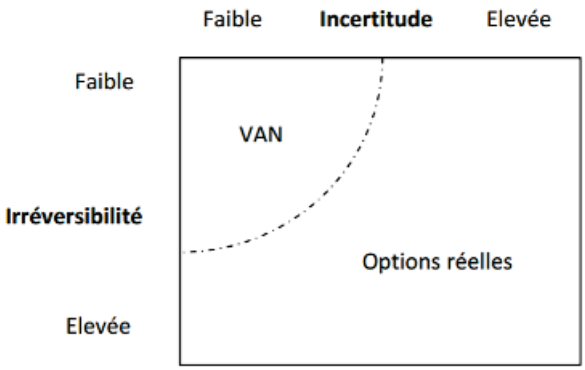


Figure II.3 – Zones d'applicabilité des approches par options réelles

compte la flexibilité dans la prise de décision d'un projet industriel ou le choix d'une technologie.

II.1.4 Discussion

Parmi les approches de reconfiguration que nous avons identifiées dans la littérature, l'approche upgrade to performance s'intéresse à une mise à niveau d'un système pour une performance objectif. L'approche par analyse de l'évolution du système s'intéresse aux contradictions techniques entre les différents aspects de cette performance. L'approche par les options réelles s'intéresse aux décisions stratégiques de réutiliser ou non les moyens de production en se focalisant sur la flexibilité de décision.

Ces approches bien qu'intéressantes, ne mettent pas en évidence pour le décideur l'impact des décisions en termes de modifications sur une configuration de ligne existante. C'est ce que nous cherchons à faire dans le but de mettre en évidence les implications des différents choix qui s'offrent aux décideurs.

L'objectif de cette section est de présenter un état de l'art sur les approches permettant d'aborder le problème de reconfiguration et de modéliser les mécanismes de reconfiguration d'une ligne de production dans . Le but est d'analyser l'impact des solutions sur la configuration initiale du système. Cette première étape cherche à mettre en évidence de l'impact des modifications qu'implique chaque solution. L'étape suivante consiste à évaluer ces solutions et à les comparer pour orienter le choix du décideur.

II.2 Evaluation des performances et prise de décision

Cette section présente les approches de modélisation et d'évaluation de systèmes. Elle aborde le contexte de la conception préliminaire d'un système de production, les approches

de conception et production intégrée, les concepts liés à l'analyse de performances et enfin les méthodes d'aide à la décision.

II.2.1 Contexte de l'évaluation

L'évaluation porte sur les choix de reconfiguration du système de production. Les solutions identifiées lors de l'analyse des évolutions possibles du système permettent d'identifier des configurations possibles et différents modes d'obtention de ces configurations.

La figure II.4 montre le processus d'exploration des solutions et d'évaluation des performances permettant de choisir parmi plusieurs solutions. Une représentation de l'espace des performances atteignables permet aux décideurs d'analyser dans un premier temps les différentes solutions possibles. Une analyse des inducteurs de performance permet d'argumenter les choix parmi ces alternatives.

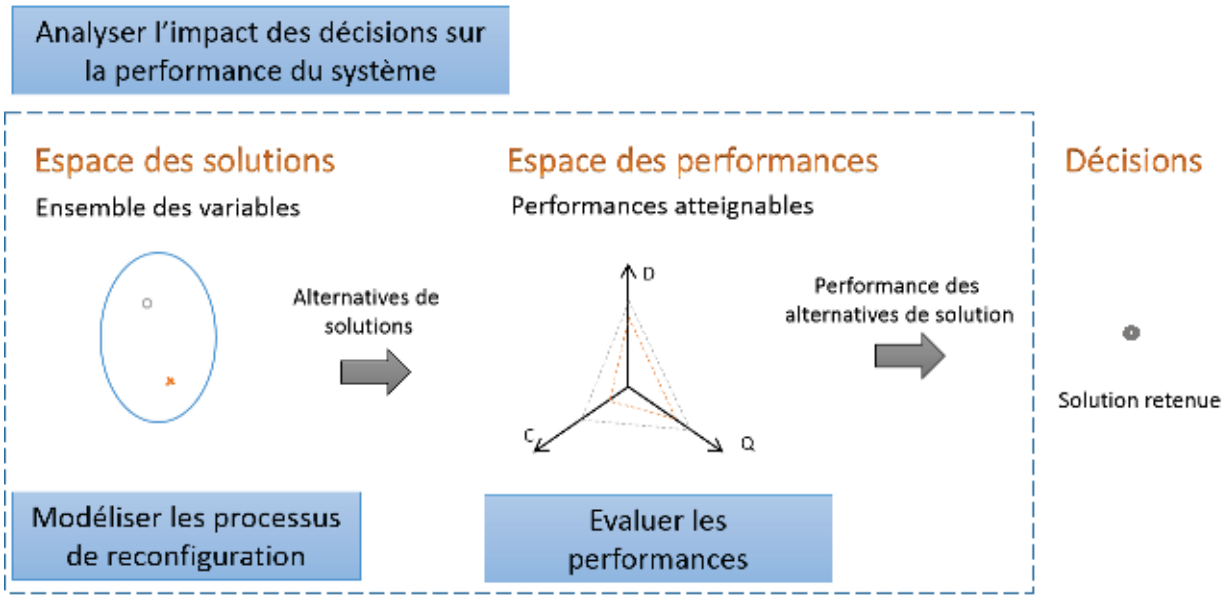


Figure II.4 – Processus de décision en ingénierie

De façon générale, le processus de conception d'un système de production suit une séquence de quatre étapes [Pahl 07] :

— l'analyse du besoin

— la recherche des concepts

— la conception architecturale

— la conception détaillée

La conception préliminaire se limite aux trois premières étapes. Son enjeu principal est de converger le plus tôt possible vers les meilleures solutions au regard des exigences

techniques, économiques et environnementales. La conception détaillée se base sur les résultats préliminaires tout en approfondissant l'étude de la solution adoptée.

S'il devient nécessaire de revenir sur les décisions de la conception préliminaire pour non-respect de certaines contraintes, la réalisation du projet dans les délais impartis peut être compromise.

Dans le cas des lignes de production, des étapes spécifiques sont proposées [Dolgui 06] :

— **Analyse du besoin** (Produit-Process) : Cette étape vise à synthétiser les spécifications du produit à fabriquer et à identifier les concepts de processus de fabrication associés.

— **Planification des processus** (Choix de gamme) : cette étape consiste à sélectionner les équipements et les séquences d'opérations nécessaires pour fabriquer le produit en prenant en compte les contraintes technologiques. Par exemple la compatibilité entre les opérations.

— **Configuration de ligne** (Equilibrage de la ligne) : cette étape vise à répartir les opérations nécessaires pour fabriquer le produit entre plusieurs postes de travail.

— **Evaluation et simulation** : Cette étape vise à évaluer la performances d'une solution en fonction de plusieurs critères liés au coût à la qualité et au délai de fabrication. La simulation est utilisée pour étudier le flux dynamique des produits en tenant compte des processus retenus aux étapes précédentes.

II.2.1.1 Conception et production intégrée

La conception des systèmes de production est traditionnellement considérée comme faisant partie de la discipline de la production et de la fabrication. Cependant, elle fait partie intégrale du processus de réalisation du produit et de ce fait doit être pris en compte dans la conception de produit [Weston 08].

Le processus de conception régit la conception d'un produit ou d'un système en régulant les coûts et les délais de développement, les flux de connaissances et d'informations utilisés, et assure la cohérence des activités nécessaires à la tenue des objectifs visés.

Un problème de conception est la transformation de fonctions (ex : assembler un produit) en une description ou une structure physique (moyens d'assemblage) qui permet de réaliser ces fonctions [Sprumont 07]. D'une manière générale, un problème de conception consiste à faire correspondre les spécifications du système (variables de conception) aux besoins et exigences du système [Chryssolouris 09]. Ces exigences peuvent se traduire par des objectifs de performance à atteindre (coût, qualité, délai) ou des contraintes à respecter.

Plusieurs difficultés sont à prendre en compte :

— Le système doit s'adapter à l'évolution du marché et est donc amené à être plus souvent reconfiguré.

— La relation entre la performance et les variables de conception ne peut pas toujours être exprimée de façon analytique.

— Les objectifs de performances sont parfois contradictoires. Des compromis entre le coût, la qualité et le délai doivent être faits systématiquement.

Une méthode de conception consiste à spécifier, élaborer puis évaluer une solution partielle qui provient de plusieurs points de vue. Cela nécessite de décrire les étapes du processus (qui fait quoi, quand, pourquoi et comment ?) et de représenter de manière unique les informations utilisées. Cette représentation doit être partagée entre les acteurs du projet afin d'améliorer leur coopération. Cette coopération peut engendrer des conflits qu'il faudra gérer par des mécanismes de décision par arbitrage ou négociation.

II.2.1.2 Les approches Design For X (DFX)

Les approches DFX visent à prendre en compte au plus tôt les problèmes liés au coût, à la qualité et au délai de développement d'un produit et de son système de production. Elles résultent d'une prise de conscience de l'importance de l'impact des décisions prises en amont du cycle de vie du produit sur les activités situées en aval. Cette approche englobe plusieurs concepts qui consistent à prendre en compte les contraintes des différentes phases du cycle de vie du produit ou un ensemble de facteur de performance. On distingue deux familles d'approches de conception pour X en fonction des objectifs de conception :

· **Cycle de vie :** Intégrer et faciliter une activité du cycle de vie du produit
  — Design For Manufacturing (DFM) : Fabrication intégrée [Roucoules 07] [Skander 06]
  — Design For Assembly (DFA) : Conception pour l'assemblage [Demoly 10]
  — Design For Manufacturing and Assembly (DFMA) : Assemblage et fabrication intégrées [Boothroyd 96]
  — Design For Supply Chain (DFSC) : Conception pour la logistique [Lee 93] [Herrmann 03]
  — Design For Environment (DFE) : Réduire l'impact environnemental [Nguyen 13]

· **Facteur de performance :** Améliorer un critère pour atteindre un objectif de performance
  — Design To Cost (DTC) : Conception à coût objectif [Dean 90] [Angéniol 05]
  — Design To Quality (DTQ) : Amélioration de la qualité [Poulet 11]

— Design To Availability (DTA) : Amélioration de la disponibilité [Djeridi 10]
— Design To Safety (DTS) : Amélioration des aspects santé et sécurité [INRS 11] [Feno 17]

Les approches de DFX permettent d'améliorer la conception d'un système dès les phases amont de développement afin de réduire les cycles de validation du système. Dans la pratique, ces méthodes sont principalement utilisées pour réduire les coûts et les délais de développement.

Les niveaux d'analyse et le type d'aide proposée par le DFX : Une approche DFX peut proposer trois niveaux d'analyse aux concepteurs. Il peut s'agir d'un guide contenant des règles métiers, d'une analyse quantitative de la conception ou bien d'une automatisation de ces analyses.

— **Description d'un guide et d'un ensemble de règles de conception :** L'analyse est basée sur l'expérience sous forme de « check lists » maintenues à jour. Il s'agit généralement de mesures binaires (qui permettent d'identifier si la solution est réalisable ou non) ou critères qualitatifs (qui qualifient le niveau de faisabilité d'une solution par rapport à un critère : faible, moyen, bon, excellent). Cette approche nécessite une interprétation humaine.
— **Analyse quantitative de la conception :** Plusieurs caractéristiques du système sont évaluées par un critère quantitatif (grille de cotation ou « design scorecard »). Les cotations sont agrégées pour avoir une vue globale de la solution en cours d'étude. Cette dernière peut être revue avec comme objectif d'améliorer une ou plusieurs cotations jugées insuffisantes.
— **Automatisation complète du processus :** En utilisant une analyse quantitative associée à un traitement informatique, l'évaluation qualitative ou quantitative peut être automatisée. L'analyse peut être supportée par un système à base de connaissance.

Synthèse des principales approches de conception pour X : Le tableau II.3 synthétise les approches de conception pour X. Seuls les approches qui permettent d'aborder les problématiques liées à l'assemblage sont présentées. Pour chaque approche nous détaillons leurs objectifs, les supports d'analyse et les critères pertinents.

Par rapport aux différentes approches présentées dans le tableau ci-dessus, nous proposons quelques développements sur la méthode DFA. En effet, l'assemblage de caisse automobile fait intervenir des opérations et procédés d'assemblage qui s'enchainent dans des processus complexes. Une compréhension des principes du DFA nous permettrait d'appréhender la complexité à prendre en compte lors de l'étude de ces processus d'assemblage.

	Approches	Objectifs	Support / critères
Cycle de vie	Design For Manufacturing	Réduire les coûts de fabrication	Vérification de la faisabilité de fabrication
	Design For Assembly	Réduire les coûts d'assemblage	Vérification de l'assemblablilité
Facteurs de performance	Design To Cost	Conception à coût objectif	Analyse des coûts
	Design For Quality	Amélioration de la qualité	Analyse des exigences de qualité

Tableau II.3 – Synthèse des approches de conception pour X

Conception pour l'assemblage (DFA) : La conception pour l'assemblage vise à améliorer la performance d'un système par la prise en compte des contraintes d'assemblage dans la phase de conception préliminaire de produits mécaniques. Les informations de séquence d'assemblage ont besoin d'être prises en compte dans la phase amont de développement pour garantir la faisabilité de l'assemblage du produit. Ces informations permettent d'orienter les choix de conception du produit.

D'après une analyse de la littérature sur les approches DFA (Design For Assembly), Demoly [Demoly 10] soulève l'importance de la séquence d'assemblage comme référentiel de l'évaluation et le besoin d'intervenir dès les phases amont du processus de développement du produit. Il propose une approche proactive de conception et de gestion des informations techniques intégrant dès les phases amont les contraintes d'assemblage du produit.

Le DFA est aussi un outil de conception qui vise à faciliter l'assemblage d'un produit. Il se focalise sur le nombre de pièces, le nombre de manutentions et la facilité d'assemblage du produit.

Objectifs : L'objectif principal du DFA est de minimiser les coûts d'assemblage en proposant des recommandations permettant de minimiser le nombre de nœuds d'assemblage et le nombre de pièces. Dans une structure d'assemblage, un nœud d'assemblage correspond à un point où plusieurs pièces sont assemblées en un seul composant. Ces recommandations apportent au concepteur une vision et une compréhension sur les difficultés d'assemblage futures du produit, lors des phases de conception détaillée. Cela leur permet ensuite de proposer des améliorations au produit en tenant compte des contraintes d'assemblage.

Principes : La méthode DFA est régie par un ensemble de principes :

— Minimiser le nombre de pièces que compte un produit.

— Concevoir les pièces qui peuvent être facilement positionnées dans les outillages.
— Concevoir les pièces qui s'auto-assemblent
— Minimiser la réorientation des pièces durant l'assemblage
— Concevoir des pièces faciles à identifier, à manipuler et à insérer
— Préconiser un assemblage "top-down"
— Standardiser les pièces pour minimiser les éléments de liaison
— Favoriser une architecture modulaire
— Concevoir une pièce de base permettant de localiser les autres pièces
— Favoriser la symétrie des autres pièces autour de la pièce de base

Processus : Ces principes sont mis en œuvre par un processus articulé dans les étapes suivantes :

1. Analyser les exigences du produit (Analyse fonctionnelle, Ratio nombre de pièces, standardisation possible)
2. Analyse du nombre d'éléments
3. Identifier les opportunités de réduire le nombre d'éléments
4. Identifier les opportunités de réduire les manutentions
5. Identifier les opportunités de réduire les opérations secondaires

II.2.1.3 Discussion

On constate que les approches DFX privilégient l'amélioration d'un aspect particulier de la performance du système. Par exemple, l'optimisation des coûts peut être obtenue en réduisant les investissements donc en réutilisant au maximum l'installation existante. L'amélioration de la fiabilité peut être obtenue en réduisant les taux de panne tandis que l'amélioration de la maintenabilité peut être obtenue en réduisant les temps d'arrêts.

Plusieurs axes de recherches sur le DFX sont encore à explorer selon [Holt 09] :

— **Ne plus considérer ces approches de manière isolée :** en fonction des objectifs de conception, des conflits peuvent émerger. Il y a donc un besoin de gérer les compromis entre ces objectifs de conception.
— **Intégrer les approches DFX dès les phases amont du processus de développement :** En effet, elles sont souvent appliquées en conception détaillée où des décisions ont déjà été prises et contraignent les solutions envisageables.
— **Chercher la cohérence entre les approches DFX et les méthodes d'aide à la décision multicritère :** il est important que les outils de conception

n'introduisent pas d'inconsistance dans les choix de conception. Afin d'éviter de telles situations, il peut être intéressant d'étudier les relations entre les supports fournis par les approches DFX et les méthodes d'aide à la décision, plus particulièrement les approches multicritère.

II.2.2 Modélisation pour l'évaluation des performances

Ce paragraphe s'intéresse aux outils et méthodes utilisés pour évaluer la performance d'un système tout au long du processus de développement. La maîtrise des choix de solution (architecture d'implantation, configurations de ligne) est nécessaire pour prendre des décisions sur les meilleures orientations à poursuivre en phase d'étude détaillée. Les performances atteignables des différentes solutions doivent pour cela être évaluées en utilisant différents modèles du système.

L'utilisation d'un métamodèle est particulièrement intéressante pour analyser le système avec un plus haut niveau d'abstraction [Ducq 07] [Lamotte 06]. Dans le cas des études d'avant-projet d'industrialisation de caisses de véhicule, cette méta modélisation du système d'assemblage est formalisée et gérée dans des outils de gestion des nomenclatures produits et processus (Pour des détails sur la notion de "graphe d'assemblage" voir § II.3.1).

Le processus d'industrialisation est constitué d'un ensemble de décisions prises à partir de l'évaluation de différents niveaux de maturité de solutions. Plusieurs concepts d'implantation sont d'abord identifiés à partir du cahier des charges proposé par la stratégie industrielle. Ce cahier des charges peut évoluer au cours du projet. Parmi un ensemble de possibilités, un concept d'implantation est développé en détail. Si les performances atteignables de celui-ci ne sont pas satisfaisantes, le choix des concepts peut être remis en cause.

Un cahier des charges pour l'industrialisation d'un nouveau véhicule dans l'automobile contient généralement :

— des spécifications du nouveau véhicule (Plateforme, type de caisse, variantes... § Annexe B.1)

— des orientations du système d'assemblage (Développer une nouvelle ligne, réutiliser la ligne existante)

— des caractéristiques de l'usine (Capacité totale, objectifs de performances)

— un planning prévisionnel du projet (Jalons et date de démarrage prévue)

II.2.2.1 Maîtrise des performances d'un système

Il s'agit de mettre en relation les performances à atteindre avec les solutions techniques décrites sous la forme d'un ensemble de paramètres de conception dont les relations définissent le comportement du système. Ainsi, maîtriser la performance du système consiste à analyser l'impact de chaque paramètre de conception sur les performances, et donc à maîtriser ce comportement. Dans le cas de systèmes complexes tel qu'un système industriel, il est plus difficile de maîtriser globalement le comportement du système.

Notion de performance globale

Il est difficile d'optimiser l'ensemble des différents aspects de la performance. Le résultat global d'une décision est généralement un compromis entre ces attributs.

La performance globale c'est l'obtention conjointe de la pertinence, de l'efficience, et de l'efficacité, appréciées en termes de coûts et de valeur, sur l'intégralité du cycle de vie du système [Senechal 04].

II.2.2.2 Mesure, appréciation et évaluation de la performance

L'analyse de la performance d'un système fait intervenir des étapes de mesure, d'appréciation et d'évaluation de plusieurs indicateurs de performances. Nous proposons quelques définitions afin de positionner les activités d'évaluation de notre étude.

La mesure de performance est une variable dont la valeur quantifie un aspect de la performance du système à étudier. Il s'agit d'une donnée collectée, un résultat d'une opération mathématique simple ou une grandeur identifiée généralement dans les indicateurs à une mesure physique ou technique relevée au niveau d'un système physique ou technique [Berrah 07].

L'appréciation consiste à interpréter la mesure et vérifier sa validité tout en prenant en compte le contexte. Cette appréciation dépend des connaissances et de l'expertise de l'utilisateur.

L'évaluation consiste à assigner une valeur bonne ou mauvaise, meilleure ou pire, à une chose ou à un événement. Il ne s'agit donc pas seulement de mesurer la valeur intrinsèque des objets à évaluer mais aussi d'établir un ordre de préférence entre eux. L'évaluation de la performance n'est pas uniquement une expression du degré d'atteinte ou un écart entre une valeur atteinte et une valeur cible mais surtout un jugement qu'on porte sur la performance atteinte par rapport à la globalité des objectifs.

II.2.2.3 Evaluation des choix de reconfiguration de ligne de production

Dans la littérature, la reconfiguration de ligne de production est principalement évaluée par rapport au délai et au coût de reconfiguration. Avec un modèle pour la gestion des changements, [Georgoulias 07] évalue l'efficacité de la reconfiguration par le délai de mise en œuvre des modifications. [Chen 09] se base uniquement sur les coûts. [Youssef 06] évalue la reconfiguration en fonction du délai, du coût et des efforts de mise en œuvre. L'évaluation porte sur trois niveaux : la reconfiguration au niveau de l'usine, au niveau du système et au niveau de la machine. [Hon 07] met en évidence la relation entre les phases de reconfiguration du système de production et le cycle de vie des familles de produit. Ce point de vue permet d'analyser la performance d'une ligne de production sur plusieurs phases de vie d'une famille de produit.

II.2.2.4 Analyse d'alternatives de solution

La prise de décision parmi plusieurs solutions constitue une activité fondamentale dans le développement de systèmes. L'objectif consiste à identifier les alternatives de solutions qui satisfont les exigences des parties prenantes afin de choisir celles qui vont être développées dans la suite du projet.

L'analyse d'alternative peut être pratiquée selon plusieurs niveaux. Cela dépend du domaine d'activité et de l'importance de la décision. [Ullman 11] propose quatre niveaux de maturité d'analyse d'alternatives de solution.

1. Proposer une seule alternative et fournir une justification.
2. Proposer plusieurs choix et fournir une analyse comparative monodimensionnelle avec quelques éléments d'incertitudes (ex : Rentabilité marginale basé sur une analyse "coût-bénéfice" d'un investissement).
3. Proposer plusieurs choix et fournir une analyse comparative multidimensionnelle avec quelques éléments d'incertitude.
4. Proposer plusieurs choix et fournir une analyse comparative multidimensionnelle robuste incluent l'ensemble des éléments d'incertitude.

L'analyse d'alternatives de solution propose de passer de la justification d'une solution à l'exploration de multiples options afin d'établir une base pour prendre une décision.

Le processus d'industrialisation peut être étudié sous l'aspect décisionnel. Dans la phase d'avant-projet, les décideurs choisissent une architecture du système (choix parmi différentes solutions de découpage du système) et un planning associé (choix parmi les différentes options de réalisation du projet). Le concept retenu sera étudié plus en détail dans la phase de développement. Un **scénario d'industrialisation** correspond donc à

l'instanciation des différents choix à faire pour arriver à une architecture souhaitée du système.

Le processus d'évaluation

En ingénierie système, le développement est composé généralement de trois macro processus : la définition du système, l'évaluation et la justification du système et l'intégration du système. Le processus d'évaluation et de justification peut s'appliquer à des exigences, des architectures et des composants du système (fig. II.5).

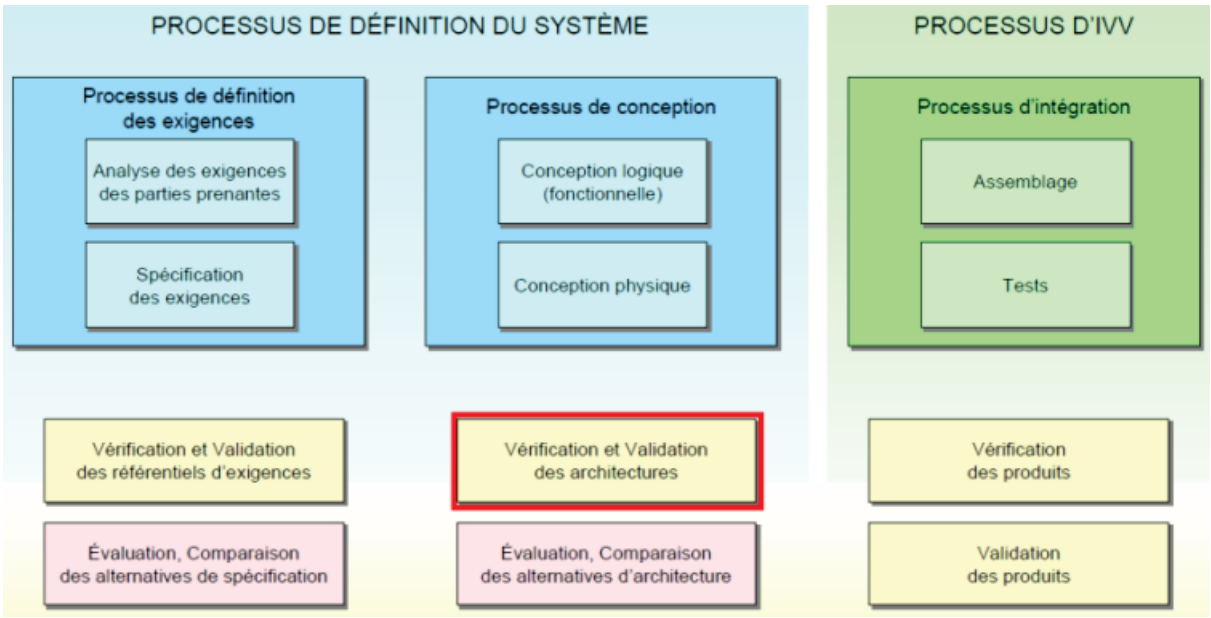


Figure II.5 – Processus d'évaluation et justification en ingénierie système [AFIS 09]

La vérification et la validation d'architecture permet d'analyser la performance et la faisabilité d'une solution. L'évaluation permet de comparer plusieurs architectures pour la prise de décision.

Gestion d'alternatives de solution

La gestion des alternatives de solution passe par la gestion des informations issues d'un projet d'ingénierie [Nowak 05]. La modélisation des alternatives de solution met en œuvre deux types de modèles :

— Un modèle de données intégrant les différentes vues du système (fonctionnel, informationnel, ressources, organisationnel)

— Un modèle de synthèse permettant de décrire les alternatives pour fournir aux concepteurs une vue d'ensemble des solutions possibles.

Les modèles de données visent à faire apparaitre la relation entre les paramètres de conception et les critères de performances du système. Le modèle de synthèse permet d'identifier et de situer une alternative par rapport à un ensemble de solutions possibles. Cette représentation vise à aider les décideurs à prendre une décision argumentée par

l'évaluation des alternatives de solutions. Les méthodes abordées dans ce paragraphe visent à proposer un modèle de synthèse positionnant les solutions en fonction de critères de performances adéquats.

Trois approches d'évaluation de solutions peuvent être identifiées dans la pratique ([Yannou 08a]) :

— approches par jugement : le décideur utilise son intuition et son expérience

— approches par négociation : les parties prenantes cherchent à atteindre un consensus

— approches par analyse : à partir des informations disponibles (base de données, documents, standards...), une analyse des performances attendues des alternatives est fournie au décideur

L'approche par analyse permet d'une manière plus objective de justifier les décisions autrement que par expérience ou par négociation.

Simon [Simon 60] définit la décision non pas comme une action ou un évènement mais comme un processus qui comporte des phases de définition d'objectifs, d'identification des critères et d'identification des alternatives. L'aide à la décision multicritère propose une démarche et des outils permettant de trouver des solutions aux problèmes de décision complexes.

II.2.2.5 Aide à la décision

Une aide à la décision pour la conception et la reconfiguration de systèmes fait intervenir des outils et des méthodes permettant de collecter, modéliser, traiter et restituer les informations relatives aux spécifications du système à différentes étapes du processus de développement. L'objectif est de donner une vue d'ensemble sur les performances futures du système en mettant en évidence l'impact des décisions sur ces performances et ainsi fournir des éléments objectifs pour permettre aux décideurs de faire leurs choix.

On distingue deux types de décisions dans les processus de conception et d'industrialisation [Girard 01]. Les décisions de conduite et les décisions technologiques.

— les **décisions de conduite** ou décisions organisationnelles concernent la structuration du projet, coordination des équipes, planification des études et modalités de suivi de l'avancement du projet, la planification d'activités et le suivi de l'évolution des spécifications du système (maitrise de la qualité, du coût et des délais). Les décisions de conduite sont peu structurées et nécessitent d'être mieux formalisées.

— les **décisions technologiques** sont liées aux choix de conception du système tout au long du projet. Par exemple la reformulation de la stratégie industrielle,

l'identification des concepts d'implantation, les choix fonctionnels et structurels de l'usine, les innovations à intégrer. Ces décisions correspondent à la sélection de solutions pour résoudre un problème lié à la conception du système d'assemblage (Choix d'implantation, type de processus d'assemblage, étude de faisabilité)

La conception est l'évolution des informations jalonnée par des décisions [Ullman 11]. Prendre ces décisions requiert un certain nombre d'informations. La figure II.6 présente une pyramide de la décision en fonction du niveau d'information. La plus simple forme d'information est une **donnée**. Une donnée peut être un nombre, un texte, un dessin, une géométrie ou tout autre information qui décrit un objet. Un **modèle** définit les relations entre les données. Ces relations peuvent être une représentation mentale d'une situation, des équations mathématiques, un ensemble de textes, ou des images en lien avec les données. Ces modèles produisent plus de données et la compréhension du comportement de ces modèles constitue la **connaissance**. Enfin, quand la connaissance est suffisante, un jugement sur l'ensemble de ces connaissances permet de prendre des **décisions**.

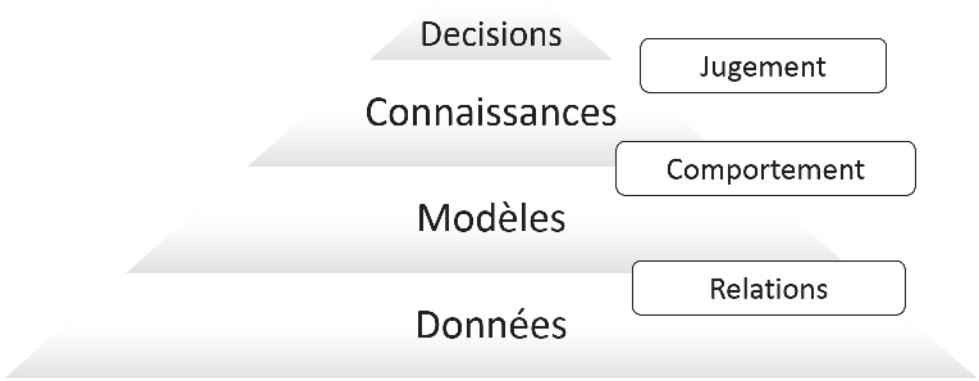


Figure II.6 – Pyramide de l'information pour la prise de décision

Dans ce travail nous nous intéressons aux alternatives de solutions liées aux décisions technologiques. L'évaluation de l'impact de ces choix fera l'objet du chapitre (§IV.3)

L'intérêt d'une approche décisionnelle pour améliorer les performances en conception et industrialisation réside dans le fait qu'elle s'intéresse aux processus d'ingénierie (flux d'informations) permettant de définir la configuration du système (flux de matière) [Girard 01]. En effet, la théorie de la conception [Simon 60] est basée sur cette approche décisionnelle dans les phases de recherche et d'évaluation des solutions.

Les objectifs de conception sont multiples et peuvent être contradictoires. Il n'est donc pas envisageable de chercher une solution optimale mais de trouver une solution satisfaisante en fonction du contexte du projet.

II.2.3 Les méthodes d'aide à la décision multicritère

Dans la pratique, le décideur doit intégrer un ensemble de critères qu'il veut optimiser de façon simultanée. Cependant, aucune solution ne peut maximiser tous les critères simultanément. Dans ce cas, il est préférable de rechercher les meilleurs compromis. Pour chaque cas particulier, il peut y avoir de bonnes et de mauvaises solutions. Un des objectifs de l'analyse multicritère est de prendre en compte et de pallier les problèmes de divergence des points de vue [Colorni 01].

Concepts de base de l'analyse multicritère [Roy 96] : Un problème de décision peut être décrit par les concepts suivants :

Alternative : choix possibles parmi un ensemble de décisions ;

Critère : élément quantitatif ou qualitatif suivant lequel les alternatives sont comparées ;

Poids d'un critère : importance attribuée à un critère ;

Evaluation : affectation d'une valeur à une alternative par rapport à un critère.

Les types de problèmes de décision : En fonction des objectifs de l'évaluation, on distingue quatre types de problèmes de décision [Roy 96] :

- **Le problème de choix** consiste à fournir au décideur la ou les meilleures solutions par une procédure de *sélection*.
- **Le problème de tri** consiste à affecter chaque solution à des catégories par une procédure de *segmentation*.
- **Le problème de rangement** consiste à ranger les solutions dans des classes d'équivalences allant de la meilleure à la moins bonne par une procédure de *classement*.
- **Le problème de description** consiste à décrire par des critères qualificatifs les solutions et leurs conséquences par une procédure *cognitive*.

Dans le contexte d'une aide à la décision pour la reconfiguration de systèmes, plusieurs solutions et leur processus d'obtention sont à évaluer. La problématique correspond à un problème de rangement puisqu'il s'agit de proposer aux concepteurs et chefs de projet un classement des alternatives de solutions possibles.

En fonction du mode d'agrégation des préférences des décideurs, on distingue deux familles de méthodes d'analyse multicritère. Les *méthodes d'agrégation totale* qui utilisent la théorie de l'utilité multi-attribut (MAUT : Multi Attribute Utility Theory) et les *méthodes d'agrégation partielle* qui s'appuient sur des relations de "surclassement" en prenant ou non en compte l'incomparabilité entre les critères et les solutions.

II.2.3.1 Les méthodes d'agrégation complète ou à base d'utilité

Ces méthodes consistent à agréger différents points de vue en une fonction unique appelée "fonction d'utilité" qui est estimée à partir d'un questionnaire proposé au décideur. Parmi ces méthodes, on peut citer les méthodes de la somme pondérée, du produit pondéré ou la méthode Analytic Hierarchy Process (AHP) [Saaty 00].

La méthode de la somme pondérée : La méthode de la somme pondérée (WSM - Weighted Sum Method) consiste à affecter un poids à chaque critère, une note est affectée à chaque alternative par rapport à chaque critère. La performance d'une alternative est définie par une somme pondérée, soit un problème d'analyse multicritère caractérisé par m alternatives évaluées par rapport à n critères.

$$A_i = max \sum_{j=1}^{n} a_{ij} \cdot w_j, i = 1..m$$

— Ai : valeur de l'alternative i

— aij : note associée à l'alternative i par rapport au critère j

— wj : poids du critère j

La méthode du produit pondéré : Dans la méthode du produit pondéré (WPM - Weighted Product Method), chaque alternative est comparée à partir des produits des ratios de chaque critère pour déterminer des ratios totaux.

$$R\left(A_k/A_L\right) = \prod_{j=1}^{n} \left(a_k j/a_L j\right)_j^w, KetL = 1..m$$

Les méthodes de somme et produit pondérés sont faciles à utiliser mais présentent certaines limitations :

— Un problème d'inversement des rangs : le résultat est sensible à la transformation d'échelle d'un critère. Par exemple, le résultat d'une évaluation de plusieurs alternatives en fonction d'un critère dimensionnel en mètre peut être différent si on changeait les valeurs en centimètre.

— Un problème de compensation entre critères : une évaluation très négative sur un critère peut être compensée par des évaluations très positives sur d'autres critères.

La méthode AHP (Analytic Hierarchy Process) Cette méthode, développée par Thomas Saaty en 1971 [Saaty 00], consiste à déterminer les poids d'une somme pondérée, comparer deux à deux les alternatives et les critères en prenant en compte plusieurs décideurs. Le principe de résolution d'un problème multicritère avec la méthode AHP suit les étapes suivantes :

1. Décomposer le problème complexe en une structure hiérarchique (Niveaux)
2. Effectuer les comparaisons binaires entre critères puis entre les alternatives par rapport à chaque critère suivant une grille standard de 1 (indifférence) à 9 (extrême préférence). Cette échelle standard permet de pallier le problème d'inversement des rangs
3. Calculer le poids de chaque critère ainsi que celui de chaque alternative
4. Vérifier la cohérence des jugements par un indice de cohérence
5. Synthétiser les comparaisons pour obtenir un classement

La méthode Macbeth : En anglais, Macbeth signifie "Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique". Cette méthode a été développée par Carlos Bana e Costa [Bana e Costa 08] et se base sur une approche itérative, de questionnement du décideur qui a pour but de quantifier l'attractivité relative de chaque action par rapport à une autre. Elle ne requiert qu'un jugement qualitatif de préférence, ce qui lui permet de s'affranchir des critiques concernant les notations et leurs références. Le système est basé sur un programme, vérifiant la consistance des données fournies, et créant une échelle de poids.

Les méthodes à base d'utilité ne prennent pas en compte l'incomparabilité entre les critères. De ce fait, une représentation et une gestion plus détaillée de la notion de préférence est nécessaire. Le paragraphe suivant introduit les méthodes de surclassement qui permettent de mieux modéliser ces préférences et dans certaines méthodes de prendre en compte l'incomparabilité entre les critères et les solutions.

II.2.3.2 Les méthodes d'agrégation partielle ou de surclassement

Ces méthodes consistent à élaborer progressivement une structure de préférence pour construire et exploiter une relation de surclassement entre les alternatives. Ces relations représentent les préférences du décideur à partir de l'information dont il dispose. Les méthodes les plus connues sont Electre et Prométhée.

Les méthodes Electre : Elles consistent à comparer deux à deux les actions possibles selon les critères retenus, affectés d'un poids et d'un ou de plusieurs seuils (indifférence, veto, préférence...). Elles permettent de répondre selon les versions à une problématique de choix, de classement, ou de tri des actions [Roy 96] [Colorni 01].

Ces méthodes font les hypothèses suivantes :

— L'acte de décision est un processus d'élaboration progressive d'une structure de préférence.

— Elles acceptent l'idée d'incomparabilité entre les alternatives.

— Les résultats sont une structure de préférence beaucoup moins stricte qu'un pré-ordre total en vue d'éclairer les décideurs sur le choix à faire.

La méthode Prométhée : Cette méthode est basée sur les théories de Roy (Electre) et développée par Jean-Pierre Brans et Philippe Vincke dans les années 80 [Brans 05]. Elle se décline en deux versions, acceptant ou non l'incomparabilité, et complète les méthodes Electre. La version qui accepte l'incomparabilité permet de comparer des alternatives avec une intensité de préférence représentée par la fonction Pi (x,y), où x et y sont les alternatives et gi(x) la note de l'alternative x par rapport au critère i.

$$Pi(x, y) = p(gi(x) - gi(y)) \tag{II.1}$$

Si P(x,y)=0 alors il n'y a pas de préférence de x sur y.
Si P(x,y)=1 alors il y a une préférence forte de x sur y.

Synthèse des méthodes d'aide à la décision multicritère

Dans le tableau II.4, nous présentons uniquement les méthodes que nous avons abordées dans cet état de l'art.

Méthodes	**Avantages**	**Inconvénients**
WSM et WPM	Simple à utiliser. approche intuitive	Problème d'inversement des rangs en cas de changement d'échelle. Problème de compensation entre critères
AHP	Modélisation du problème par une structure hiérarchique. Echelle standard	Problème d'inversement des rangs en cas d'ajout d'alternatives. Nombre de comparaisons élevé en fonction du nombre d'alternatives
Macbeth	Importance des critères et leurs interactions	Echelles non bornées
Electre	Présente plusieurs variantes en fonction du besoin. Permet de trouver des ex-aequo	Exige un grand nombre de paramètres
Prométhée	Prends en compte l'incomparabilité avec une intensité de préférence	La notion d'indifférence est rare en pratique, vu le nombre de calcul pour obtenir les flux

Tableau II.4 – Comparatif des méthodes d'aide à la décision multicritère

II.2.3.3 Choix de la méthode d'évaluation

Dans cette section, plusieurs méthodes d'aide à la décision multicritère ont été présentées. Deux types de méthodes sont identifiées : les méthodes à base d'utilité (somme pondérée, produit pondéré, AHP, Macbeth) et les méthodes de surclassement (Electre, Prométhée). Notre choix s'est porté sur la méthode de surclassement Prométhée pour deux raisons.

D'une part, les approches à base d'utilité ne tiennent pas compte de l'incomparabilité entre les alternatives alors que le décideur en industrie peut difficilement donner ses préférences. Un cas d'étude basée sur la méthode AHP a d'ailleurs été mené dans ce sens [Kichou 13] dans le but d'étudier les préférences des décideurs. Le résultat de l'évaluation qui s'est basée sur l'agrégation des préférences de plusieurs points de vue correspond au choix final de l'industriel mais ne permet pas d'avoir un écart de score significatif. D'où l'intérêt d'une approche par surclassement.

D'autre part, les seuils de concordance et de discordance, en ce qui concerne les des méthodes de surlcassement Electre, sont difficiles à expliquer à un décideur. La notion de préférence est plus parlante lors d'une présentation de synthèse d'évaluation. Une application au cas d'une ligne d'assemblage automobile a été réalisée dans ce cadre [Oueslati 15].

Dans cette section, un ensemble de méthode pour l'évaluation et la prise de décision ont été présentés. Plusieurs approches multicritères existent pour choisir parmi un ensemble de solutions. La solution retenue nécessite une validation pour justifier ce choix. La section suivante propose de dresser un état de l'art sur la modélisation des processus de fabrication en vue de supporter les revues d'études industrielles.

II.3 Modélisation des processus de fabrication / assemblage

Dans cette section, nous abordons plus globalement la modélisation et la gestion des processus de fabrication dans un système d'information dédié à l'ingénierie de production.

Les travaux de recherche et développement portant sur la gestion des données techniques liées à l'ingénierie de production n'ont pas été aussi nombreux que ceux liés au produit ; pourtant 80 % des volumes d'études nécessaires pour développer un véhicule portent sur les processus de fabrication. Environ 20 % seulement portent sur la définition et le comportement du produit [Rebiha 02]. De plus les retards sur les délais de développement sont principalement dus à des problèmes liés aux process. Il s'agit généralement de modifications et travaux plus importants que prévus qui retardent le

démarrage de production ou une montée en cadence non maîtrisée ne permettant pas d'atteindre rapidement les volumes demandés.

Plusieurs travaux récents ont porté sur la gestion des données techniques pour l'ingénierie de production. Dans le domaine automobile, un guide pour le déploiement de projets de systèmes d'information est proposé à partir d'un cadre de référence basé sur des diagrammes de spécifications standards [Yannou 05] [Rebiha 02].

	Ingénierie de produit	**Ingénierie de production**
Objet de conception	Eléments du produit : Pièce, liaisons, assemblés	Système : poste, processus, opérations
Concepteurs	Bureau des études BE : designers, architectes, géomètres	Bureau des méthodes : préparateurs, implanteurs, engageurs
Activités	Spécification du produit	Spécification du système d'assemblage
Diversités	Configuration du produit : Type de caisse, Direction de conduite	Configuration process : gammes d'assemblage, implantation
Maquette numérique	Produit et ses composants	Système de production (implantation, processus)
Technologie	PDM : Product Data Management	MPM : Manufacturing Process Management
Intégration outils	Outils de conception, calcul et simulation en BE CAO	Outils d'ingénierie de production IPAO
Standards	Configurations du produit	Classification des processus et des ressources d'une usine

Tableau II.5 – Eléments comparatifs de la conception du produit et du process

La logique de gestion de données techniques pour le système d'assemblage diffère de celle pour la gestion des données du produit en fonction de plusieurs critères : les objets de conception, les acteurs impliqués, les objets numériques utilisés, les technologies et les outils métiers (Tableau II.5).

Concernant l'objet de conception, nous nous intéressons aux informations concernant le processus d'assemblage, les postes de travail et les opérations qui y sont réalisées. Les concepteurs du système sont principalement les implanteurs, les préparateurs et les engageurs. Une configuration du système d'assemblage correspond à un concept d'implantation et d'organisation des moyens de production. La numérisation du système concerne l'implantation, les flux et les processus de fabrication. La technologie permettant de gérer ces processus de fabrication (MPM : Manufacturing Process Management) sont alimentés principalement par les données produit (PDM). Le tableau II.5 met en évidence la différence entre les éléments gérés pas ces systèmes dans le cadre de l'ingénierie de produit et de production.

Plusieurs concepts sont liés à la gestion des informations d'ingénierie de production. Dans les paragraphes suivants nous détaillons les concepts de gestion du cycle de vie, le concept d'usine numérique et les outils de définition des processus de fabrication et d'assemblage MPM.

II.3.1 Gestion du cycle de vie des produits (PLM)

Le PLM (Product Lifecycle Management) est une stratégie de gestion intégrée des informations liées à l'ensemble du cycle de vie d'un produit dans un contexte d'entreprise étendue.

L'organisme CIMDATA définit le PLM comme suit [CIMDATA 03] :

> "A strategic approach that applies a consistent set of business solution in support of the collaborative creation, management, dissemination, and use of product definition information accross the extended enterprise from concept to end of life, integrating people, processes, business systems, and information."

Dans le cas des systèmes d'assemblage, les informations à gérer pour leurs spécifications ne sont pas les mêmes que pour la spécification du produit. Le tableau II.6 présente une liste non exhaustive des principales entités manipulées pour la conception du produit et du système d'assemblage.

Produit	**Système d'assemblage**
Pièce	Poste
Liaisons	Opérations d'assemblage
Assemblé	Nœud d'assemblage
Nomenclature (BOM) II.3.1	Graphe d'assemblage (MBOM)
Fonction élémentaire	Séquence d'assemblage (BOP)
Produit	Ligne d'assemblage
Composants	Equipements (BOE)
Pièce générique	Moyens
Configuration	Outillages
Documentation produit	Documentation process

Tableau II.6 – Entités utilisées pour la conception du produit et du système de production

Gestion de configuration Plusieurs vues de la structure du produit et du système d'assemblage peuvent être représentées à différentes étapes du processus de développement. On s'intéresse principalement aux structures "as designed" qui correspondent à une vue du découpage du produit et "as planned" qui correspond à une vue de la structure du système d'assemblage. Plusieurs types de structures peuvent être rencontrés :

BOM (Bill of Material) décrit "ce qu'on doit fabriquer", c'est à dire la structure du produit (pièces et liaisons) suivant le découpage du produit.

MBOM (Manufacturing Bill of Material) décrit "ce qui est fabriqué" ou le graphe d'assemblage, c'est à dire une restructuration du produit par rapport au découpage du système d'assemblage. Les pièces achetées ne sont pas décrites dans cette structure.

BOP (Bill of Process) décrit "comment c'est fabriqué" en spécifiant la séquence des opérations pour réaliser un sous-ensemble, la consommation des pièces aux postes et les temps opératoires associés. C'est la structure du système d'assemblage.

BOE (Bill of Equipment) décrit "ce qui nous permet de fabriquer", c'est à dire l'ensemble des ressources (équipements, moyens, outillages) correspondant aux installations de l'usine de fabrication. La BOE représente la structure de l'usine.

La figure II.7 montre comment s'articulent ces différentes structures. L'activité d'ingénierie d'assemblage est représentée dans la partie encadrée en pointillés. Elle consiste à structurer le graphe d'assemblage (MBOM) afin de définir la séquence d'assemblage (BOP).

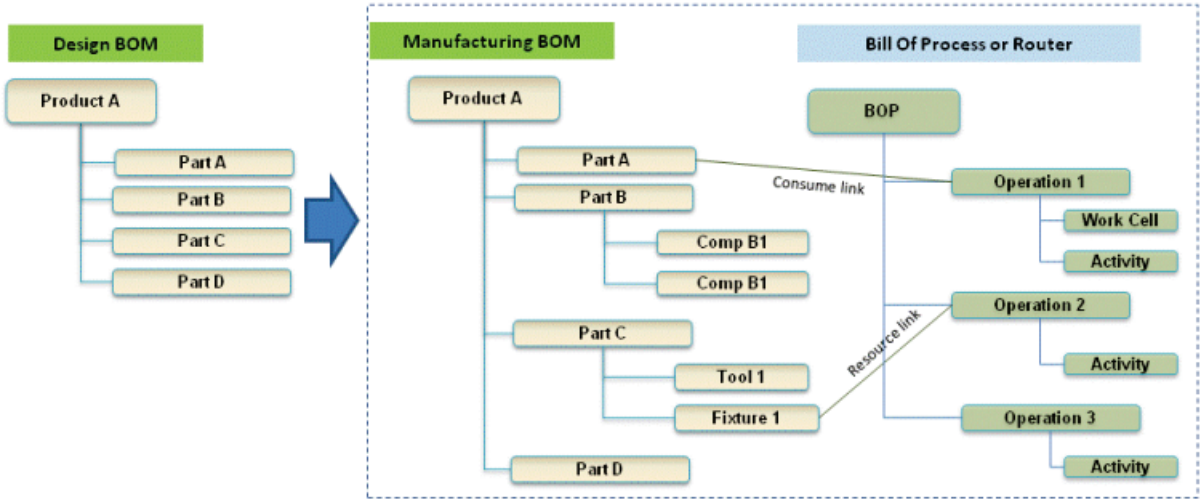


Figure II.7 – Structure du produit et du système d'assemblage

II.3.2 Le concept d'usine numérique

Depuis plus d'une dizaine d'années, les plus grands constructeurs industriels (aéronautique, automobile) ont exploré le concept d'usine numérique vu leur besoin d'améliorer constamment leurs méthodes et leurs outils de développement. Les technologies de l'information et de la communication permettent en effet d'améliorer les systèmes de production par une meilleure représentation de ses composants et donc une meilleure compréhension des modèles utilisés.

L'axe "Technologies de l'information et de la communication" de la commission scientifique de l'Union Européenne propose trois visions de l'usine du futur : l'usine intelligente, l'usine virtuelle et l'usine numérique. Le tableau II.7 présente une synthèse des objectifs, des moyens et des enjeux de la mise en place de ces technologies dans les usines.

Cette vision de l'usine du futur positionne l'usine numérique comme une démarche d'amélioration de la productivité de l'ingénierie par une meilleure visualisation du produit et des processus. Elle permet en effet de valider le processus de fabrication au numérique avant son intégration dans l'usine et le démarrage de la production. Les moyens permettant d'atteindre ces objectifs sont principalement un ensemble de méthodologies permettant d'utiliser de manière efficiente différents logiciels de gestion, de numérisation et d'analyse du produit et du système de production. Nous détaillons dans les paragraphes ci-dessous les objectifs, les définitions proposées et le positionnement de l'usine numérique.

	Usine intelligente	**Usine Virtuelle**	**Usine numérique**
Objectif	Plus d'automatisation, meilleure supervision et pilotage des installations	Gérer la chaîne logistique, créer de la valeur en intégrant les produits et les services	Visualiser le produit et les processus avant la production
Moyens	Logiciels, objets intelligents et connectés, infrastructure de l'usine	Logiciels permettant d'interconnecter et de gérer globalement les ressources de l'usine. Nouveau modèle économique	Logiciels de gestion, de numérisation, d'analyse des produits et des processus
Enjeux	Productivité de l'usine	Productivité de la chaîne logistique	Productivité de l'ingénierie
Gains	Moins de déchets et d'énergie Amélioration de l'efficience Reconfiguration rapide Meilleure qualité	Produits à forte valeur ajoutée Création d'emplois Transparence de la chaîne Empreinte écologique	Moins d'erreur de conception Produit de qualité Processus et procédés efficients Réduction des délais de R&D

Tableau II.7 – Vision usine du futur (Commission ICT de l'Union Européenne)

Pourquoi l'usine numérique ?

L'usine numérique est un sujet central de la planification des processus de fabrication car cette dernière nécessite un traitement intensif des informations relatives à l'usine. Elle permet une industrialisation virtuelle de nouveaux produits avec les mêmes données d'une

nusine. L'usine numérique est en effet une référence commune aux données techniques d'une usine, de ses ressources et de ses processus durant tout son cycle de vie. Les systèmes de gestion de cycle de vie (PLM) actuels se focalisent sur les informations du produit alors qu'il y a de plus en plus de besoin de gérer l'ensemble du cycle de vie de l'usine [Chen 12].

Actuellement, le concept d'usine numérique est encore une vision industrielle et scientifique. Les différents outils et méthodes sont encore à l'état de recherche et développement. Plusieurs aspects sont encore très peu couverts par les applications actuelles : par exemple, les modèles de références de planification d'usine, la gestion de configuration des processus de fabrication, etc.

Définitions

Plusieurs travaux ont proposé des définitions de l'usine numérique. Elle peut être définie comme un ensemble de méthodologies et d'outils logiciels visant à concevoir, simuler, mettre en œuvre et optimiser les systèmes de production de la phase de conception jusqu'au pilotage de l'usine [Kühn 06] [Bracht 05] [Chryssolouris 09] [Bosch-Mauchand 14].

A cette définition a été ajoutée la notion d'entreprise étendue, étant donné que l'entreprise travaille en collaboration avec plusieurs partenaires sur un même projet et est amenée à échanger des données [Hervé Bell] (président de la commission usine numérique de l'association Micado et responsable maîtrise d'ouvrage IPAO usine numérique pour l'ingénierie véhicule chez Renault).

Objectif :

L'objectif principal est de concevoir et simuler le système de production au plus tôt dans le cycle de vie du produit, sans attendre la validation finale du prototype. Pour ce faire, plusieurs axes de travail ont été étudiés :

— Numériser le système de production

— Rendre flexible la conception face aux incertitudes liées au produit

— Echanger des informations entre les acteurs du projet

Pour chacun de ces axes de travail, l'usine numérique vise à intégrer les différents processus suivants [Kühn 06] :

— la gestion de la maquette numérique produit

— la conception de l'implantation du système de production et son optimisation

— la planification du processus de fabrication ou assemblage

— le contrôle des opérations de fabrication et d'assemblage

Positionnement de l'usine numérique :

Dans un contexte d'entreprise étendue, l'usine numérique se positionne comme étant la définition des moyens (comment ?) entre la conception du produit (quoi ?) et la fabrication

du produit (combien et où ?). Elle est alimentée par la maquette numérique produit et est liée au PLM qui est le système d'information qui gère l'ensemble du cycle de vie du produit (fig II.8). L'usine numérique alimente les outils de gestion des ressources et des opérations de l'entreprise (ERP).

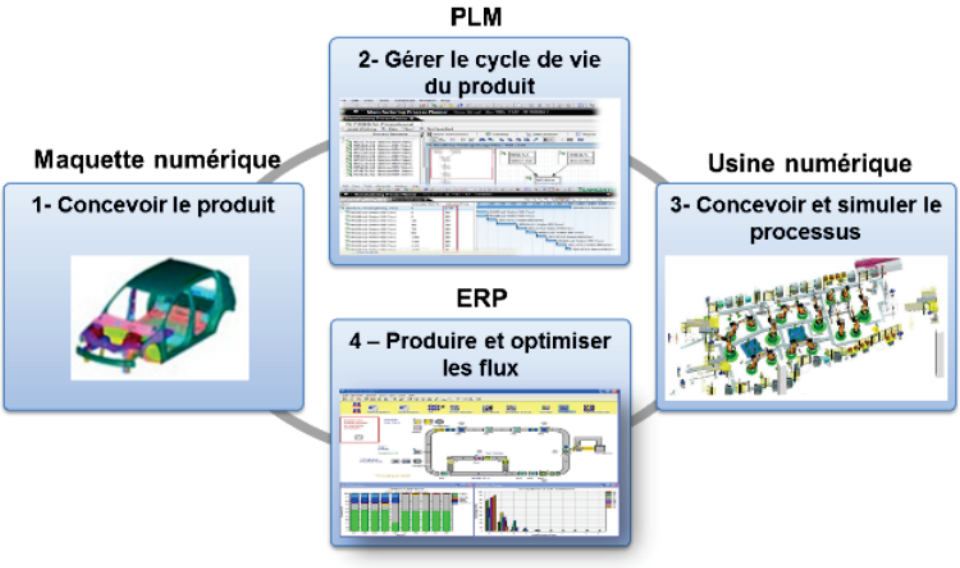


Figure II.8 – Positionnement de l'usine numérique

II.3.3 Gestion des processus de fabrication (MPM)

Pour l'ingénierie de production, le MPM (Manufacturing Process Management) est un outil permettant de lier la conception (quoi) et la production (comment). Il permet de gérer de manière simultanée la conception du produit et du système d'assemblage. Il s'agit d'un support permettant :

- d'explorer différents concepts de ligne de production
- d'analyser et de rendre les lignes plus efficientes
- d'estimer les ressources humaines et techniques nécessaires
- de générer la documentation correspondant à un scénario industriel
- et ainsi de réduire le délai de développement et mise sur le marché

Des systèmes PDM aux systèmes MPM Certaines fonctionnalités des systèmes MPM sont similaires à la gestion des données produits PDM. Le tableau suivant présente les principales fonctionnalités des deux outils.

Dans cette section, nous avons dressé un état de l'art de la gestion des informations pour l'ingénierie de production. Nous avons souligné l'importance de ces données pour la

Système PDM	Système MPM
Gestion de la structure produit	Gestion de la structure des opérations
Synchronisation de la nomenclature produit	Synchronisation produit-process
Gestion de la documentation produit	Gestion de la documentation process
Intégration CAO	Intégration CAO / MPM / ERP
Visualisation du produit	Visualisation du système industriel
Gestion des accès utilisateurs	
Gestion des workflows	
Gestion de la maturité	
Versionnement	
Check-in / Check-out	

Tableau II.8 – Comparatifs des fonctionnalités des systèmes PDM et MPM

prise de décision. Dans ce contexte, les choix de reconfiguration peuvent être modélisés dans les systèmes MPM pour deux objectifs différents. Le premier consiste à définir des hypothèses de production qui définissent des configurations possibles du système (gammes, implantations). Le deuxième objectif consiste à vérifier virtuellement l'impact des modifications liées aux choix de reconfiguration du système (Ex : intégration des moyens dans une usine existante) lors de revues de projet.

II.4 Bilan et positionnement

Nous avons identifié trois niveaux de problèmes ayant chacun une étendue de recherche différente :

1. Concevoir une ligne de production dans un bâtiment vide.
2. Choisir parmi plusieurs stratégies pour reconfigurer une ligne existante.
3. Concevoir une typologie de ligne qui soit facilement reconfigurable.

L'évaluation et le choix d'une alternative de solution est similaire à ces trois problèmes. Ce qui diffère, c'est la définition et l'exploration de l'espace de solutions. Dans le premier cas cet espace des solutions possibles est très grand. Dans le deuxième cas, l'espace est contraint par une configuration initiale A et une configuration cible B. C'est cette configuration cible qui définit les objectifs de performance à atteindre. Dans le dernier cas, le critère de reconfigurabilité est défini comme objectif de conception.

Dans ce chapitre nous avons recensé les différentes approches et méthodes permettant de modéliser et d'évaluer un système de production. Nous avons abordé les approches de reconfiguration d'une ligne de production. Plusieurs langages de modélisation de processus ont été analysés suivi des méthodes d'analyses multi critères.

Enfin les approches de gestion de l'information supportant les activités d'ingénierie de production ont été abordées en s'attardant sur le concept d'usine numérique.

Un tableau de synthèse de ces approches est proposé dans le tableau II.9, suivi des éléments de contributions que nous développerons dans les chapitres suivants.

II.4.1 Synthèse des approches, méthodes et outils existants

L'objectif de ce paragraphe est de faire une synthèse des approches identifiées dans ce chapitre. Certaines répondent totalement ou en partie à nos objectifs de recherche. Dans le tableau II.9, la première colonne reprends les problématiques auquels nous avons cherché des réponses dans la litterature. La deuxième et troisième colonne résument les différentes approches et leurs limites.

Problématiques soulevées	**Approches existantes**	**Limites**
Identifier les solutions de reconfiguration faisables qui satisfont les objectifs de performances	Modélisation des processus, Systèmes reconfigurables	Difficulté d'avoir une vision détaillée de l'impact des solutions sur le système existant
Evaluer au plus tôt l'impact des décisions sur les performances du système	Approches multicritère, analyse d'alternatives	Difficulté de retrouver les hypothèses de départ et les critères pertinentes pour la prise de décision
Valider le processus d'assemblage retenu	Modélisation et gestion des processus de fabrication MPM, usine numérique	Les revues numériques se font en fin de phase de développement et se focalisent sur la faisabilité des opérations alors qu'il est nécessaire partager et valider les solutions industrielles dans les phases amont du projet

Tableau II.9 – Apport et limites de l'état de l'art

II.4.2 Contributions

Ce travail vise à fournir une aide à la décision en avant-projet d'industrialisation en s'appuyant sur l'évaluation des processus de reconfiguration d'un système de production.

Plusieurs chemins permettent de passer d'une configuration initiale à une configuration souhaitée et satisfont les objectifs de performance (capacité, flexibilité). Différents processus de reconfiguration sont à évaluer afin de prendre cette décision (fig.

III.1). Les principaux critères sont le délai (temps de mise sur le marché) et les coûts (Investissements et choix techniques liés au produit et au processus de fabrication).

Ainsi, les principales contributions de cette thèse portent sur :

Contribution 1 Une analyse et une modélisation des processus de reconfiguration des systèmes de production [Feno 14].

Contribution 2 Une méthode d'évaluation des solutions de reconfiguration applicable dès les phases amont d'un projet [Feno 15a].

Contribution 3 Un processus de revue numérique d'atelier pour valider les solutions retenues à différents jalons du projet [Feno 15b].

Deuxième partie

Propositions pour l'analyse et l'évaluation des choix de reconfiguration d'une ligne de production

Chapitre III

Proposition d'une approche de reconfiguration progressive de lignes de production

"Si vous ne pouvez pas décrire ce que vous faites en tant que processus, vous ne savez pas ce que vous faites." (Edwards Deming)

Résumé

Ce chapitre présente une méthode de reconfiguration de système de production. Cette méthode se base sur une approche progressive qui propose aux décideurs dans un premier temps, les solutions qui minimisent l'impact des modifications du produit et des contraintes de production sur la configuration initiale d'une unité de production. Une analogie avec la méthode de réordonnancement réactif est présentée pour identifier les concepts de base du processus de reconfiguration. L'étude de ce processus permet d'analyser l'impact des solutions sur la configuration initiale d'une ligne de production.

Sommaire

III.1 Architecture et configuration de ligne de production 69

III.1.1 Architecture d'implantation de ligne 69

III.1.2 Configuration du processus d'assemblage 71

III.1.3 La reconfiguration à ces deux niveaux de décision 73

III.2 Analogie entre la reconfiguration et le réordonnancement . . 75

III.2.1 Principes de l'analogie 76
III.2.2 La méthode de réparation de planning 78
III.2.3 Transposition des concepts 82
III.3 Méthode de reconfiguration progressive de ligne de production 84
III.3.1 Eléments déclencheurs du processus de reconfiguration 85
III.3.2 Stratégie de reconfiguration 85
III.3.3 Opérations de reconfiguration 86
III.3.4 Les étapes de la méthode de reconfiguration 89
III.3.5 Métamodèle de la méthode de reconfiguration 90
III.4 Conclusions 91

Dans le chapitre précédent, plusieurs travaux concernant l'analyse, l'évaluation et la validation des choix de reconfiguration d'une ligne de production ont été présentés. Il a été souligné l'importance de réutiliser les moyens de production existants afin de minimiser les délais et les coûts des projets. Dans les types de travaux qui ont abordé ce problème, peu se sont intéressés à l'impact des modifications sur la configuration initiale d'une ligne de production.

L'objectif de ce chapitre est d'étudier le processus de reconfiguration d'une ligne de production. L'analyse de ce processus permet de :

— mettre en évidence l'impact des modifications sur la configuration initiale du système de production et de les minimiser si possible.

— voir comment réutiliser au mieux les moyens de production existants pour minimiser les délais de développement et les coûts du projet

Les deux solutions usuellement proposées pour réagir à l'introduction d'un nouveau produit consistent à :

— *Installer une unité de production standard.* L'avantage de ce type de solution réside dans le fait que ses performances sont déjà validées. Toutefois, son coût est généralement élevé à cause de sa flexibilité. Ce coût nécessite d'être justifié par des études de rentabilité.

— *Reconcevoir une unité de production.* Cette solution a pour avantage d'avoir des performances adaptées aux besoins spécifiques du projet. Cependant, elle nécessite des délais d'étude et d'intégration plus importants.

Dans les deux cas, il existe souvent des moyens de production et des infrastructures existantes qu'il faut prendre en compte (bâtiments, moyens logistiques...). La réutilisation de l'ensemble des moyens de production existants n'est pas toujours faisable à cause de leur incompatibilité avec les spécifications du nouveau produit, par exemple, lorsque les outillages existants ne permettent pas de maintenir en géométrie l'ensemble des pièces à assembler. Des modifications sont donc nécessaires afin de prendre en compte ces nouveaux besoins.

Les solutions de reconfiguration qui sont proposées dans ce chapitre sont des solutions intermédiaires entre réutiliser sans modifier le système existant et reconcevoir une nouvelle ligne. L'approche progressive propose d'étudier d'abord les solutions qui ont un minimum d'impact sur l'organisation initiale d'une unité de production puis celles qui nécessitent des modifications plus importantes.

La configuration initiale de la ligne de production existante est caractérisée par des performances économiques, techniques et humaines. La question qui se pose est :

comment passer de cette configuration initiale à une configuration souhaitée en respectant les objectifs de performance et en minimisant les coûts et les délais du projet (fig.III.1).

Les décisions de reconfiguration contribuent à atteindre des objectifs de performance que l'on peut également classer en objectifs de performance économique (rentabilité), de production (capacité, flexibilité) et humain (engagement des opérateurs).

Pour ce faire, le principe de la démarche proposée consiste à réutiliser au mieux les moyens de production existants. La méthode présentée dans ce chapitre vise à reconfigurer une ligne de production existante en minimisant l'impact des modifications sur les performances de celle-ci.

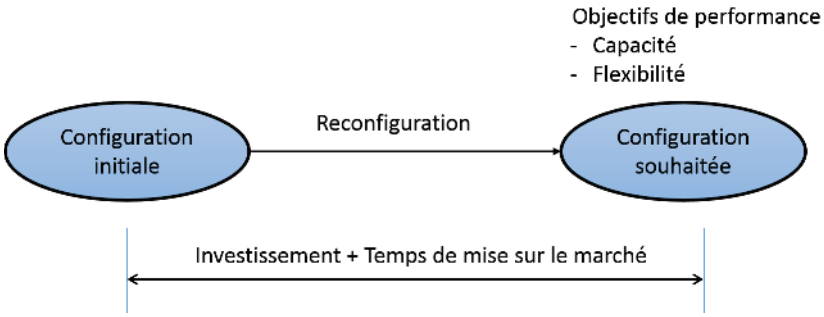


Figure III.1 – Passage d'une configuration initiale à une configuration souhaitée

Réutiliser tout ou partie des moyens de production existants (en anglais "Carry-over") permet de réduire les coûts d'investissement. Toutefois, l'assemblage du nouveau produit dans les moyens existants n'est pas toujours faisable. Dans ce cas, des modifications peuvent être apportées sur les ressources et les outillages pouvant aller jusqu'à une modification de l'architecture de la ligne.

La reconfiguration d'une unité de production peut être logique, physique ou organisationnelle. La *reconfiguration logique* concerne les modifications liées au système d'informations qui gère le mode de fonctionnement du système. Il peut s'agir d'une reprogrammation des robots et outillages automatisés ou bien de re-planification des flux de production. La *reconfiguration physique* concerne les systèmes techniques de chaque unité de production et la manutention entre ces unités de production. La *reconfiguration organisationnelle* concerne la réallocation des opérateurs ou des robots aux différents postes de travail. Dans la suite de ce chapitre, nous nous intéresserons principalement aux reconfigurations physiques et organisationnelles d'une ligne de production.

La première section de ce chapitre développe les niveaux de décisions concernant les choix de reconfiguration d'une ligne de production. Ces deux niveaux de décision concernent l'architecture d'implantation et la configuration du processus de fabrication. La deuxième section soulève le recours au principe d'analogie entre la reconfiguration et

l'ordonnancement pour en extraire les principes afin de proposer une approche de reconfiguration. La troisième section propose les concepts de base et les principes d'une méthode de reconfiguration progressive d'une unité de production.

III.1 Architecture et configuration de ligne de production

Au niveau d'une unité de production, une architecture de ligne de production peut se décliner en plusieurs configurations. Les décisions de reconfiguration concernent dans un premier temps les choix d'architecture d'implantation de la ligne puis les choix de configuration du processus d'assemblage (fig. III.2).

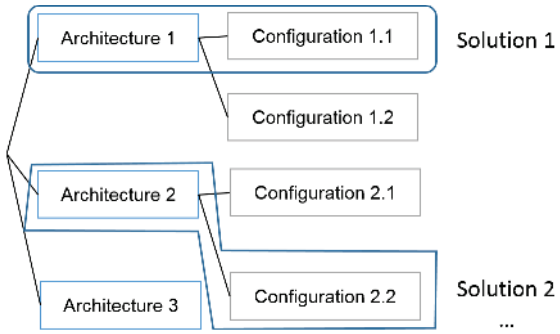


Figure III.2 – Architecture et de configuration de ligne de production

Plusieurs solutions industrielles peuvent être identifiées pour répondre à la demande d'introduire un nouveau produit. En fonction des évolutions à prendre en compte (modifications liées au produit ou aux contraintes de production), plusieurs architectures sont envisageables à partir d'une solution initiale. Chaque architecture peut se décliner en plusieurs configurations différentes. La solution d'un problème de reconfiguration est donc une configuration finale dans une architecture donnée en partant d'une configuration initiale. Dans les paragraphes suivants, nous définissons ce que sont une architecture et une configuration de ligne de production.

III.1.1 Architecture d'implantation de ligne

L'architecture d'implantation d'une ligne de production décrit le découpage logique et topologique de la ligne de production en plusieurs unités ou îlots de production. Ce découpage contient la description et le type de processus de chaque unité de production (Capacité, niveau de robotisation). L'architecture d'implantation permet de représenter les flux de production et les flux logistiques qui alimentent chaque unité de production.

L'architecture physique d'une unité de production est composée d'un ensemble de postes de travail reliés entre eux par un moyen de transfert. Des ressources sont affectées

à chaque poste de travail en fonction des tâches à réaliser. Une ressource de production peut être un opérateur, un robot ou un outillage quelconque. La figure III.3 présente un modèle SysML d'une architecture d'implantation sous forme de diagramme de bloc.

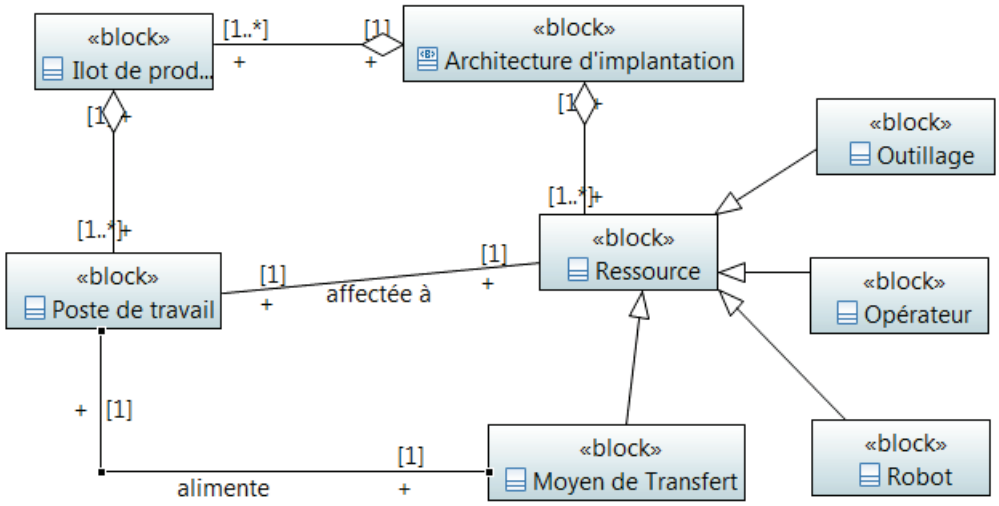


Figure III.3 – Diagramme de bloc SysML d'une architecture d'implantation

La figure B.5 montre plusieurs vues schématiques d'architectures d'unité d'assemblage du soubassement arrière d'un véhicule. Une architecture en 3 îlots installée dans l'usine 1, une autre avec une implantation différente dans l'usine 2 et deux processus standards en 2 îlots. Ces solutions diffèrent en termes de coûts, de délai de mise en œuvre et de performance technique. Une vue détaillée de ces architectures d'implantations est proposée en annexe B.3.

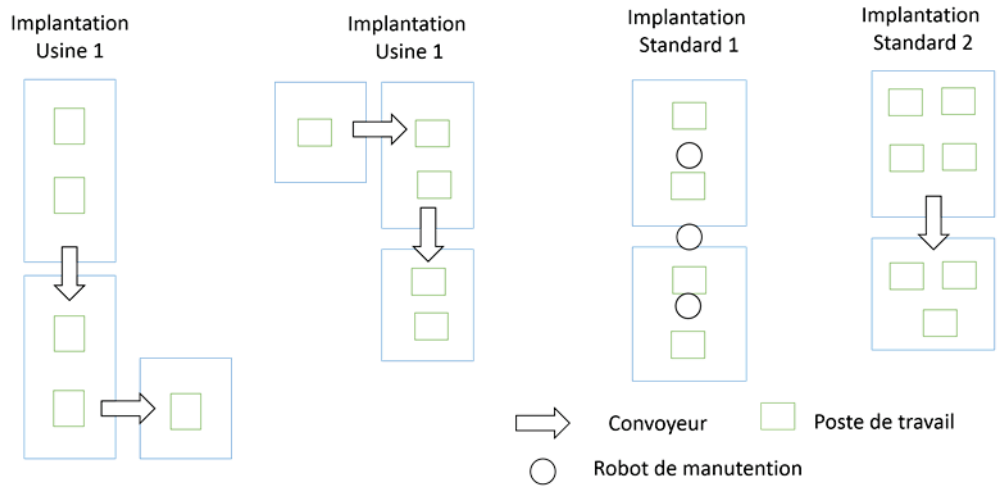


Figure III.4 – Architectures d'unité d'assemblage de planchers arrières de véhicule

Description des architectures d'implantation de la figure B.5 :

— Usine 1 : Architecture d'implantation en 3 îlots à 1 flux du processus d'assemblage

de l'unité arrière dans l'usine 1. Le transfert des pièces entre îlots se fait par des convoyeurs.

— Usine 2 : Architecture d'implantation en trois îlots à 1 flux du processus d'assemblage de l'unité arrière dans l'usine 2. Le transfert des pièces entre îlots se fait par des convoyeurs.

— Standard 1 : Architecture d'implantation standard en 2 îlots à 1 flux du processus d'assemblage de l'unité arrière. Le transfert des pièces se fait par des robots de manutention.

— Standard 2 : Architecture d'implantation standard en 2 îlots à 2 flux du processus d'assemblage de l'unité arrière. Le transfert des pièces se fait par des robots de manutention.

Chaque architecture peut se décliner en plusieurs configurations suivant le mode de fonctionnement demandé.

III.1.2 Configuration du processus d'assemblage

La configuration d'un système en général correspond à une organisation de ses éléments (postes de travail, ressources) permettant de répondre à un objectif de performance donnée. La configuration d'un processus d'assemblage décrit la gamme de fabrication et l'affectation des ressources aux postes de travail. Elle correspond à son implantation détaillée.

La configuration physique d'un processus d'assemblage, pour une architecture donnée, est composée de ressources de production affectées à des postes de travail. L'organisation de ces postes de travail constitue la séquence d'assemblage. Plusieurs fonctionnalités sont fournies par une configuration en fonction des types de ressources qui lui sont affectées. La figure III.5 présente un modèle SysML d'une configuration de processus d'assemblage sous forme de diagramme de bloc.

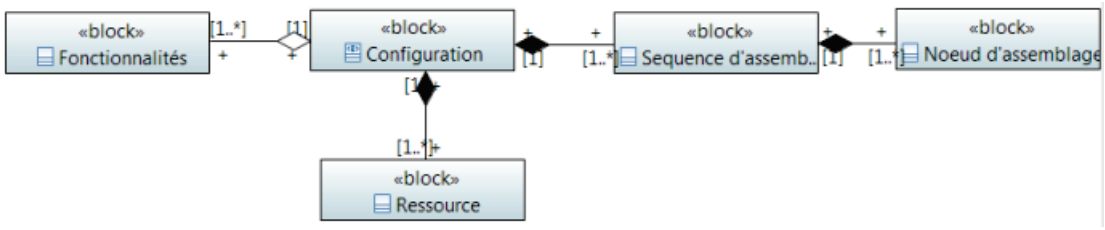


Figure III.5 – Diagramme de bloc SysML d'une configuration d'un processus d'assemblage

La figure III.6 présente plusieurs configurations d'un processus d'assemblage du plancher central d'un véhicule. Les trois configurations s'inscrivent dans la même

architecture d'implantation. La ligne d'assemblage est composée de trois postes de travail P1, P2 et P3. L'affectation de ressources à chaque poste peut être modulée en fonction du volume de production demandé.

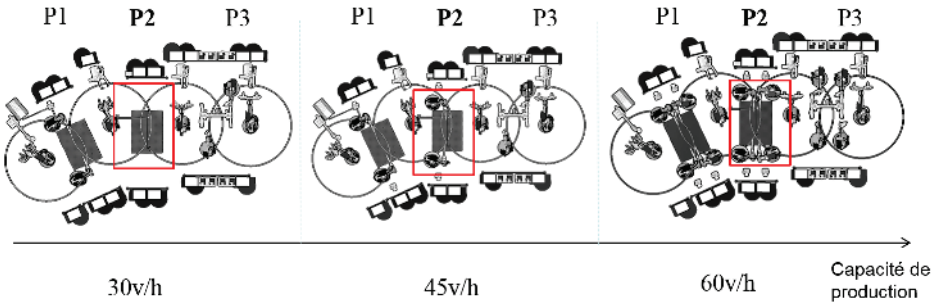


Figure III.6 – Configurations d'une ligne d'assemblage de plancher central

Sur l'image de gauche, la ligne est dimensionnée pour produire à 30v/h, le poste de travail P2 est un poste libre, c'est à dire qu'aucune opération n'y est réalisée. Sur l'image du milieu, la ligne est dimensionnée pour produire 45v/h. Deux robots de soudure sont affectés au poste de travail P2 pour y réaliser des opérations d'assemblage qui ne sont pas réalisables dans le temps de cycle théorique du poste. Sur l'image de droite, la ligne est dimensionnée pour produire 60v/h, quatre robots sont nécessaires pour effectuer l'ensemble des opérations à réaliser dans le temps de cycle.

La figure III.7 présente une vue schématique de configurations de la ligne d'assemblage de plancher central (CTL) d'un véhicule en fonction de la capacité à installer. L'augmentation de la capacité se fait en modulant le nombre de postes de travail et en affectant des opérations à un poste spécifique. Pour le passage d'une cadence de 15 à 20 ou 30 v/h, les opérations du poste de géométrie qui ne sont pas réalisables dans le temps de cycle sont transférées au poste de finition.

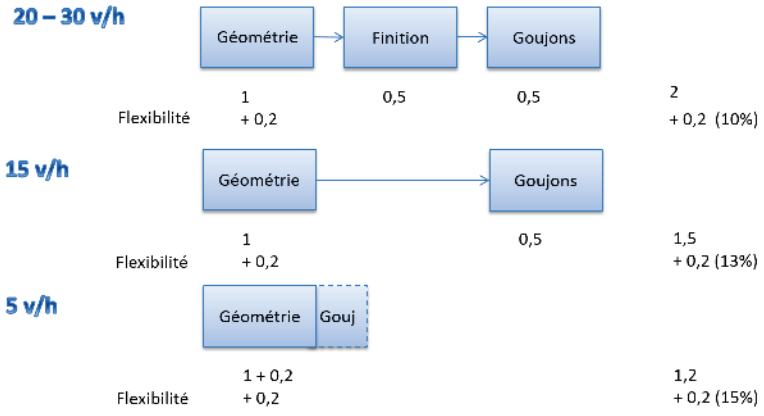


Figure III.7 – Schéma de configurations de ligne d'assemblage de plancher central

III.1.3 La reconfiguration à ces deux niveaux de décision

Nous considérons que la reconfiguration consiste à mettre en œuvre un ensemble de modifications des moyens de production dans un coût et un délai répondant aux objectifs de performances. Au niveau d'une configuration de ligne, les moyens et l'affectation des ressources aux postes de travail sont modifiés, la séquence d'assemblage ne change pas. Au niveau d'une architecture d'implantation, la structure de la ligne et donc de la séquence d'assemblage est modifiée.

Le processus de reconfiguration comprend la phase de planification du nouveau produit et la mise en œuvre du processus de reconfiguration qui consiste à intégrer les nouveaux moyens de production dans l'usine (fig III.8).

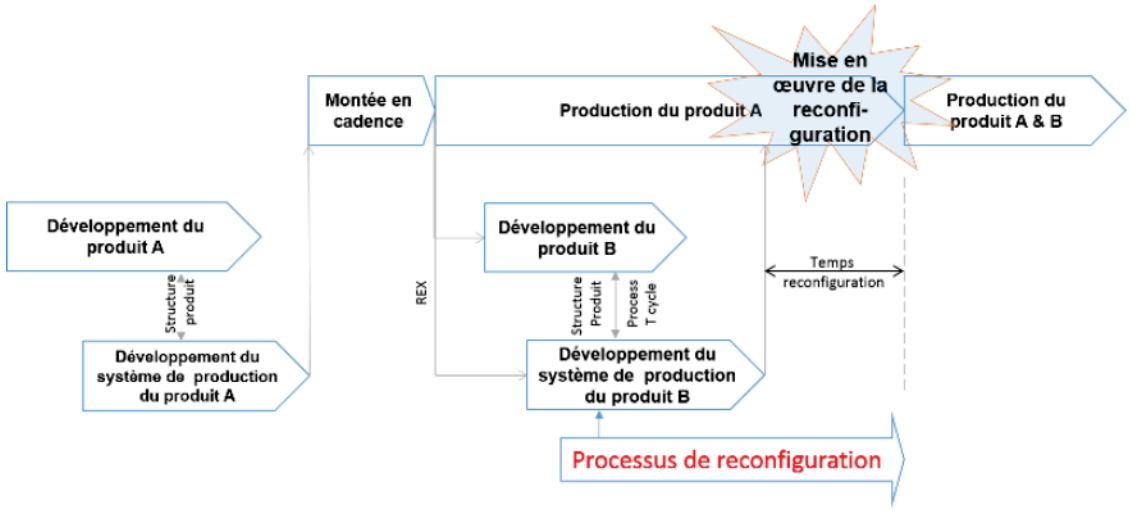


Figure III.8 – Phase de reconfiguration dans le cycle de vie du système de production

Plusieurs produits sont fabriqués successivement dans le cycle de vie d'une ligne de production (ex : A et B). A chaque développement d'un nouveau produit (ex : B), une planification de sa production est effectuée simultanément. Un processus de reconfiguration est nécessaire entre chaque introduction de nouveau produit. Ce processus de reconfiguration est composé d'une étape d'intégration, d'une étape de validation des moyens de production et d'une étape de montée en cadence.

La planification des processus de fabrication (choix de gamme d'assemblage) aboutit à une architecture d'implantation. La reconfiguration de la ligne aboutit à une affectation des ressources pour réaliser les activités de production aux postes de travail.

Données d'entrée et de sortie du processus de reconfiguration

Pour un ensemble de paramètres d'entrées et d'objectifs de performances, le processus de reconfiguration doit permettre d'identifier et d'analyser différentes solutions d'architectures d'implantation, de configurations de lignes et des performances associées. Des contraintes liées au projet et au système de production existant sont à prendre en

compte. Des règles de sélection permettent de choisir parmi l'ensemble des solutions possibles III.9.

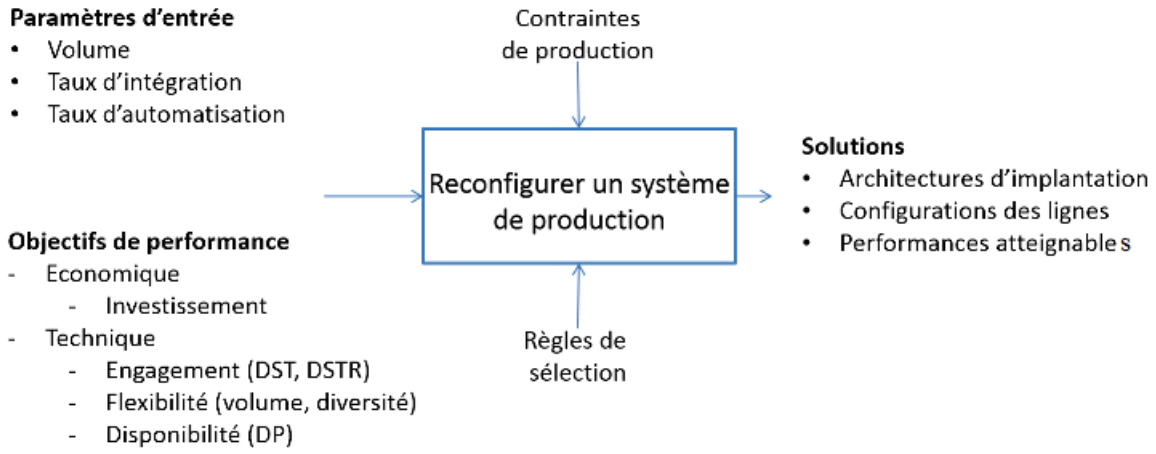


Figure III.9 – Données d'entrée et de sortie du processus de reconfiguration

Les éléments déclencheurs du processus de reconfiguration peuvent être : l'introduction d'un nouveau produit, l'évolution des spécifications d'un produit existant, la définition de nouveaux objectifs de production ou des aléas de production. La première décision à prendre consiste à choisir entre garder la même configuration ou rechercher une nouvelle configuration. Cette décision peut dépendre d'orientations stratégiques dues à différents facteurs, tels que la recherche d'une nouvelle configuration pour des raisons d'obsolescence des moyens de production existants ou la réutilisation au maximum des moyens existants. La figure III.10 décrit ce processus de reconfiguration.

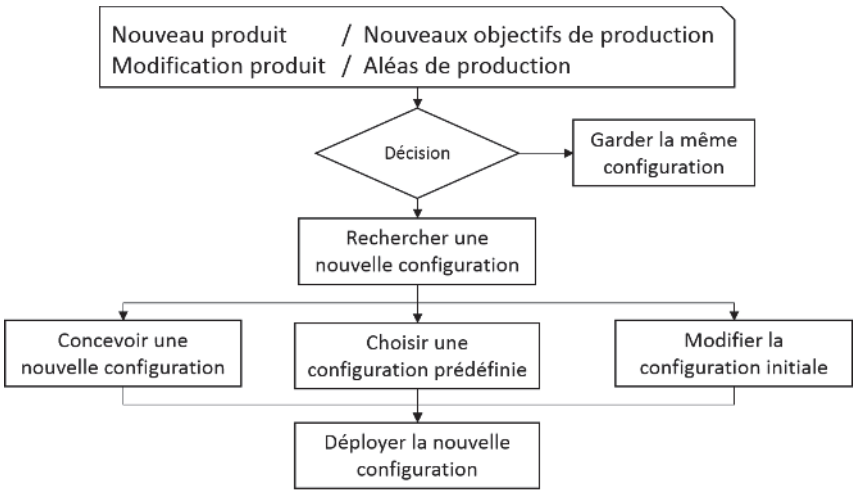


Figure III.10 – Processus de reconfiguration

En ce qui concerne la recherche d'une nouvelle configuration, il est possible de modifier la configuration initiale, choisir une configuration prédéfinie dans les bases de processus standards ou concevoir une nouvelle configuration. Dans ce chapitre nous définissons les

mécanismes mis en œuvre pour modifier la configuration initiale. Nous aborderons dans le chapitre VI le déploiement de la nouvelle configuration dans le cadre du cas industriel de ce travail.

La définition d'une architecture d'implantation introduit une notion d'occupation d'espace. Le processus de reconfiguration de ligne introduit une notion d'utilisation de ressources.

La reconfiguration nécessite de modifier la structure d'une "unité de production" caractérisée par une surface d'implantation S et une capacité C. Une unité de production est alimentée par un ou plusieurs points de chargement et un point d'évacuation.

Après avoir défini les niveaux de décision ainsi que l'objectif de minimiser l'impact des modifications sur la configuration d'une ligne de production, nous présentons dans la section suivante une analogie avec le domaine du réordonnancement en vue de pouvoir réutiliser des concepts et principes de solutions existantes.

III.2 Analogie entre la reconfiguration et le réordonnancement

En ordonnancement, plusieurs tâches sont affectées à des acteurs (machines ou ressources) en fonction du temps. L'ordonnancement initial peut être perturbé par des évènements internes ou externes au système. L'apparition de ces perturbations dans le déroulement des activités nécessite de revoir l'ordonnancement initial.

L'introduction d'un nouveau produit dans une ligne existante nécessite de reconfigurer le système de production puisqu'elle s'accompagne d'une évolution des spécifications du produit et des contraintes de production. Ce nouveau produit peut donc être considéré comme un élément perturbateur pour le système existant. Comme indiqué en introduction de ce chapitre, les solutions usuelles pour faire face à ces nouvelles demandes consistent à reconcevoir entièrement une nouvelle unité de production ou installer une unité de production standardisée.

En ordonnancement, les solutions usuellement proposées consistent à recalculer un nouvel ordonnancement ou mettre en place des ordonnancements préétablis pour des situations prévues à l'avance. Les limites de ces approches se posent au niveau du coût et des délais d'obtention des solutions. D'autres méthodes ont été mises au point, dans le but de minimiser l'impact des perturbations sur un ordonnancement existant. Ces méthodes consistent à réparer un ordonnancement initial et non à recalculer un nouvel ordonnancement. Une approche générique a été proposée pour les problèmes de planification de chaîne logistique [Cauvin 11], de planification de projet de construction

[Ferrarini 09] et de réordonnancement d'atelier [Tranvouez 01].

Dans cette optique, la reconfiguration d'une ligne de production peut être vue comme une réparation d'une configuration initiale dans la mesure où l'on souhaite minimiser l'impact des modifications liées à l'introduction d'un nouveau produit sur la performance de celle-ci. Cela permet de répondre à l'objectif de réutiliser au mieux les moyens de production existants.

Afin d'atteindre cet objectif, nous proposons une méthode permettant de reconfigurer une ligne de production existante en minimisant l'impact des modifications sur les performances de celle-ci. Pour ce faire, nous détaillons les principes de cette analogie afin d'en tirer les concepts nécessaires à la résolution du problème de reconfiguration.

III.2.1 Principes de l'analogie

L'analogie est une méthode de raisonnement qui permet de faire une abstraction du domaine auquel on s'intéresse et de rechercher des principes de solution existant dans d'autres domaines. La méthode d'innovation TRIZ (Théorie des principes de solution inventive) se base sur le principe d'analogie pour résoudre des problèmes d'ingénierie. Cette méthode affirme d'une part que les systèmes techniques évoluent vers une solution idéale par résolution de contradictions, plus souvent en minimisant l'introduction de ressources. D'autre part, la majorité des innovations sont des transpositions de solutions connues dans d'autres domaines. La même approche a été appliquée pour la conception préliminaire de système de production dans le cadre des lignes d'usinage [Geiskopf 04] (§ II.1.3.2). Nous souhaitons appliquer ces principes dans le cadre de cette thèse pour aborder le problème de reconfiguration de ligne de production.

Deux types d'analogie sont définis dans le cadre de la résolution de problème : *l'analogie-heuristique* et *l'analogie-recours* [Cerezuela 96].
Dans l'analogie heuristique, des raisonnements rigoureux pour résoudre le problème existent mais ils s'avèrent fastidieux à mettre en œuvre. L'analogie constitue alors une heuristique qui accélère ou simplifie le calcul de résolution.
L'analogie-recours est utilisée lorsqu'il n'existe pas de méthodes formelles de résolution. Dans ce cas, un raisonnement analogique constitue une alternative pour résoudre le problème.

Notre approche se situe dans le cadre d'une analogie recours pour proposer aux décideurs une stratégie de reconfiguration d'une unité de production.

Le principe de l'analogie fait intervenir deux univers (fig. III.11). Des relations de dépendance (beta) sont établies entre les composants d'un même univers, et des relations de correspondance (alpha) entre les univers sont mises en évidence.

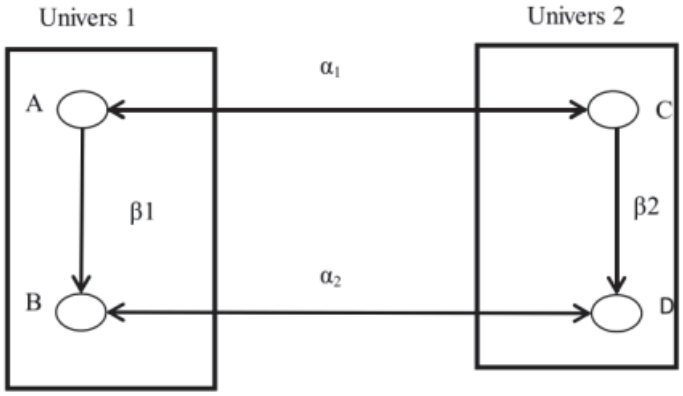


Figure III.11 – Principes de l'analogie

La notion de "point de vue" intervient comme "un filtre sur les domaines, qui facilite le choix des relations de dépendance et de correspondance", afin de pouvoir résoudre un problème particulier. Cette abstraction permet d'identifier les concepts qui sont indépendants des deux domaines d'étude.

Exemple Une analogie entre l'ordonnancement et le problème d'aménagement-placement peut être pris comme exemple [Cerezuela 96]. Cette analogie met en évidence des similitudes entre ces deux domaines, l'un d'un point de vue temporel et l'autre d'un point de vue spatial. Dans l'exemple ci-dessous (Tab.III.1), l'ordonnancement d'une tâche composée de plusieurs opérations sur une machine est assimilé au placement d'un câble composé de plusieurs segments dans un espace de cheminement.

Ordonnancement	**Placement de câble**
Tâche Date limite D Capacité C	**Câble** Longueur limite L Section S
Opération Durée d Date de début et de fin Ti, Tf $\sum d = D$	**Segment de câble** Longueur l Point de départ et d'arrivée X1, X2 $\sum l = L$
Machine Capacité limite $\sum C \leq Caplim$	**Espace de cheminement** Section limite $\sum S \leq Sectionlimite$

Tableau III.1 – Analogie entre l'ordonnancement et le placement de câble [Cerezuela 96]

Les attributs temporels d'une tâche dans le problème d'ordonnancement sont la date limite D et la capacité C. La date limite D correspond à la date avant laquelle la tâche doit être réalisée. La capacité C correspond au temps nécessaire pour réaliser la tâche.

Une opération est caractérisée par une durée de réalisation, une date de début Ti et une date de fin Tf. La machine possède une capacité limite *Caplim* qui ne peut pas être dépassée.

Les attributs spatiaux d'un câble dans le problème de placement de câble sont la longueur limite L et la section S. La longueur limite correspond à la longueur maximale que l'on peut allouer au câble. La section S est la section nécessaire pour installer le câble dans l'espace de cheminement.
Un segment de câble est caractérisé par un point de départ X1 et un point d'arrivée X2. L'espace de cheminement possède une section limite *Sectionlimite* qui ne doit pas être dépassée.

Des concepts communs ont été identifiés entre le problème de reconfiguration et de réordonnancement. Le principe de l'analogie a été utilisé pour mettre en évidence ces concepts. La section suivante décrit la méthode de réparation de planning sur laquelle il est possible de se baser pour identifier les solutions.

III.2.2 La méthode de réparation de planning

Afin d'approfondir l'analogie entre un problème de reconfiguration et de réordonnancement, cette section présente les principes et les objectifs de la méthode de réparation de planning, l'aspect dynamique et les concepts de base de la méthode.

III.2.2.1 Principe et objectifs

La méthode de réparation de planning se base sur le principe de résolution coopérative et distribuée de problème. Elle a été appliquée dans le cas du réordonnancement d'atelier [Tranvouez 01], à un projet de construction [Ferrarini 09], puis étendue au cas de la chaine logistique [Cauvin 11]. Elle est basée sur le développement de solutions par les acteurs eux-mêmes pour limiter l'impact de la perturbation tout en assurant l'atteinte des objectifs. Au lieu de recalculer une nouvelle solution, l'idée consiste à réparer la situation perturbée.

Afin d'atteindre cet objectif, plusieurs stratégies permettant de minimiser l'impact de ces perturbations peuvent être mises en œuvre. Une de ces stratégies consiste à implémenter d'abord des opérations de réparation locale puis collaborative. On parle de modification locale, dans le sens où c'est l'acteur concerné par la perturbation qui gère tout seul le problème avant de proposer d'impliquer d'autres acteurs dans la recherche de solution. Les opérations de réparation consistent principalement à décaler dans le temps les tâches ou à les permuter entre acteurs. D'autres types d'opérations existent en fonction du domaine d'application. L'analyse de ces opérations permet d'évaluer la solution finale afin de proposer aux décideurs de les déployer ou non, en connaissance de

cause de leurs impacts sur le système.

Le principe de la méthode de réparation de planning consiste donc à "réparer" un planning existant suite à une perturbation au lieu de recalculer un nouveau planning. Pour cela, les "opérations" de réparation sont effectuées sur les "tâches". Il peut s'agir de déplacement, transfert, décomposition, échange de tâches. Une "stratégie" correspond à l'application d'un ensemble d'opérations. Son évaluation permet d'analyser l'impact d'une perturbation.

L'objectif de la méthode de réparation de planning est donc globalement de minimiser l'impact des perturbations :

— sur le planning initial d'une organisation

— sur les ressources humaines et matérielles en modifiant le moins possible leur organisation et leur planning.

III.2.2.2 Dynamique de la stratégie de réparation de planning

Cette stratégie est organisée en une séquence de 6 étapes. Chaque étape mesure l'importance de l'impact de la perturbation (c'est à dire si elle concerne une, deux ou plusieurs machines, et la façon dont ces machines sont impactées). Quand elle ne peut pas être traitée à l'étape n, la perturbation est transférée à l'étape n+1 (III.12).

Cette séquence commence par une machine impactée par la perturbation, en essayant de modifier localement son ordonnancement (Etape 1 - flèche 1 sur la figure III.12). Cela se fait par rapport aux contraintes des autres machines. En cas d'échec sur le traitement de la perturbation, l'étape 2 consiste à engager une coopération unilatérale (par exemple par transfert de tâches d'une machine à l'autre - flèche 2a) ou la coopération bilatérale (échanges de tâches entre deux machines - flèche 2b). Face à une perturbation forte, l'étape 3 consiste à étendre le processus de coopération à toutes les machines de l'atelier (flèche 3).

Si rien ne peut être fait à ce stade, la perturbation passe du niveau 1 (le niveau de la machine) au niveau 2 (le niveau de l'atelier) comme indiqué par la flèche 4a. Cela souligne que l'impact de la perturbation concerne désormais l'ensemble de l'atelier. Les étapes 4 à 6 sont utilisées lorsque la perturbation est trop importante et nécessite un réordonnancement. Cela se fait d'abord par le coordinateur de l'atelier sur les machines sous sa responsabilité (flèche 4b). Si cela échoue, la coopération avec d'autres ateliers est engagée avec des mécanismes similaires à ceux de l'étape 2 et 3 (étape 5).

Enfin, le coordinateur de l'atelier transmet des informations sur la perturbation au directeur de production (niveau 3) afin d'assouplir certaines contraintes (étape 6).

Ces 6 étapes visent à lutter contre les effets des perturbations avec des actions qui

augmentent progressivement en complexité. D'abord une machine puis deux sont concernées pour finalement étendre l'impact de la perturbation à l'ensemble de l'atelier ou de l'installation de production.

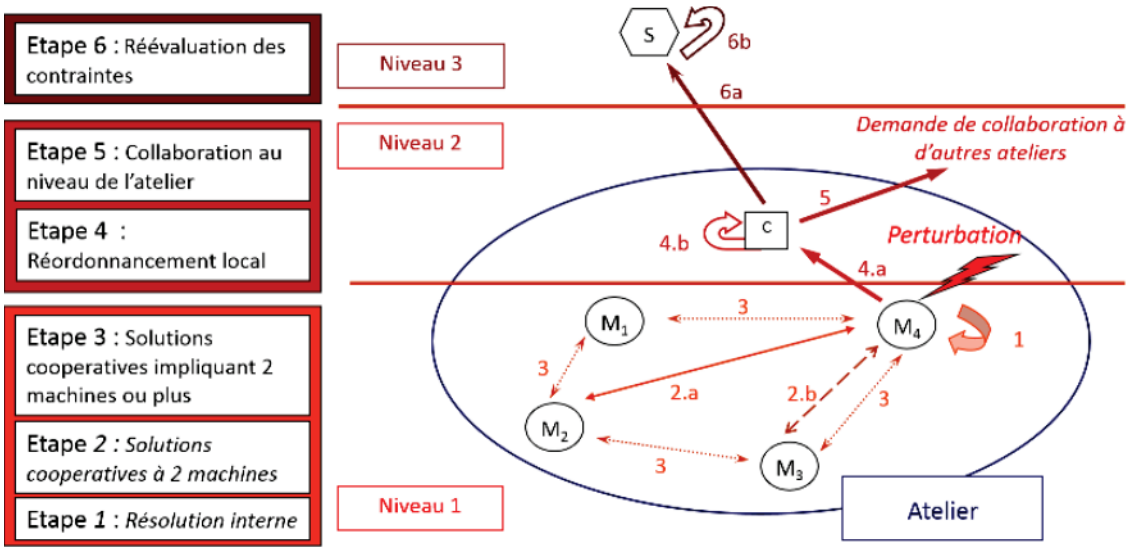


Figure III.12 – Dynamique d'une stratégie de réparation d'ordonnancement

III.2.2.3 Concepts de base et modèles de la méthode de réparation

Les concepts de base de la méthode sont la "tâche" et la "perturbation". Les tâches sont les éléments qui sont perturbés et qui nécessitent des opérations de réparation. Dans ce paragraphe nous détaillons les attributs de ces deux concepts.

Tâche

- Attributs temporels
  - Durée
  - Intervalle de réalisation
  - Date de début / date de fin
  - Marges temporelles (dates au plus tôt / au plus tard)
  - Contraintes de précédence
- Attributs physiques
  - Ressources : outillage, équipements, consommables, matériaux
  - Acteurs : compétences, nombre
- Attributs structurels : quantité produite, interruptible (O/N)

Perturbation

— Internes
  — Acteurs : absence, compétence ...
  — Ressources : défaillance, manque...
— Externes
  — Règlementations
  — Environnement
  — Climat

Les principales opérations sont listées ci-dessous. Elles sont reprises dans le métamodèle de la méthode de réparation de planning (figure III.13).

— Opérations locales
  — **Décalage** (à droite ou à gauche) : avancer ou retarder une tâche sans modifier sa position dans la séquence de tâches. Les dates de début et de fin sont modifiées dans la limite des marges temporelles.
  — **Déplacement** (à droite à ou à gauche) : avancer ou retarder l'ordre de réalisation d'une tâche dans la séquence de tâches. Les dates de début et de fin sont modifiées au-delà des marges temporelles.
  — **Permutation** : Permuter la position d'une tâche avec une autre dans l'axe temporel.
  — **Décomposition** : Découper une tâche en deux ou plusieurs sous-tâches.
  — **Echange** (de ressource entre tâches) : Echanger des ressources nécessaires à la réalisation d'une tâche.
— Opérations collaboratives
  — **Transfert** : Transférer une tâche à un autre acteur.
  — **Permutation parallèle** : Permuter de manière simultanée la position de plusieurs tâches à réaliser par plusieurs acteurs.
  — **Echange collaboratif** : Echanger des ressources nécessaires à la réalisation d'une tâche entre plusieurs acteurs.

Une opération de réparation peut donc concerner le temps, les acteurs ou les ressources associés aux tâches concernées par la perturbation.

— Le temps : déplacement, permutation, décomposition
— Les acteurs : transfert, échange
— Les ressources : opérations locales / collaboratives

Le métamodèle de la fig. III.13 reprend les concepts présentés ci-dessus qui constituent la méthode de réparation de planning. On y retrouve la notion de stratégie,

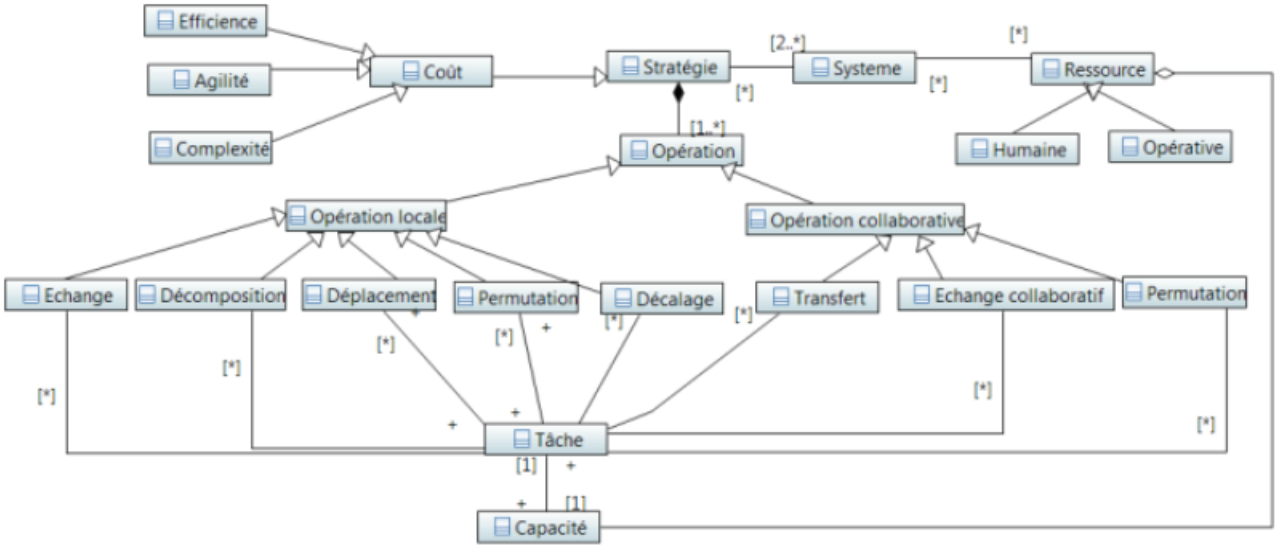


Figure III.13 – Métamodèle de la méthode de réparation de planning

d'opérations locales ou collaboratives et les éléments sur lesquels agissent ces opérations (tâches, ressources).

L'élément central de ce métamodèle est le concept de "tâche". Plusieurs opérations locales ou collaboratives sont appliquées à une tâche (temps, ressources, acteurs). Une "stratégie" de réparation comprend plusieurs opérations. Cette stratégie a un coût et permet d'évaluer la solution en termes d'agilité (capacité à gérer les marges de manœuvres), d'efficience (capacité à absorber la perturbation) et de complexité (nombre d'acteurs impliqués par la perturbation).

III.2.3 Transposition des concepts

Dans un problème de réordonnancement, la position d'une tâche dans le temps (date de début et de fin), la structure d'une tâche et l'affectation de la tâche à un acteur peuvent être modifiées. On définit les attributs des concepts de tâche, d'opération et de machine pour le domaine du réordonnancement.

— Tâche

  Date de début

  Date de fin

  Quantité de travail

  Durée d

— Opération

  Nombre d'opération

— Machine

Capacité limite

Nous avons vu dans la section précédente que la méthode de réparation de planning propose des opérations permettant de mettre en œuvre ces modifications.

Dans un problème de reconfiguration, l'implantation, la structure et l'affectation des ressources à une unité de production peuvent être modifiées.

L'analogie conduit à étudier le passage d'une notion temporelle, intrinsèque au concept de planning, à une notion d'espace et d'occupation de ressources (flux, implantation,...), intrinsèque au concept de reconfiguration. Cette analogie implique, par conséquent, la redéfinition des concepts d'un domaine à l'autre.

Le tableau III.2 présente la description et la mise en commun des concepts des deux domaines du réordonnancement et de la reconfiguration de ligne de production

Réordonnancement	**Reconfiguration**
Tâche	**Unité de production**
Date de début Ti	Poste de chargement Ch
Date de fin Tf	Poste d'évacuation Ev
Quantité de travail Q	Capacité de production C
Durée d	Surface s
Opération	**Poste de travail**
Nombre d'opérations	Nombre de postes
Machine	**Bâtiment**
Capacité limite	Surface disponible
$\sum d \leq Caplim$	$\sum s \leq Surfdispo$

Tableau III.2 – Analogie entre le réordonnancement et la reconfiguration

En référence aux principes de l'analogie (fig. III.11), on distingue dans le tableau III.2, les relations de dépendance entre les éléments d'une même colonne et les éléments de correspondance entre les éléments d'une même ligne.

On peut identifier plusieurs concepts communs aux deux domaines puis s'inspirer des principes d'analyse et d'évaluation des solutions tels que l'identification des contraintes (temporelles, spatiales, ressources ...) ou le mode d'exploration des solutions (minimisation de l'impact sur la configuration initiale).

Les attributs caractérisant une unité de production sont listés ci-dessous. On distingue les attributs spatiaux, relatifs à l'implantation et les attributs physiques, relatifs aux activités de production.

Unité de production

— Attributs spatiaux

  - Surface d'implantation
  - Points de chargement : Il s'agit de la position des postes de chargement des pièces dans l'unité de production.
  - Points d'évacuation : Il s'agit de la position des postes d'évacuation des pièces
- Attributs physiques
  - Capacité de production : nombre de pièces produites par unité de temps (P/h)
  - Nombre de postes de travail
  - Quantité de ressources affectées : Nombre de robots ou d'opérateurs
  - Niveau de robotisation : pourcentage d'opérations d'assemblage réalisées par des robots.
  - Niveau d'intégration : pourcentage d'opérations d'assemblage réalisées en interne

III.3 Méthode de reconfiguration progressive de ligne de production

La méthode de reconfiguration progressive de ligne de production s'applique à l'analyse des "unités de production" qui réalisent un certain nombre d'activités de production. Des modifications peuvent être réalisées sur la structure de ces unités de production suite aux changements de spécifications du produit et des contraintes de production. Ces modifications peuvent s'appliquer à une unité de production, un îlot de production, un poste de travail ou un moyen de production.

Au sein d'une unité de production, la reconfiguration peut concerner :

- L'ajout ou la suppression de postes de travail.
- La modification des affectations des tâches aux opérations.
- L'affectation de nouvelles tâches aux ressources (robots ou opérateurs).
- Le déploiement de nouveaux programmes pour les automates.
- La modification des circuits des flux d'approvisionnements.

Les principaux concepts utilisés lors de cette démarche sont : les éléments déclencheurs, les stratégies et les opérations de reconfiguration [Feno 14] [Moukkar 15]. Nous explicitons d'abord ces concepts avant de détailler leur contribution à la méthode de reconfiguration.

1. **Un élément déclencheur** correspond à un élément déclencheur du processus.
2. **Une stratégie de reconfiguration** correspond à l'orientation du projet concernant une manière de faire évoluer le système. Il s'agit d'un ensemble de modifications

apportées à l'architecture et / ou à la configuration d'un système d'assemblage dans le but d'atteindre un objectif (ex : permettre de fabriquer une diversité de pièce à une cadence donnée).

3. **Une opération de reconfiguration** correspond à une modification élémentaire à apporter au système de production pour fabriquer le nouveau produit.

III.3.1 Eléments déclencheurs du processus de reconfiguration

L'introduction d'un nouveau produit dans une usine existante s'accompagne souvent de modifications des spécifications du produit et de modifications des contraintes de production.

— Modifications liées au produit. Il s'agit généralement d'introduction d'une variante ou de modification des spécifications d'un produit en cours de production (Ex : phase 2 d'un véhicule, nouveau capot ou pavillon en aluminium).

— Modifications des contraintes de production : le changement de la demande du marché implique une modification du volume de production demandée et éventuellement du "mix" produit (pourcentage à produire pour chaque produit).

III.3.2 Stratégie de reconfiguration

Une stratégie de reconfiguration consiste en une séquence d'opérations de reconfigurations. Cette stratégie est organisée en plusieurs étapes à deux niveaux d'analyse (fig. III.14). Le niveau d'une unité de production et le niveau système de production.

Une résolution locale consiste à limiter les modifications à l'unité de production concernée. Cela se fait par plusieurs étapes de vérifications en commençant par l'étude de faisabilité d'une réutilisation sans modification de l'unité de production concernée. En cas de non faisabilité, un ensemble de modifications de la configuration initiale est étudiée. Les opérations de reconfiguration sont étudiées en commençant par les modifications organisationnelles, puis capacitaires et enfin d'implantation. Si les solutions ne sont pas satisfaisantes, c'est à dire, aussi coûteuses et moins efficaces qu'une configuration standard, on choisit une configuration prédéfinie. Dans le cas où il n'existe pas de configuration prédéfinie qui soit satisfaisante, une nouvelle configuration est à concevoir.

Si l'ensemble des opérations de reconfiguration appliquées au niveau d'une unité de production ne permet pas de couvrir l'ensemble des modifications nécessaires imposées par le nouveau produit, une propagation de ces modifications à une autre unité de production

est à envisager. Pour cela des opérations de reconfiguration impliquant deux ou plusieurs unités de production sont à mettre en œuvre.

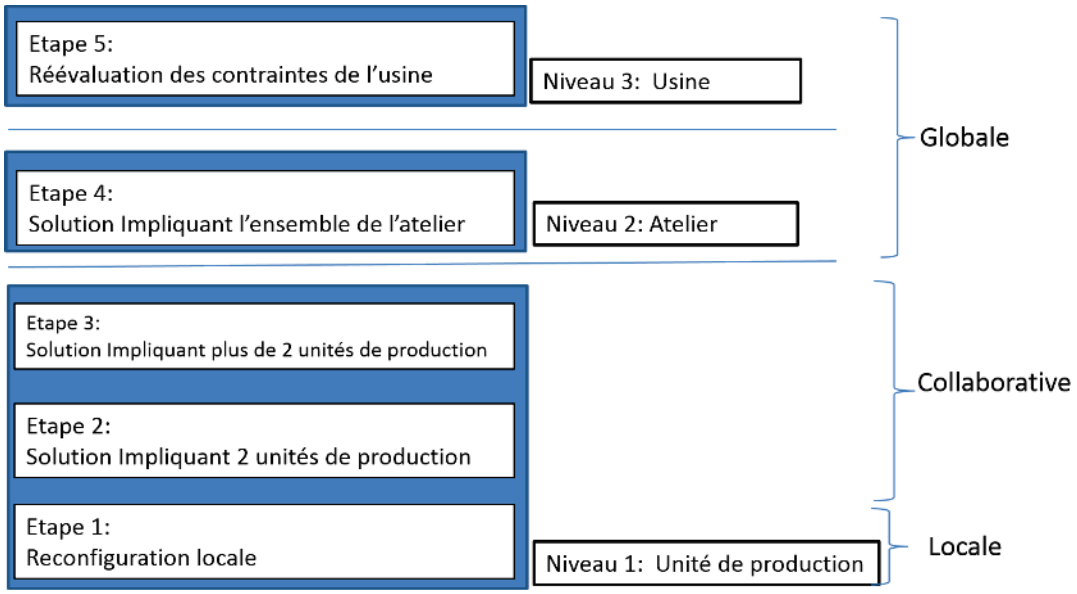


Figure III.14 – Stratégie de reconfiguration progressive

III.3.3 Opérations de reconfiguration

Une opération de reconfiguration est une action élémentaire appliquée à une unité de production pour modifier sa structure, ses paramètres ou son organisation.

Une opération de reconfiguration peut être "locale", c'est à dire qui implique une unité de production, ou "collaborative" c'est à dire qui implique plusieurs unités de production.

Ces opérations font intervenir des modifications qui impactent l'implantation, la capacité de production et les technologies utilisées par l'une unité de production.

III.3.3.1 Modifications qui affectent l'implantation

Les opérations *spatiales* consistent à ajouter, déplacer, regrouper ou décomposer une unité de production.

Déplacement : L'opération de déplacement d'une unité de production vise à libérer de la surface pour un nouveau besoin, à rapprocher l'unité concernée de son point de consommation ou bien à la regrouper avec d'autres unités de production. Un déplacement est une opération *locale*.

Décomposition : L'opération de décomposition consiste à séparer une unité de production en deux ou plusieurs îlots dans différentes zones de l'atelier (fig.III.15). Cette opération est nécessaire lorsqu'il n'y a pas assez de surface d'implantation dans la zone étudiée. Une décomposition est une opération *locale*.

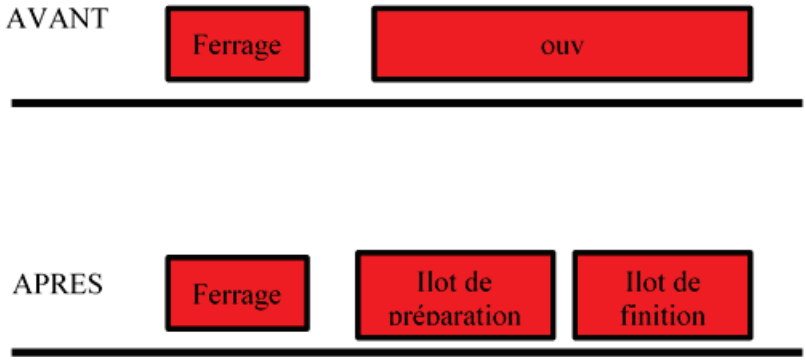


Figure III.15 – Opération de reconfiguration : décomposition d'une unité de production

Regroupement : L'opération de regroupement consiste à déplacer dans une même zone de l'atelier plusieurs unités de production dans un but de massifier les flux ou de mutualiser les ressources. Un regroupement est une opération *collaborative*.

III.3.3.2 Modification qui affectent la capacité de production

Les modifications de capacité consistent à ajouter, retirer ou modifier des ressources aux différents postes de travail d'une unité de production. Il peut aussi s'agir d'échange de ressources ou d'équipements entre deux ou plusieurs unités de production.

Ajout : L'opération d'ajout répond à un besoin d'augmenter la capacité de production. Elle peut concerner l'ajout de robots, d'opérateurs, d'équipements ou d'outillages à un poste de travail d'une unité de production. L'ajout est une opération *locale*.

Retrait : L'opération de retrait répond à un besoin de réduire la capacité de production. Elle peut concerner le retrait de robots, d'opérateurs, d'équipements ou d'outillages à un poste de travail d'une unité de production. Le retrait est une opération *locale*.

Remplacement : Le remplacement d'une ressource intervient lorsqu'une nouvelle ressource est plus apte à réaliser une tâche par rapport à la ressource existante pour les nouveaux besoins de production. Il peut s'agir d'un remplacement d'opérateur, de robot, d'équipement ou d'outillage. Le remplacement d'un opérateur qui réalise des tâches

d'assemblage difficiles par un robot est une opération de **robotisation**, tandis que le remplacement d'un opérateur qui réalise des tâches de manutention pénibles par un système automatisé est une opération d'**automatisation**. Le remplacement est une opération *locale*.

Transfert : L'opération de transfert consiste à transférer des activités de production d'une unité à une autre (fig.III.17). Ce transfert permet de réaliser des tâches qui ne sont pas réalisables dans une unité de production par manque de capacité ou pour des raisons de non faisabilité avec les outillages existants. Un ensemble de tâches Ti est transféré à une unité de production U2. Le transfert est une opération *collaborative*.

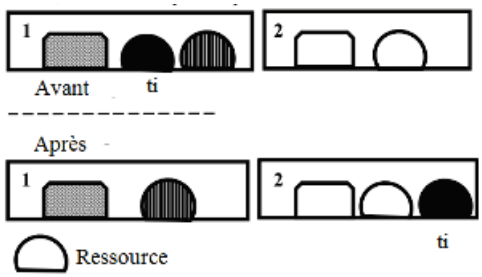


Figure III.16 – Opération de reconfiguration : transfert d'activité de production

Echange : L'opération d'échange consiste à échanger les ressources entre deux ou plusieurs unités de production. Il peut s'agir de ressources humaines, de robots ou d'outillages (fig.III.17). L'échange de ressources peut se faire de manière permanente ou temporaire c'est à dire pendant la production d'une variante de produit nécessitant la ressource Ri.

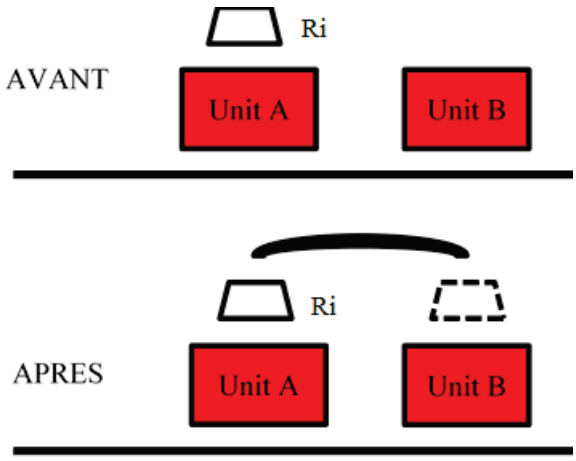


Figure III.17 – Opération de reconfiguration : échange de ressources ou d'outillages

Les différentes opérations de reconfiguration peuvent être classées en fonction de

l'importance des modifications qu'elles impliquent. On distingue les reconfigurations mineures, moyennes et majeures :

— *Une reconfiguration mineure* utilise différemment les ressources existantes. Par exemple, l'ajout d'une nouvelle pièce spécifique à un produit qui partage la même plateforme et les mêmes autres pièces qu'un véhicule existant. Les opérations de reconfiguration se font sans interférence avec les produits en cours de production et ont un faible impact sur le planning.

— *Une reconfiguration moyenne* met en œuvre des modifications plus importantes des ressources existantes. Il peut s'agir par exemple de changement d'outillage mécanique commun embarqué sur un robot. Il est possible de réaliser la plupart de ces opérations de reconfiguration hors production.

— *Une reconfiguration majeure* change l'ensemble des fonctionnalités disponibles dans l'unité de production jusqu'à en modifier l'architecture. Il peut s'agir par exemple d'un changement d'outillage mécanique commun fixe au sol ou un déplacement de moyens pour l'ensemble des postes de travail. Ces modifications nécessitent une période de travaux d'arrêt importante et crée une interférence avec les produits en cours de production.

Ces niveaux de reconfiguration n'ont pas le même impact sur le coût et les délais d'un projet. Il est évident que le coût d'une modification plus importante est plus élevé. La problématique du délai est plus complexe puisque différents types de contraintes temporelles sont à prendre en compte pour le déploiement de ces modifications. Par exemple, une modification majeure ne pourra pas être réalisée lors des périodes d'arrêts courtes.

L'expérience a montré que ces travaux de modifications (mineures, moyennes ou majeures) sont le plus souvent la cause d'un retard de démarrage et de date de sortie du produit car ils sont sur le chemin critique du planning du projet.

III.3.4 Les étapes de la méthode de reconfiguration

Cette section présente les principes et les différentes étapes de la méthode de reconfiguration. Elle se base sur l'analogie présentée précédemment.

Les étapes de la méthode consistent à analyser les éléments déclencheurs, sélectionner une stratégie, mettre en œuvre la stratégie, évaluer l'impact de la stratégie et déployer la nouvelle configuration.

1. **Analyse :** Cette étape consiste à analyser les éléments déclencheurs du processus de reconfiguration afin de se focaliser sur l'unité de production, l'îlot ou le poste de travail concerné. Nous avons vu que les facteurs de reconfiguration liés à

l'introduction d'un nouveau produit sont les modifications des spécifications du produit et des contraintes de production. L'unité de production impactée par la reconfiguration est celle dont la configuration initiale ne permet pas de répondre à ces modifications du produit ou à ces nouvelles contraintes de production.

2. **Sélectionner une stratégie** : Dans une approche dite progressive, la sélection d'une stratégie de reconfiguration se fera en minimisant l'impact de l'introduction d'un nouveau produit dans l'unité de production. Dans le cadre de ces travaux, nous ne mettrons en œuvre que la stratégie présentée dans la figure III.14.
3. **Mettre en œuvre la stratégie** : Une reconfiguration progressive d'une ligne de production fait intervenir dans un premier temps des modifications sur l'organisation des ressources existantes, puis les modifications de la capacité de production et enfin les modifications de l'implantation des unités de production. Pour cela, on met en œuvre une stratégie qui implique des modifications locales si les modifications sont limitées à l'unité de production puis des modifications collaboratives si les modifications nécessitent des interactions entre plusieurs unités de production et enfin des modifications globales si l'impact des modifications impliquent l'ensemble de l'atelier ou nécessitent de réévaluer les contraintes de l'usine.
4. **Evaluer les solutions de reconfiguration** : cette étape permet au décideur de choisir une solution de reconfiguration. Elle détermine si les solutions sont satisfaisantes au regard des critères métiers. Puis on évalue les solutions au regard des critères projet. L'évaluation de chaque solution est basée sur une fonction multicritère qui mesure le coût de la solution, les délais de mise en œuvre de la solution et les écarts de performance technique par rapport à la solution initiale. Cette partie est développée dans le chapitre IV.
5. **Développer la nouvelle configuration** : Une fois qu'une solution est satisfaisante, le développement de la configuration choisie consiste à la modéliser puis à la valider techniquement vis à vis de l'ensemble des métiers concernés. Cette partie est développée dans le chapitre V.

III.3.5 Métamodèle de la méthode de reconfiguration

Un méta-modèle est une définition formelle d'un modèle qui aide à le comprendre et qui facilite le raisonnement sur sa structure, sa sémantique et son usage. La méta-modélisation, qui est l'activité de construire des méta-modèles, est très utilisée dans le domaine de l'ingénierie des systèmes d'information et particulièrement dans l'ingénierie des modèles et des méthodes.

Dans l'ingénierie des processus, c'est un outil conceptuel indispensable pour définir et raisonner sur de nouveaux modèles et concepts. Les méta-modèles sont une définition

formelle nécessaire pour concevoir et construire les outils pour éditer, vérifier, transformer et éventuellement exécuter des instances de ces modèles. Généralement, la pratique de la méta-modélisation consiste à spécifier des méta-modèles ayant un haut niveau d'abstraction qui reflètent la structure statique des modèles, c.à.d. les concepts et les liens entre ces concepts.

Le méta-modèle de la figure III.18 résulte de l'étude du domaine de l'assemblage automobile. Un processus d'abstraction a permis d'identifier les éléments qui sont indépendants du domaine d'étude.

L'unité de production représente ici le niveau de granularité d'analyse du système de production

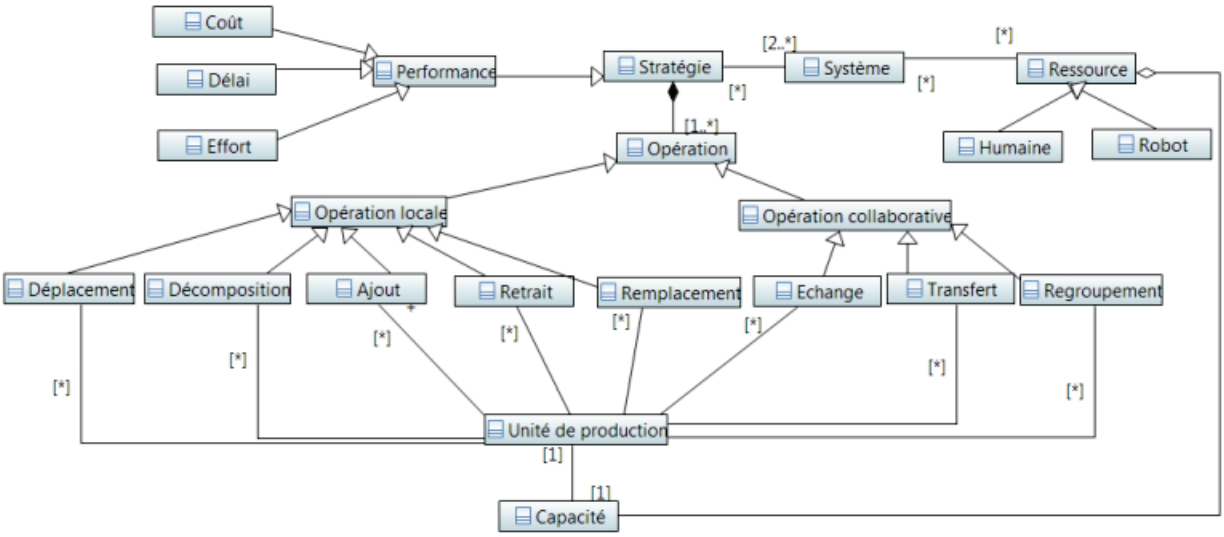


Figure III.18 – Métamodèle de la méthode de reconfiguration progressive

III.4 Conclusions

L'objectif de ce chapitre est d'étudier les processus permettant de reconfigurer une ligne de production en vue d'introduire un nouveau produit. L'analyse de ces processus permet d'identifier des solutions et de mettre en évidence leur impact sur la configuration initiale. Pour cela, nous avons étudié les mécanismes mis en œuvre lors du changement de configuration : il s'agit du processus de reconfiguration. Ensuite, l'ensemble des modifications à mettre dans ce processus est modélisé, il s'agit des opérations de reconfiguration.

Deux niveaux de décision sont identifiés pour la mise en œuvre de ce processus : l'architecture d'implantation et la configuration du processus d'assemblage. Afin de minimiser l'impact des modifications sur la configuration initiale, nous avons traité la

modification d'une configuration existante. Pour cela, une analogie entre le problème de reconfiguration et le problème de réordonnancement a été identifiée. En effet, plusieurs approches de réordonnancement existent. Toutefois, nous nous sommes intéressés aux approches de réordonnancement réactif, notamment la méthode de réparation de planning qui propose une réparation plutôt qu'un recalcul d'un nouveau planning. Des opérations de reconfiguration sont définies en se basant sur cette analogie. Une méthode de reconfiguration progressive est proposée suite à cela. Une stratégie de reconfiguration est proposée ainsi que les opérations de base du processus.

Ce chapitre a permis d'identifier les solutions de reconfiguration et de mettre en évidence leur impact sur la configuration initiale du système. Plusieurs solutions ressortent de cette analyse. Ces solutions devront faire l'objet d'une évaluation pour orienter la prise de décision. Cette évaluation se base sur plusieurs critères qui ne peuvent être optimisés simultanément. Le chapitre suivant propose d'aborder ce problème avec une approche multicritère et de mettre en évidence les différents points de vue pour la prise de décision. Les points de vue abordés dans la suite de ce manuscrit concernent les points de vue métier, et le point de vue du projet qu'il faut conjointement prendre en compte.

Chapitre IV

Propositions pour l'évaluation des choix de reconfiguration d'une ligne de production

"Réflechis avec lenteur, mais exécute rapidement tes décisions." (Isocrate)

Résumé

Ce chapitre propose une approche d'évaluation des solutions identifiées dans la phase d'analyse de la reconfiguration. L'évaluation se base sur des critères "métiers" qui caractérisent une configuration de ligne et des critères "projet" qui concernent les coûts et le délai de reconfiguration de la ligne. La méthode d'analyse multicritère Prométhée est utilisée pour modéliser le problème et fournir une synthèse pour la prise de décision.

Sommaire

IV.1 Les critères d'évaluation 95
IV.2 Les critères d'évaluation : point de vue projet 96
IV.2.1 L'investissement 96
IV.2.2 La flexibilité 97
IV.2.3 L'engagement des opérateurs 99
IV.3 Les critères d'évaluation : point de vue métier 100

IV.3.1 Concepts et modèles pour l'évaluation basée sur les règles métiers101
IV.3.2 Synthèse des résultats : matrice de décision 104
IV.3.3 Exemple d'évaluation des critères métier 105
IV.3.4 Conclusion sur l'évaluation des critères métier 108
IV.4 Evaluation globale et synthèse des solutions 108
IV.4.1 Approche multicritère : la méthode Prométhée 109
IV.4.2 Synthèse des solutions pour la prise de décision 112
IV.5 Conclusions 116

Ce chapitre s'intéresse aux étapes d'évaluation et de prise de décision relatives aux choix de reconfiguration d'une unité de production. Ces étapes sont souvent peu formalisées et peu documentées. Quelles hypothèses ont été posées pour l'évaluation ? Quels critères sont utilisés pour la prise de décision ? Parmi ces questions récurrentes, on s'intéressera plus particulièrement à l'identification des critères pertinents et leur exploitation pour la prise de décision.

IV.1 Les critères d'évaluation

Deux types de critères permettent d'évaluer les solutions à deux niveaux de décision différents. Les critères liés au projet concernent les coûts et les délais de reconfiguration. Les critères liés au métier, concernent les performances d'une configuration de ligne. Le point de vue projet, met en avant les critères relatifs au processus d'obtention de la solution et le point de vue métier met en avant les critères intrinsèques au résultat de ce processus. Dans les critères projet, on peut trouver les coûts d'investissement, de reconfiguration, les délais de démarrage, l'engagement des opérateurs et la flexibilité. Dans les critères métiers, on peut trouver la capacité maximale, d'une configuration de ligne de production. Nous avons constaté que la définition des critères et leur mode d'évaluation diffèrent en fonction des personnes qui réalisent l'évaluation et du périmètre de la ligne de production à évaluer.

Des règles métiers existent dans les bases de connaissances de l'entreprise. Ces règles sont issues des principes du Lean Manufacturing appliqué au niveau de la configuration d'une ligne de production. Un premier objectif est de définir des critères permettant d'évaluer le niveau de respect de ces règles métier, et ainsi d'avoir une idée de la performance atteignable d'une configuration de ligne en avant-projet.

Une évaluation plus globale permet de prendre en compte aussi bien les critères métiers que les critères projet. En effet, les coûts et les délais sont les principaux critères de décision lors de l'analyse de faisabilité et de performance technico-économique d'un projet. Notre choix s'est porté pour cela sur la méthode de surclassement Prométhée (voir § II.2.3.3). Cette méthode propose un diagramme de synthèse (Gaia) montrant une vue globale des critères et des alternatives dans un système d'axes adapté pour faire des compromis.

La première section de ce chapitre présente les critères projet qui seront utilisés pour évaluer les solutions de reconfiguration d'une ligne de production. La deuxième section s'intéresse à la formalisation des critères métiers identifiés à partir de règles métiers. La troisième section présente une évaluation des solutions de reconfiguration à travers la méthode Prométhée et l'outil de synthèse Gaia pour la prise de décision.

IV.2 Les critères d'évaluation : point de vue projet

Cette section présente les principaux critères utilisés pour évaluer une configuration du système de production. Il s'agit de l'investissement, de la flexibilité et de l'engagement des opérateurs.

IV.2.1 L'investissement

L'investissement correspond à la somme des coûts des équipements à installer. Il est plus important dans le cas d'une nouvelle ligne que dans le cas d'une réutilisation ou modification de ligne.

$$I = \sum_1^n C_i \cdot N_i$$

— I : Investissement sur un périmètre défini (usine, unité, ligne ou poste de travail)

— Ci : Coût unitaire d'acquisition de la ressource i

— Ni : nombre de ressources de type i utilisées dans le périmètre pour une hypothèse donnée

Dans la pratique, ce critère est quantifié par la somme à engager pour l'acquisition d'équipements supplémentaires par rapport à une configuration initiale. Les deux principaux inducteurs[1] de coût sont (1) les moyens d'assemblage (Equipements, outillages) et (2) les éléments d'implantation (manutention, installations générales). Dans tous les cas on distingue des investissements **capacitaires** qui concernent les équipements permettant de fabriquer l'ensemble des véhicules et les investissements **spécifiques** à un seul véhicule.

L'investissement dans un moyen de production nécessite de valider en contrepartie une amélioration de la performance du système. Il peut s'agir d'augmentation de capacité, de réduction de coûts de fabrication ou bien d'amélioration de la flexibilité. Une solution, bien qu'elle soit performante est à écarter si elle n'est pas rentable.

La rentabilité d'un investissement dépend principalement du délai de remboursement et d'un indice de profitabilité :

— **Le délai de remboursement (payback)** correspond au nombre d'années nécessaires pour que les gains escomptés compensent les investissements. Il dépend de la valeur actualisée nette (VAN) qui mesure la valeur créée par le projet pour l'entreprise par la différence entre les produits nets actualisés découlant du projet et les investissements nets actualisés.

1. facteur qui influe sur le niveau de performance d'une activité

— **L'indice de profitabilité (IP)** représente le rapport entre le cumul actualisé des flux de trésorerie (cashflow) et l'investissement initial.

Les décisions relatives aux choix de configuration du système de production ne peuvent se prendre uniquement sur la base économique. D'autres critères tels que la flexibilité ou l'engagement des opérateurs sont également à prendre en compte.

IV.2.2 La flexibilité

La flexibilité d'un système est caractérisée par sa capacité à s'adapter à la demande et au changement. De plus en plus d'usines font face à moins de volume par véhicule et une augmentation des variantes de produit pour utiliser la capacité de l'usine au maximum. Cette augmentation de diversité de pièces nécessite d'améliorer la flexibilité afin d'être réactif aux variations du marché et au besoin de nouveaux produits.

Dans la pratique, la flexibilité d'une ligne est liée au nombre de variantes que l'on peut assembler sur cette même ligne, à la capacité à varier le volume de production et à la capacité d'adapter les modes de fonctionnement (par lot ou à la demande). Dans les paragraphes suivants nous nous intéressons à la flexibilité au produit et la flexibilité au volume. Différentes méthodes d'évaluation de la flexibilité sont traitées dans [Georgoulias 10] [Lelièvre 11].

La flexibilité permet à un système industriel de fabriquer plusieurs variantes de produit à différentes cadences. Sur le court terme, le système est capable de fabriquer de faibles lots pour s'adapter à la demande. Sur le long terme, l'installation peut être utilisée sur plusieurs cycles de vie de produits, ce qui améliore la rentabilité des investissements.

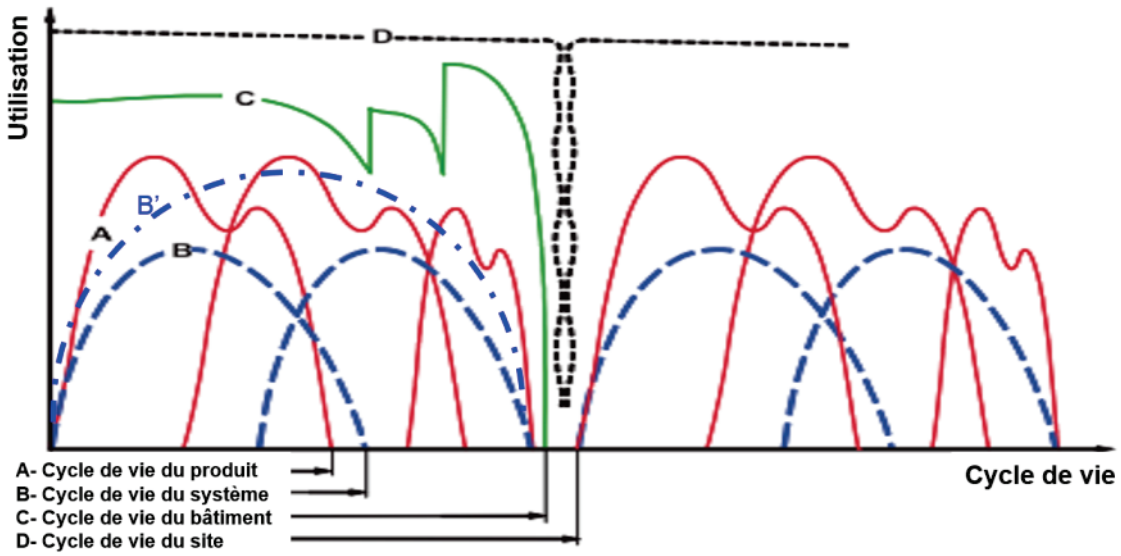


Figure IV.1 – Cycles de vie du produit et du système industriel [Wiendahl 07]

Le cycle de vie d'un produit véhicule est représenté sur la figure IV.1 par la courbe A (en rouge). Il se chevauche généralement avec le cycle de vie d'autres produits pendant des périodes appelées "phases sifflet". Le cycle de vie d'un système d'assemblage est représenté par la courbe B (traits espacés discontinus). Le cycle de vie du bâtiment est représenté par la courbe C. Le cycle de vie du site industriel est représenté par la courbe D.

La superposition des courbes du cycle de vie du produit et du système de production permet de faire un premier constat. Le cycle de vie du système de production (B) est très lié au cycle de vie du produit (A). Compte tenu de l'importance des investissements, il semble évident qu'allonger le cycle de vie du système de production (courbe B') en réutilisant les mêmes moyens de production pour plusieurs familles de produits améliorera la rentabilité des investissements.

IV.2.2.1 La flexibilité au produit

Dans le cas des systèmes d'assemblage automobile, la flexibilité au produit est relative à la capacité à assembler plusieurs variantes de caisse sur la même ligne. Concrètement il s'agit du type de plateformes (PF) et du type de caisses (CS) que l'on peut y fabriquer (Pour plus de détails sur la notion de plateforme et de caisse de véhicule, voir annexe B.1).

Cette flexibilité peut se matérialiser au niveau d'une ligne d'assemblage et permet d'identifier plusieurs configurations en fonction du nombre de variantes de caisses à assembler. L'exemple ci-dessous concerne une unité d'assemblage des côtés de caisses. Il s'agit des parties latérales de la caisse du véhicule sur lesquelles se fixent les portières. En fonction du nombre de variantes de produit, différentes configurations de lignes sont préconisées :

— Une variante de caisse : configuration en deux lignes en parallèle pour l'assemblage des pièces du côté gauche et droit.

— Deux variantes de caisses : configuration en deux lignes, plus un retourneur d'outillage à deux positions.

— Quatre variantes de caisses : configuration en deux lignes plus un retourneur d'outillage, plus un changeur d'outillage.

Cette flexibilité peut également se matérialiser au niveau d'un poste de travail par rapport aux outillages utilisés. L'exemple ci-dessous concerne différents postes de géométrie, c'est à dire la mise en position d'un assemblé avec un nombre de points de soudure nécessaires pour maintenir la géométrie des pièces.

— Une variante : utilisation d'un guide d'assemblage fixe avec un emplacement disponible pour un système de positionnement du guide.

— Deux variantes : utilisation d'un guide d'assemblage mobile sur un axe linéaire à deux positions avec un emplacement disponible pour un système de positionnement du guide.

— Trois variantes : utilisation d'un guide d'assemblage sur un système de positionnement pneumatique ou électrique.

IV.2.2.2 La flexibilité au volume

La flexibilité au volume est relative à la capacité d'augmenter ou réduire la capacité de production en fonction de la demande. Elle dépend principalement de la capacité à anticiper les ventes. Par exemple, sur une base de 5000 h de travail par an, si les prévisions de volumes anticipent une augmentation de 75000 à 150000 veh/an, alors il serait intéressant de dimensionner une ligne extensible de 75000/5000 = 15 veh/h à 150000/5000 = 30 veh/h. Une ligne limitée à 15 veh/h ne serait pas acceptable.

IV.2.3 L'engagement des opérateurs

L'engagement des opérateurs permet de mesurer le taux prévisionnel d'occupation des opérateurs. Cet engagement est mesuré par un ratio du temps réel passé sur un temps standard. Le temps réel passé par l'ensemble des opérateurs (HPA : Heures Passées Ajustées) est une valorisation réelle en temps des opérations pour fabriquer le produit. Le temps standard de conception (DST : Design Standard Time) permet de valoriser les temps d'opérations manuelles apportant de la valeur ajoutée au produit. Ce temps ne comprend pas les opérations automatisées ni celles qui sont externalisées. Il s'agit d'un indicateur de performance de conception du produit par rapport à son processus d'assemblage.

Le ratio d'engagement (DSTR : Design Standard Time Ratio) est donc un indicateur de performance de fabrication qui est obtenu par le ratio entre un temps réel passé (HPA) et un temps théorique (DST).

$$DSTR = HPA/DST$$

Un ratio d'engagement de deux signifie que l'on passe en théorie deux fois plus de temps pour fabriquer une pièce que par rapport à un temps standard basé uniquement sur les opérations à valeur ajoutée.

IV.3 Les critères d'évaluation : point de vue métier

Les critères métiers permettent d'évaluer une configuration de ligne de production du point de vue des métiers qui sont impliqués dans sa conception. Dans le cadre de l'introduction d'un nouveau produit dans une usine existante, plusieurs configurations du système d'assemblage sont à évaluer dès les phases amont du projet. Étant donné qu'il s'agit d'une décision humaine, le choix de réutiliser ou de développer une nouvelle unité d'assemblage par exemple, nécessite de se baser sur des connaissances d'experts. Dans ce contexte, les règles métiers permettent de respecter un certain nombre de contraintes pour s'assurer de la conformité du système à un standard de référence défini.

Cette section présente une méthode d'évaluation qui se base sur une formalisation de ces règles métiers sous forme de critères. Une grille de cotation qui reprend ces critères permet de faire une évaluation a priori d'une configuration de ligne de production. Les résultats quantitatifs de cette grille de cotation peuvent être utilisés comme données d'entrée d'une méthode d'analyse multicritère afin de proposer un classement des solutions aux décideurs. La démarche d'étude montre que vérifier au plus tôt l'ensemble de ces règles permet d'avoir une vision synthétique de l'impact de chaque solution sur la performance du système.

Plusieurs travaux de recherche ont montré l'intérêt de se baser sur les règles métier dans la conception de systèmes de production. On peut citer les quatre règles de conception du système de production Toyota (TPS) : (1) Chaque tâche doit être spécifiée, (2) les relations client-fournisseur doivent être directes, (3) les flux doivent être simples et directs, (4) chaque amélioration doit se baser sur une analyse et une démarche scientifique [Black 07]. Les règles métier ont été utilisées pour évaluer les choix de reconfiguration de systèmes [Feno 15a].

Une règle métier est une prescription qui permet de contraindre, contrôler et influencer un aspect du métier [Nalepa 09]. Son application permet de réduire les risques d'obtenir des solutions non satisfaisantes et permet ainsi de prendre des décisions de manière plus rationnelles. Elles retranscrivent donc plusieurs contraintes et préconisations d'experts. Dans un processus d'ingénierie, une règle métier permet de spécifier comment une tâche doit être réalisée ou comment un système doit être conçu. Les règles métiers sont capitalisées et vérifiées systématiquement afin de minimiser les risques dans un projet de développement et de s'assurer que la solution est faisable et permet d'atteindre un niveau de performance donné. Chaque règle métier peut représenter un aspect de la performance du système. Les approches multicritères permettent d'analyser les solutions vis-à-vis de l'ensemble des critères associés à ces points de vue.

La méthode d'évaluation est basée sur les concepts de règles métiers et de critères

associés à ces règles. Ces critères sont formalisés sous forme de grille de cotation. Cinq niveaux de cotation sont définis pour valoriser chaque critère. Les résultats sont présentés sous forme de matrice à code couleur correspondant aux cinq niveaux cotation. Les paragraphes suivants présentent dans un premier temps le modèle et les outils utilisés pour l'évaluation, puis une procédure d'évaluation correspondant aux tâches de l'utilisateur final est présentée.

IV.3.1 Concepts et modèles pour l'évaluation basée sur les règles métiers

Cette section présente un modèle de données présentant les concepts liés à l'évaluation, une grille de cotation et une matrice de représentation des résultats de l'évaluation. Le modèle de données de la Fig. IV.2 présente les différents concepts liés à l'évaluation. Inspiré du modèle d'évaluation proposé par [Ullman 11], le modèle ci-dessous inclut les règles métiers et leurs rôles dans la prise de décision à travers les critères.

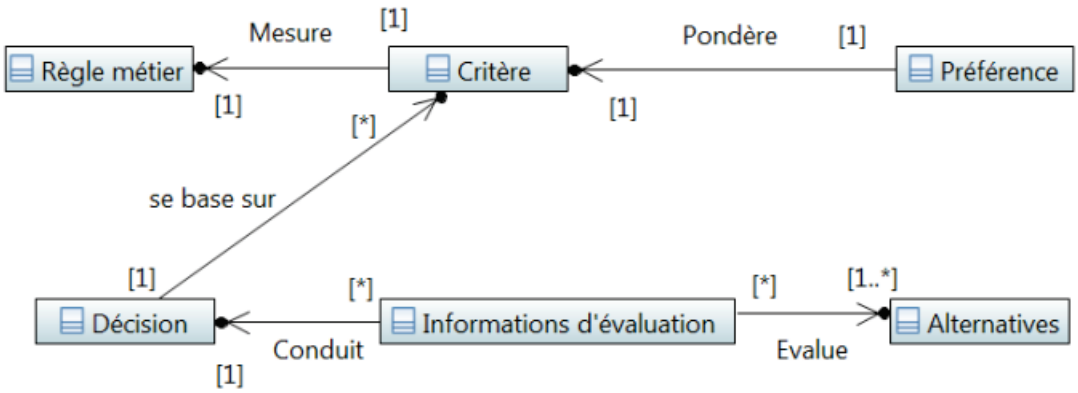


Figure IV.2 – Modèle d'évaluation des règles métiers

Un critère permet d'évaluer l'application d'une règle métier. Des préférences permettent de pondérer ou de définir une valeur d'utilité à un critère. Une décision se base sur un ensemble de critères. Des informations d'évaluation permettent d'évaluer l'ensemble des solutions et conduisent à une décision.

IV.3.1.1 Formalisation des règles métiers

On peut trouver plusieurs formes de règles métiers. En général, elles sont composées d'une condition, d'une variable et d'une action (si « condition » effectuer « action »). Dans notre cas, elles correspondent plutôt à des règles de conception et se focalisent sur des actions spécifiques à appliquer pour assurer la faisabilité ou l'atteinte d'un niveau de performance.

Exemples de règles métier :

— Règle A : Concevoir des postes de chargement non enchainés à la ligne. Par « enchaînés » on entend que l'opérateur qui réalise le chargement des pièces est obligé de rester à son poste pour lancer les ordres de fabrication.

— Règle B : Maximiser les opérations à valeur ajoutée. Il s'agit de réaliser le plus d'opérations d'assemblage (ex : points de soudure) à un poste de travail dans le temps de cycle défini.

IV.3.1.2 Identification des critères

Le respect d'une règle métier est conditionné par la valeur de plusieurs critères. Chaque critère peut être pondéré en fonction de son importance aux yeux des décideurs. Une prise de décision est conditionnée par un ensemble d'informations relatives aux solutions.
Exemple de critères :
Les exemples de critères ci-dessous correspondent respectivement à la règle A et à la règle B.

— Critère A : Combinaison du choix du mode de chargement et du moyen d'approvisionnement des pièces : afin de concevoir des postes de travail non enchaînés à la ligne, différentes combinaisons de moyens de chargement et de mode d'approvisionnement sont identifiées.

— Critère B : Ratio entre le nombre d'opérations demandées et le nombre d'opérations théoriquement réalisables : ce ratio doit être proche de 1 afin de maximiser le nombre d'opérations à valeur ajoutée.

Les critères retenus pour évaluer les processus d'assemblage concernent (1) mode de chargement et d'approvisionnements, (2) l'engagement théorique des moyens, (3) la flexibilité au produit et (4) le mode de fonctionnement de la ligne.

Critère 1 : Mode de chargement et moyen d'approvisionnement : Le moyen de chargement (ou d'évacuation) correspond au type de ressource permettant d'alimenter ou d'évacuer la ligne d'assemblage. Le mode d'approvisionnement définit le type de moyen permettant d'acheminer les pièces au poste de chargement. Les pièces peuvent être transférées d'une unité à une autre à l'aide de différents types de moyens logistiques : des conteneurs, des emballages spécifiques, des meubles à accumulation, des convoyeurs ou des véhicules auto-guidés. Ce critère permet d'évaluer a priori l'engagement des postes de chargement et de déchargement qui sont souvent des postes critiques nécessitant des modifications lors de l'installation ou du démarrage de la production.

Critère 2 : Engagement des moyens : Ce critère représente la capacité globale de la ligne à réaliser des opérations à valeur ajoutée. Dans le cas de l'assemblage de caisses

de véhicule, on parle de nombre de points de soudure. Cet engagement est mesuré par un ratio entre le nombre d'opérations demandé / Nombre d'opérations théoriquement réalisable. Ce ratio permet d'évaluer a priori l'engagement global de la ligne par rapport au produit à assembler.

Critère 3 : Flexibilité au produit : La flexibilité au produit est la capacité du système à fabriquer plusieurs variantes de produit. Dans notre contexte, cette flexibilité est exprimée par différents niveaux de technologie permettant d'assembler une ou plusieurs variantes de produit. Ce critère permet donc de définir le nombre de variantes de produit qu'une configuration du processus d'assemblage permet de fabriquer.

Critère 4 : Mode de fonctionnement Ce critère permet de définir si un processus d'assemblage peut fonctionner selon un principe de conduite « à la demande » ou « par lot ». Les niveaux de cotation ont été définis de manière à prévoir si un mode de fonctionnement impliquerait une contrainte sur la séquence de production à planifier. Cela permet d'évaluer a priori si une variation du mix produit (pourcentage d'une variante à produire) a un impact sur la capacité de la ligne.

IV.3.1.3 Définition des échelles de cotation des critères

Les valeurs possibles de chaque critère sont différentes en fonction de la règle métier. Une échelle de cotation commune à 5 niveaux a été définie dans l'objectif de spécifier le meilleur et le pire des cas (deux valeurs extrêmes), la valeur moyenne, et deux valeurs intermédiaires. Pour chaque critère, un intervalle délimité par le meilleur et le pire des cas a donc été défini.
Exemple d'échelle de cotation : Les différents niveaux possibles pour le critère A sont présentés ci-dessous. Chaque niveau correspond à une combinaison d'un moyen de chargement et d'un mode d'approvisionnement.

1. Opérateur enchainé à la ligne / Un conteneur par pièce (pire des cas)
2. Opérateur enchainé à la ligne / collection de pièces
3. Robotisé / Meuble à accumulation chargé par un opérateur (cas intermédiaire)
4. Robotisé / Conteneur "spécifique" par collection
5. Robotisé / par collection via AGV [2] (Meilleur des cas)

Le niveau 1 correspond à la situation non souhaitable et le niveau 5 correspond à la solution idéale pour le critère en question. En effet, dans le pire des cas, l'opérateur est lié à son poste de travail et devrait réaliser autant de déplacements que de pièces à assembler car la configuration du poste de chargement de la ligne préconise un conteneur par type de pièce. Le niveau 2 propose une amélioration pour palier ce problème. Le cas idéal consiste

2. AGV : Automated Guided Vehicle

à robotiser le chargement et automatiser l'approvisionnement des pièces via des véhicules autoguidés. La trajectoire de ces véhicule autoguidés ne sont pas figés mais modifiables en fonction des spécificités du flux de production. De cette manière, la configuration peut évoluer plus facilement lors de l'introduction de nouveaux produits ou de l'évolution de la demande.

Nous proposons de mettre en forme les règles, les critères et les échelles de cotation sous forme d'un tableau d'évaluation afin de définir un standard commun de référence pour l'évaluation des processus d'assemblage en avant-projet. L'intérêt de ce tableau est de permettre à un concepteur d'évaluer si la configuration d'une ligne de production respecte l'ensemble des règles métiers.

Un extrait de ce tableau est illustré dans le tableau IV.1 pour le critère d'engagement des moyens. Ce tableau est défini comme une aide à la vérification de l'application des règles métier. Cette vérification permet de s'assurer le respect d'un ensemble de critères qui définissent la performance d'une configuration « idéale » de référence.

Critère	Niveau	Echelle de cotation
Engagement :Ratio "demande/capacité théorique"	0	Ratio Nb liaisons réalisées / théoriques $< 60\%$
	1	$60\% <$ Ratio Nb liaisons réalisées / théoriques $< 70\%$
	2	$70\% <$ Ratio Nb liaisons réalisées / théoriques $< 75\%$
	3	$75\% <$ Ratio Nb liaisons réalisées / théoriques $< 85\%$
	4	Ratio Nb liaisons réalisées / théoriques $> 85\%$

Tableau IV.1 – Tableau d'évaluation

En se basant sur le tableau d'évaluation, la procédure d'évaluation consiste à :

1. Identifier l'ensemble des processus d'assemblage
2. Pour chaque alternative, affecter une valeur à chaque critère
3. Agréger les valeurs des critères pour avoir un classement des alternatives. N'importe quel méthode d'agrégation peut être utilisé dans ce cas (Somme pondérée, produit pondérée ...).

IV.3.2 Synthèse des résultats : matrice de décision

Nous proposons de représenter les résultats de l'évaluation dans une matrice de décision dont les lignes correspondent aux solutions et les colonnes correspondent aux critères d'évaluation (Fig. IV.3). Cette représentation matricielle permet avec un code couleur d'identifier pour chaque alternative les critères qui ne permettent pas de respecter un niveau préconisé par une règle métier. De plus, la dernière colone propose un résultat d'agregation des scores. Dans ce cas particulier, un opérateur d'aggrégation additif de type somme pondéré à 1 a été utilisé.

	1-Appro	2- Liaisons	3-Flexibilité	4-Fonctionnement	
Réutiliser	2	3	0	0	5
Nouveau process A	2	4	3	3	12
Nouveau process B	1	3	1	2	7

Figure IV.3 – Matrice de décision pour les critères métiers

Considéré comme un outil de diagnostic d'une hypothèse de configuration du processus d'assemblage, cette grille permet d'évaluer l'état initial du système et de le comparer avec les alternatives de solutions envisagées. Elle permet également aux concepteurs d'identifier visuellement les critères qui ne satisfont pas ou partiellement les standards métiers et d'en déduire les leviers d'amélioration associés. Par exemple, une configuration mal cotée sur le respect des flux croisés permet de proposer la modification de l'implantation d'une ligne ou de son mode d'approvisionnement.

Une fois que ces critères sont cotés d'un niveau 0 à 4, le niveau de cotation de la configuration actuelle est comparé aux alternatives de solutions envisagées. On peut définir des configurations « de base » et des configurations « atteignables » pour chaque solution.

IV.3.3 Exemple d'évaluation des critères métier

Afin de montrer une application de la méthode d'évaluation basée sur les règles métiers, un cas d'étude concernant les choix de configurations d'une unité d'assemblage automobile est présenté dans cette section. Le problème industriel est d'abord décrit, les différentes solutions sont ensuite évaluées en utilisant la méthode décrite précédemment. Enfin une synthèse de l'apport de cette approche est faite au regard des résultats de l'évaluation.

IV.3.3.1 Description du cas industriel

On considère une ligne d'assemblage d'unités centrales (CTL) (I.2) composée de trois postes : un poste (1) pour la mise en géométrie des pièces, un poste (2) pour réaliser des opérations de finition de points de soudure (PSR) et un poste (3) pour assembler les goujons sur les pièces. Ces goujons servent à assembler l'ensemble avec d'autres éléments de structure du véhicule.

Initialement, un véhicule est en cours de production sur cette ligne. Plusieurs solutions sont envisagées pour intégrer un nouveau véhicule dans cette usine.

— H1 : Réutiliser les moyens d'assemblage existants. Cette solution implique de

proposer des modifications très importantes sur le nouveau véhicule.

— H2 : Modifier la configuration du système d'assemblage existant. Cette solution nécessite moins de modifications au nouveau produit.

— H3 : Installer une nouvelle unité d'assemblage ayant la même architecture (A) que l'existant, c'est à dire une architecture mono-flux avec des moyens de manutentions robotisés entre les postes de travail.

— H4 : Installer une nouvelle unité d'assemblage ayant une architecture différente (B) de l'existant avec 2 flux. La manutention entre les postes de travail se fait par des convoyeurs automatisés.

Les différentes configurations du système d'assemblage correspondant aux alternatives de solution sont représentées dans la Fig. IV.4. La différence entre les hypothèses H1 et H2 concerne les outillages installés à chaque poste de travail.

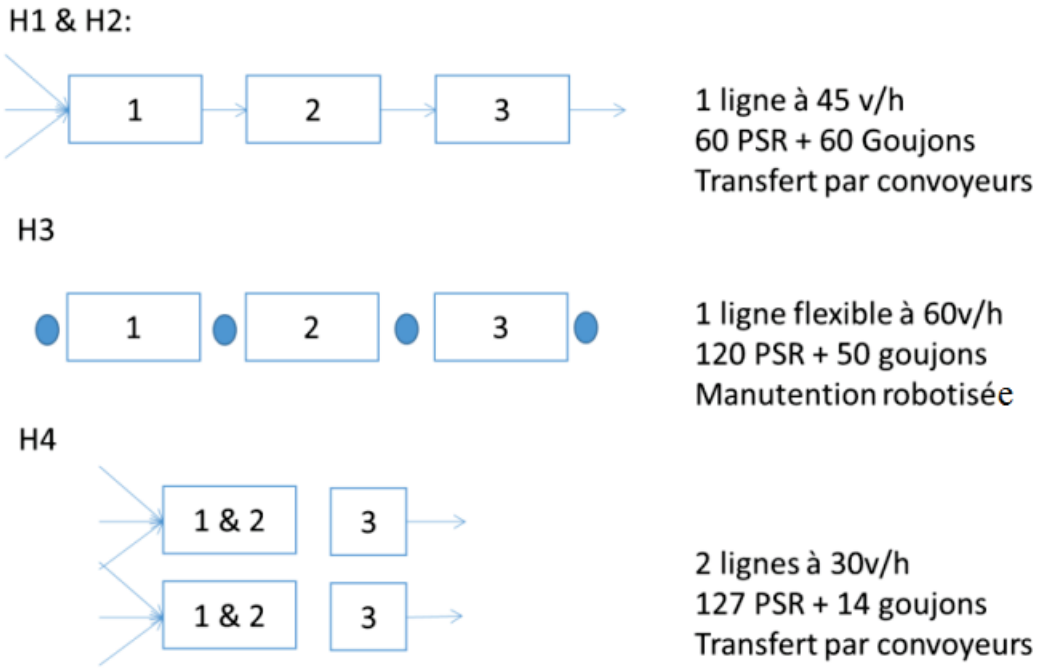


Figure IV.4 – Configuration d'une unité d'assemblage de plancher central

IV.3.3.2 Evaluation des solutions

Les règles métiers sont appliquées aux différentes configurations du processus d'assemblage. En se référant au tableau d'évaluation (IV.1) les niveaux de chaque critère sont définis pour chaque solution puis renseignés dans la matrice d'évaluation (IV.3). Pour ce faire, les schémas de principe (IV.4) des différents processus d'assemblage sont utilisés comme support. L'affectation des valeurs à chaque critère (Niveaux N0 à N4 entre parenthèses) est discutée dans les paragraphes suivants.

Concernant les moyens de chargement et le mode d'approvisionnement, pour les solutions H1, H2 et H3, les pièces sont chargées par un opérateur sur un meuble d'accumulation (N2). Par contre dans la solution H4 l'opérateur est enchainé à la ligne (N1).

Concernant l'engagement des moyens, les solutions H1, H2 et H4 ont un ratio d'engagement entre 80% et 90 % ce qui correspond au niveau (N3) tandis que la solution H3 atteint un niveau d'utilisation supérieur à 90% (N4).

Concernant la flexibilité, la solution H1 contient des outillages spécifiques à un seul véhicule (N0), la solution H2 et H3 préconise de mettre en œuvre un outillage flexible permettant de fabriquer plus de 2 variantes sur la même ligne (N3) et la solution H4 nécessite un changement d'outillage durant la production (N2). On note à ce niveau la non-faisabilité de la solution H1 vis-à-vis de ce critère.

Concernant le mode de fonctionnement, la solution H1 n'est pas concernée (N0) du fait qu'elle est spécifique à un seul véhicule. Les solutions H2 et H3 par contre peuvent fonctionner à la demande et par lot étant donné qu'il s'agit d'une ligne flexible mono flux (N3). La solution H4 est composée de deux lignes spécifiques pour les deux véhicules, une variation du pourcentage de la demande pour ces véhicules impacterait fortement la capacité de la ligne (N2).

IV.3.3.3 Représentation des résultats : matrice d'évaluation

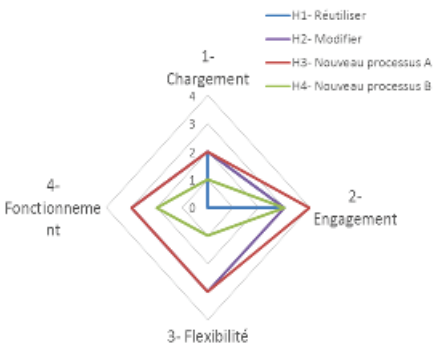
Les résultats de l'évaluation sont repris dans la matrice d'évaluation (côté gauche de la Fig. 6). La représentation matricielle avec des codes couleurs permet d'avoir une vue synthétique de l'ensemble des solutions.

D'autre part, une représentation sous forme de diagramme radar (côté droit de la Fig. 6) permet de réutiliser ces informations en mettant l'accent sur le degré d'atteinte des critères et donc le respect des règles métiers associés.

En conclusion, réutiliser la ligne existante (H1) n'est visiblement pas possible. Le diagnostic proposé par la matrice d'évaluation préconise d'améliorer la flexibilité par exemple en modifiant les outillages de la ligne existante (H2). Développer une nouvelle ligne mono-flux et flexible (H3) permettrait d'anticiper l'introduction d'un troisième véhicule sur la même ligne avec peu de modifications à réaliser. Enfin, développer une nouvelle ligne ayant deux flux spécifiques (H4) permettrait d'optimiser séparément la production des deux variantes. Cependant, cela peut être un inconvénient en cas de variation de la demande de l'un des deux véhicules. Les capacités de production doivent être équilibrées.

Solution	1- Chargement	2- Engagement	3- Flexibilité	4- Fonctionnement
H1- Réutiliser	2	3	0	0
H2- Modifier	2	3	3	3
H3- Nouveau processus A	2	4	3	3
H4- Nouveau processus B	1	3	1	2

Matrice d'évaluation



profil de décision

Figure IV.5 – Résultats de l'évaluation

IV.3.4 Conclusion sur l'évaluation des critères métier

Dans cette section, nous avons proposé une méthode d'évaluation de plusieurs configurations du processus d'assemblage en considérant les critères métiers. Le problème qui est posé concerne la formalisation des inducteurs qui définissent la performance d'une solution à partir de règles métiers. Pour cela, il est possible de s'appuyer sur les connaissances d'experts pour définir la performance d'un processus d'assemblage à travers des règles métiers. Nous avons montré que vérifier ces règles métiers au plus tôt permet d'analyser l'impact de chaque solution sur la configuration initiale du système. Une représentation des résultats sous forme de matrice de décision et une synthèse sous forme de diagramme radar est proposée au décideur.

IV.4 Evaluation globale et synthèse des solutions

L'évaluation des critères métiers permettent de prendre en compte les points de vue métier sur les choix de reconfiguration d'une ligne de production. Dans la suite de ce chapitre, nous abordons le point de vue du projet sur l'évaluation des choix de reconfiguration.

Nous avons vu dans l'état de l'art que les méthodes d'évaluation à base d'utilité consistent à agréger les critères avec une échelle commune. Cela permet de comparer différentes unités de mesure pour un problème de choix. Nous proposons d'utiliser une méthode de surclassement Prométhée afin de pouvoir :

— prendre en compte l'incomparabilité entre solutions car on a montré qu'il est difficile d'exprimer les préférences vis à vis de plusieurs points de vue.

— proposer un surclassement et non la meilleure solution afin d'avoir un classement des solutions et une synthèse permettant de faire des compromis (Plan GAIA).

— garder les unités usuelles des critères (Tableau IV.2) au lieu d'agréger l'ensemble des critères en une valeur unique qu'il faudra ramener à une échelle unique pour faire la comparaison.

Cette section présente dans un premier temps la méthode de surclassement prométhée ensuite les outils de synthèse utilisés pour proposer au décideur les résultats de l'évaluation en vue d'une prise de décision.

IV.4.1 Approche multicritère : la méthode Prométhée

La méthode Prométhée établit un classement qui accepte l'incomparabilité. Elle utilise la notion de préférence et établit un graphe de surclassement entre les solutions. Une solution **a** surclasse une solution **b** si :

— **a** est au moins aussi bon que **b** sur la majorité des critères (condition de concordance)

— **a** n'est pas plus mauvaise que **b** relativement aux autres critères (condition de non-discordance)

A partir de ce graphe de surclassement, on calcule pour chaque solution la *puissance* qui correspond à la somme des indices des flèches issue de la solution divisée par le nombre de solutions diminué de 1, et la *faiblesse* qui est la somme des indices des flèches qui sortent de la solution divisée par le nombre de solutions diminué de 1. On calcule ces flux entrant et sortant de chaque solution à partir d'un degré de préférence Pi. $P_i(a,b)$ est la préférence de la solution **a** comparée à la solution **b** pour le critère i, wi est le poids du critère i et P est la somme des poids des critères $P = \sum w_i$.
$\pi(a,b)$ est l'indice de préférence multicritère de a sur b. Cet indice tient compte de l'ensemble des critères.

$$\pi(a,b) = \frac{1}{P} \sum_{i=1}^{k} w_i \cdot P_i(a,b)$$

On définit la puissance et la faiblesse d'une solution par les relations suivantes :

$$\text{Puissance } \phi^+(a) = \frac{1}{n-1} \sum \pi(a,b)$$
$$\text{Faiblesse } \phi^-(a) = \frac{1}{n-1} \sum \pi(b,a)$$
$$\text{Flux total } \phi(a) = \phi^+(a) - \phi^-(a)$$

A partir de ces flux, on peut établir la relation de surclassement S et d'incomparabilité I.

La solution a surclasse b (aSb) si :

$$\phi^+(a) > \phi^+(b) \; et \; \phi^-(a) < \phi^-(b)$$
$$\phi^+(a) = \phi^+(b) \; et \; \phi^-(a) < \phi^-(b)$$
$$\phi^+(a) > \phi^+(b) \; et \; \phi^-(a) = \phi^-(b)$$

Les solutions a et b sont incomparables (aIb) si

$$\phi^+(a) = \phi^+(b) \; et \; \phi^-(a) = \phi^-(b)$$

IV.4.1.1 La notion de préférence

La méthode Prométhée propose d'associer une limite de préférence, une limite d'indifférence et une fonction de préférence à chaque critère de décision (fig. IV.6).

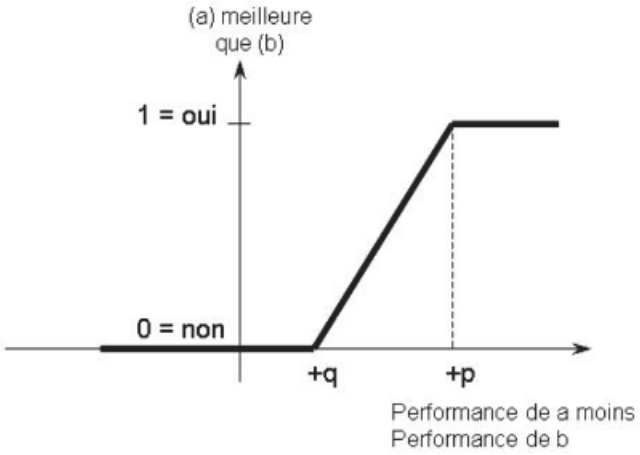


Figure IV.6 – Notion de préférence dans la méthode Prométhée

La différence entre la performance de **a** et la performance de **b** est représentée sur l'axe des abscisses. On définit un seuil de préférence p, à partir duquel l'écart entre la valeur des solutions est important et un seuil d'indifférence q, en deçà duquel l'écart entre la valeur des solutions est jugé trop faible pour avoir une signification.

La méthode Prométhée propose six types de fonction critère (fig. IV.7) : un critère usuel, un critère en U, un critère en V, un critère à pallier, un critère linéaire et un critère gaussien.

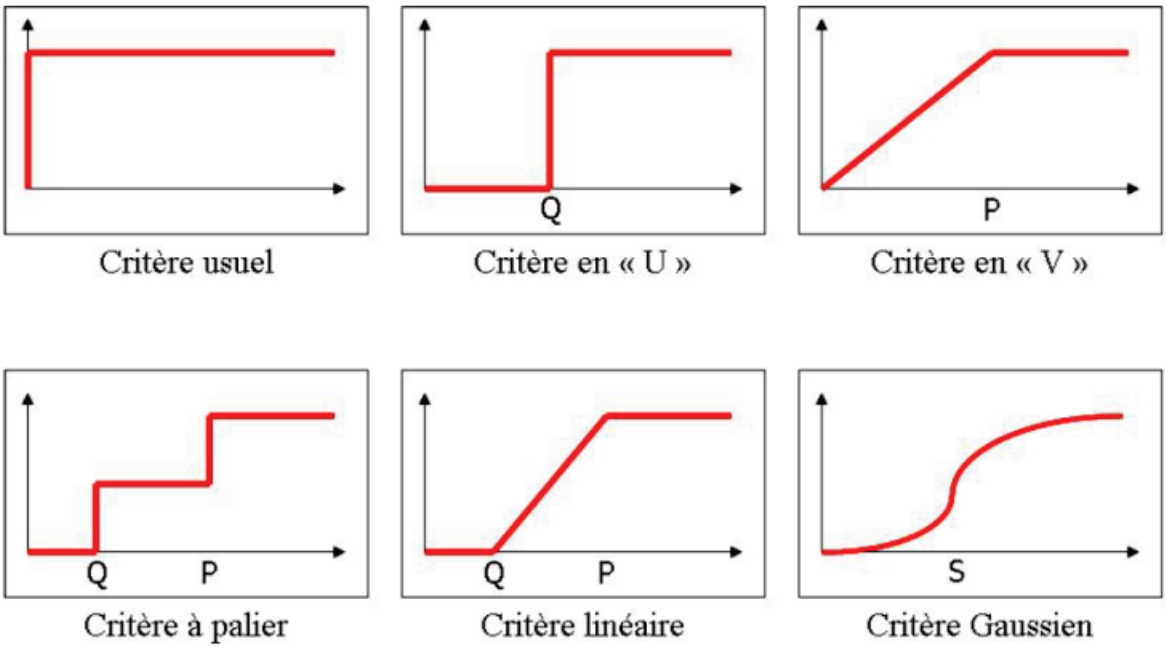


Figure IV.7 – Fonctions critères dans la méthode Prométhée

IV.4.1.2 Les étapes de la méthode Prométhée

1. Calculer la distance entre la solution a et la solution b : $d_i = f_i(a) - f_i(b)$ pour tous les critères i.
2. Calculer la fonction de préférence $P_i(a, b)$
3. Calculer l'indice de préférence multicritère $\pi(a, b)$
4. Calculer la puissance $\phi^+(a)$ et la faiblesse $\phi^-(a)$ de chaque solution
5. Calculer le flux total $\phi(a) = \phi^+(a) - \phi^-(a)$ pour toutes les solutions

Le flux total nous permet d'établir le graphe de surclassement entre les solutions.

IV.4.1.3 Exemple d'application de la méthode Prométhée

Prenons le cas de l'introduction d'un nouveau produit avec un nouveau processus de fabrication à définir. Cela veut dire que, soit il n'y a pas de processus existant dans l'usine, soit les solutions de reconfiguration ne sont pas faisables ou satisfaisantes. Deux choix (Sol 1 et Sol 2) s'offrent au chef de projet :

— Solution 1 : Un processus d'assemblage standard déjà connu

— Solution 2 : Un processus d'assemblage dont les performances sont intéressantes mais pour lequel il n'y a pas de retour d'expérience.

Des valeurs de préférence (Pref) peuvent être quantifiées entre 0 et 1 (voir les colonnes à droite du tableau) : 0 lorsque l'écart des scores est en-deçà de la limite d'indifférence, 1 lorsque la différence est au-delà de la limite de préférence.

Préf	Ecart	Sol 1	Critères	Sol 2	Ecart	Préf
1,0	-2	4	Nb robot	6		0,0
		4	Flexibilité	6	+ 2	1,0
		L ou D	Fonctionnement	L		
1,0	+10	40	Capacité maxi	30		0,0
0,5	- 0,27	1,32	Investissement	1,59		0,0
0,5	-0,16	4,14	Coût de reconfiguration	4,3		0,0

Tableau IV.2 – Exemple de matrice de décision : configurations du processus

L correspond à un mode de fonctionnement par lot et D correspond à un mode de fonctionnement à la demande. Le coût de reconfiguration correspond à l'investissement supplémentaire pour l'ajout de véhicules sur la ligne.

En ce qui concerne les préférences, on s'est fixé 1 comme limite de préférence pour le critère nombre de robots, 1 comme limite d'indifférence pour le critère flexibilité, 5 comme limite de préférence pour le critère capacité maximum atteignable. Le détail des limites de préférence et d'indifférence est synthétisé dans le tableau suivant (Tab. IV.3)

Critère	Limite de préférence	Limite d'indifférence
Nombre de robot	1	0
Flexibilité	0	1
Capacité	5	0
Investissement	0,3	0,05
Coût de reconfiguration	0,2	0,05

Tableau IV.3 – Limites d'indifférence et de préférence

IV.4.2 Synthèse des solutions pour la prise de décision

La synthèse des résultats de l'évaluation permet au décideur de faire son choix. Pour ce faire, nous avons opté pour deux types de représentation : le plan Gaia et la courbe coût-efficacité des solutions.

IV.4.2.1 Le plan GAIA

Le plan GAIA (Graphical Analysis for Interactive Assistance) est une approche descriptive d'aide à la décision associée à la méthode Prométhée [Brans 05]. Elle fournit au décideur une visualisation des principales caractéristiques d'un problème de décision.

En effet, elle permet d'identifier les conflits entre les critères, d'identifier des groupes de solutions, de mettre en évidence les profils de performances et d'établir des compromis. Pour ce faire, il propose de réduire l'aspect multidimensionnelle d'une évaluation multicritère par une analyse en composante principale (ACP).

Construction du plan GAIA Le plan Gaia est construit sur la base d'une analyse statistique en composantes principales où les flux de préférences sont évalués séparément pour chaque critère. Les critères sont représentés comme des vecteurs partant du point origine du plan. Les alternatives de solutions sont représentées par des points. Un vecteur de poids des critères est représenté par vecteur à sommet rond (fig.IV.8).

L'axe des abscisses U représente le premier composant principal. Il contient le maximum possible d'informations. L'axe des ordonnées V représente le deuxième composant principal. Il contient des informations additionnelles orthogonal à l'axe U. Dans certains cas, un troisième composant principal W est proposé pour améliorer l'analyse si la qualité de la représentation 2D n'est pas bonne.

Interprétation du plan GAIA La position des critères et des solutions sur ce plan (longueur, la distribution, projection) permet de faire différentes analyses de performance.

Analyse des critères-vecteurs

Deux vecteurs parallèles dans la même direction signifient que ces deux critères sont parfaitement corrélés sur l'ensemble des solutions évaluées. Deux vecteurs opposés veulent dire que ces critères sont antagonistes. L'amélioration de l'un se fera au détriment de l'autre.

La longueur d'un vecteur correspond à la sensibilité du critère dans l'évaluation globale d'une solution. Un petit vecteur signifie que toutes les solutions présentent des performances similaires pour ce critère. Ce dernier influence très peu le classement de la méthode Prométhée quel que soit le poids que l'on affecte à ce critère.

La distribution des critères reflète la préférence de l'acteur via les critères généralisés : les critères ayant une préférence semblable sont orientés dans la même direction, les critères conflictuels s'opposent et les critères indépendants sont orthogonaux. La distribution des critères reflète la préférence de l'acteur via les critères généralisés : les critères ayant une préférence semblable sont orientés dans la même direction, les critères conflictuels s'opposent et les critères indépendants sont orthogonaux.

Analyse des solutions-points

L'orientation d'une solution par rapport à un critère détermine l'impact positif ou négatif du critère sur la solution. Quand un critère pointe en direction d'une action, cette

action a une bonne performance sur ce critère, une relativement bonne performance sur les autres critères pointant dans la même direction et une mauvaise performance sur les critères opposés.

La proximité entre deux points signifie un profil de performance similaire entre les solutions qu'ils représentent. Une distance importante par contre, signifie un profil de performance très différent. Les actions distribuées à l'extrémité du plan ont les meilleures performances sur les critères pointant dans leur direction. Les actions distribuées à proximité de l'origine peuvent être interprétées comme de bons compromis en cas de critères conflictuels.

La projection orthogonale d'une alternative (points en forme de carré) sur la direction d'un critère (vecteur en forme de losange) détermine la valeur d'un flux net (puissance moins faiblesse IV.4.1). Par conséquent, il est possible de déterminer rapidement les puissances et les faiblesses des solutions par projection successive sur les critères. Ces projections peuvent supporter de manière quantitative les avantages et inconvénients de chaque solution vis-à-vis des critères utilisés.

Exemple de plan GAIA La figure IV.8 présente une synthèse d'évaluation pour l'exemple d'évaluation présenté dans le tableau IV.2. Deux configurations d'un processus d'assemblage sont comparées en fonction du nombre de robots, de leur flexibilité, du mode de fonctionnement, de la capacité maximale, du coût d'investissement initial et du coût de reconfiguration.

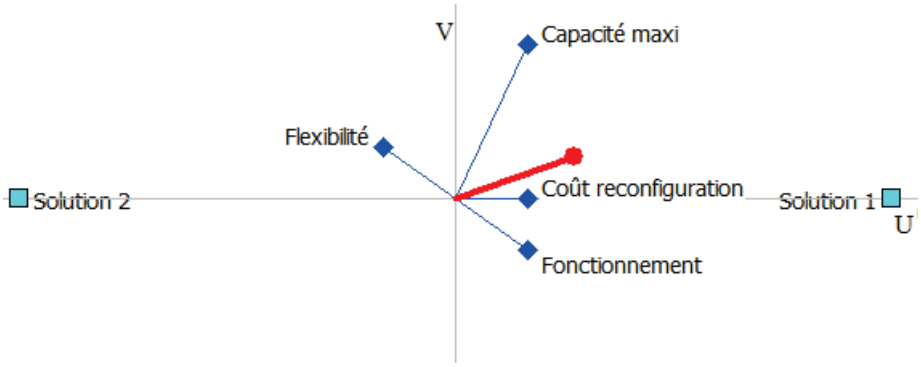


Figure IV.8 – Exemple de plan Gaia

L'orientation des vecteurs de critères vers la solution 1 montre qu'elle fournit une capacité maximale, avec un coût de reconfiguration moindre et un mode de fonctionnement adaptable. Par contre, la solution 2 est nettement meilleure en termes de flexibilité. L'orientation du vecteur préférence (vecteur en gras) sur 360° permet de définir la préférence globale par rapport à l'ensemble des critères.

Etant donné que le plan est construit par une approche statistique, une partie de l'information est perdue lors de cette approximation. La qualité de l'approximation est

fournie par un paramètre Delta (D compris entre 0 et 100%) qui mesure le degré d'explication statistique. Ce paramètre donne une idée de la fiabilité des interprétations qui sont faites à partir des données du plan. Une valeur de D supérieur à 90% signifie que la qualité de la mise en plan est bonne.

IV.4.2.2 Courbe coût-efficacité

La courbe coût-efficacité présente l'avantage de représenter les solutions sur deux dimensions : le coût et l'efficacité de la solution. Le coût est un critère primordial car il impacte directement la rentabilité du projet. L'efficacité d'une solution correspond à la capacité de la solution à reconfigurer la ligne à moindre effort. Cet effort est relatif à l'importance des modifications à intégrer et implique des délais d'arrêts, de travaux et de redémarrage d'une ligne de production. Dans la méthode de réparation de planning présenté dans le chapitre précédent (§. III.2.2), l'efficacité d'une solution correspond à la capacité de la solution à absorber la perturbation. Dans notre cas, l'efficacité peut être représenté par l'inverse de l'effort de reconfiguration. Cet effort correspond au coût et au délai des modifications à mettre en œuvre pour une solution donnée.

$$Efficacité = 1 \ / \ \text{Effort de reconfiguration}$$

La figure IV.9 présente une courbe générique de coût-efficacité. Une solution peut être insuffisante, c'est à dire qu'elle nécessite beaucoup d'effort de reconfiguration. Une solution peut être "optimale" dans le sens où elle domine les autres solutions du point de vue du rapport coût-efficacité. Une solution peut être "onéreuse" si le coût d'investissement est très important par rapport à l'efficacité de la solution. D'autres solutions peuvent apparaitre en cours de projet. C'est le cas de la solution S2' qui implique des risques sur le coût et sur l'efficacité.

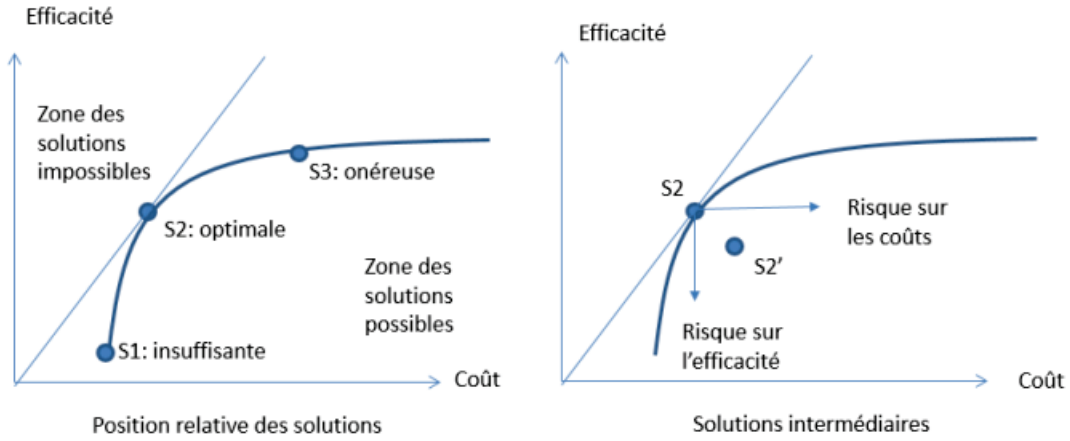


Figure IV.9 – Courbe de coût-efficacité

En conclusion, cette section sur la synthèse des solutions a proposé une représentation multidimensionnelle basée sur le plan GAIA et sur une courbe coût-efficacité des solutions de reconfiguration. Le plan GAIA permet de visualiser sur un plan 2D l'ensemble des critères et des solutions pour faire des analyses et des compromis sur les choix à faire. La courbe coût efficacité permet de ramener à deux dimensions l'ensemble des critères. Ces deux dimensions correspondent aux principaux points de vue qui répondent aux besoins des décideurs en phase avant-projet d'industrialisation. Cette synthèse des solutions permettra au décideur de faire un choix argumenté pour la suite du projet.

IV.5 Conclusions

L'objectif de ce chapitre est de proposer une méthode d'évaluation des solutions de reconfiguration de ligne de production qui soit applicable en avant-projet d'industrialisation. Pour cela, des critères d'évaluation pertinents sont identifiés. Ces critères sont classés selon les points de vue métier et projet.

Une synthèse des performances sous forme de matrice de décision permet d'un point de vue métier de proposer aux concepteurs les inducteurs sur lesquels agir pour améliorer un critère de performance. La synthèse des performances pour le point de vue projet nécessite par contre une vue plus globale des solutions étudiées. Pour ce faire, une approche d'évaluation multicritère à base de surclassement (Promethée) est proposée. Concernant la synthèse des choix, une courbe de coût / efficacité est proposée pour la représentation synthétique de l'ensemble des solutions. Cette représentation permet de positionner les différentes solutions entre elles sur deux dimensions. Ensuite, le plan Gaia proposé par la méthode Prométhée est utilisé pour une analyse plus détaillée de la décision. Ce plan permet une bonne représentation sur un plan 2D d'une analyse multidimensionnelle.

Ce chapitre a abordé l'évaluation d'un ensemble de solutions de reconfiguration d'une ligne de production. L'évaluation propose au décideur un surclassement entre les solutions en fonction d'une préférence qui a été construite à partir des critères métier et projet. La synthèse de l'évaluation selon plusieurs points de vue permettra une prise de décision rationnelle et argumentée. Une fois une configuration choisie, l'étape suivante consiste à modéliser le processus de fabrication correspondante à cette nouvelle configuration. Le chapitre suivant présente une approche de revue d'étude permettant de valider la configuration future du processus de fabrication retenu.

Chapitre V

Proposition d'un processus de revue numérique de ligne de production

"l'imagination importe plus que la connaissance." (Albert Einstein)

Résumé

Ce chapitre présente un processus de validation numérique d'une configuration de ligne de production. Ce processus se base sur une maquette numérique d'atelier permettant de réaliser des revues d'étude dans les phases amont d'un projet d'industrialisation. On s'intéresse plus particulièrement à la préparation des données permettant d'obtenir un modèle virtuel de l'atelier et au déroulement d'une revue d'étude avec le processus proposé. L'intérêt de ces revues est de permettre aux équipes projet/métier de détecter au plus tôt les problèmes potentiels liés au développement, à l'intégration et au démarrage de la ligne de production.

Sommaire

V.1 Revue d'étude industrielle 120

V.1.1 Objectifs d'une revue d'étude industrielle 120

V.1.2 Importance des représentations intermédiaires 121

V.1.3 Proposition d'un processus de revue numérique d'atelier 122

V.1.4 Expérimentations préliminaires 125

V.2 Préparation d'une revue numérique d'atelier 126
V.2.1 Import des données 127
V.2.2 Modification de l'architecture d'implantation d'atelier 128
V.2.3 Modification de la configuration d'une ligne de production . . . 130
V.3 Déroulement d'une revue numérique d'atelier 131
V.3.1 Revue globale d'architecture d'implantation d'atelier 131
V.3.2 Revue détaillée d'une configuration de ligne de production . . . 132
V.3.3 Constats et détection des interférences 134
V.4 Conclusions 135

Dans le chapitre III, plusieurs solutions permettant de faire évoluer la configuration d'une ligne de production sont identifiées. Dans le chapitre IV, ces solutions sont évaluées puis comparées entre elles pour permettre au décideur de faire son choix. En fonction de ce choix, une validation est nécessaire pour consolider et justifier cette décision afin de passer à la phase de développement et aux études détaillées. Plusieurs étapes de validation sont positionnées à différents étapes du projet. En fin de phase d'avant-projet, une validation de l'architecture d'implantation et de la configuration du processus d'assemblage est effectuée pour passer à la phase de développement du projet. Dans la phase de développement, deux étapes de validation sont positionnées : une étape pour passer à des études détaillées et une étape pour passer à la phase de réalisation d'outillages. Dans ce travail on s'intéressera à l'étape de validation des études d'avant-projet pour passer à la phase de développement et à l'étape de de validation de ces développements pour passer à des études plus détaillées.

Les revues d'étude sont des phases critiques du développement du système car elles préparent le passage d'un jalon bien donné du projet. Elles permettent de valider un concept d'implantation d'atelier et les principes généraux de fonctionnement du système industriel. Cette démarche vise à valider les évolutions nécessaires du processus et des moyens de fabrication avant leur mise en œuvre. A l'issue d'une revue d'étude, des constats permettent de synthétiser le résultat des études et de contrôler plusieurs points qui peuvent être bloquants lors de l'intégration des moyens dans l'usine (Montabilité des outillages, ergonomie ...). Elle permet également de comparer les configurations du processus d'assemblage avant et après les modifications.

A ce jour dans le département assemblage tôlerie de Renault, le processus de revue d'étude n'est pas formalisé dans le cadre d'un partage pour l'analyse des solutions industrielles autour d'une maquette numérique d'atelier. Actuellement, ces revues d'études se font en fin de phase de développement et se focalisent sur les outillages et la faisabilité des opérations d'assemblage. Les constats se font sur la base de documents (Feuille de calcul, présentation, check list) qui expliquent les principes d'implantation de chaque partie du système. L'objectif de l'étape de validation dans notre approche consiste à étendre cette description textuelle du processus d'assemblage par des modèles numérique exploitable en avant-projet. Les revues d'études auront donc pour objectif de valider la configuration du système de production en se basant sur des modèles réalistes du système.

L'objectif de ce chapitre est de proposer un processus de validation de l'architecture d'implantation et de la configuration d'une ligne de production en se basant sur une maquette numérique la plus représentative possible lors de revues d'études. Pour cela, la première étape consiste à modéliser le processus de fabrication choisi dans l'étape d'évaluation afin de préparer la revue d'étude. Un système de gestion des données process (MPM : Manufacturing Process Management) est nécessaire pour agréger l'ensemble des

données. On se focalisera sur l'étape de préparation des données, le déroulement d'une revue et la synthèse qui peut ressortir de ces revues. La synthèse fait état des problèmes identifiés et des discussions qu'ils ont suscités entre les différents métiers lors de ces revues.

Dans le cadre d'une étude prospective sur l'intégration d'un système de gestion des processus de fabrication (MPM : Manufacturing Process Management), nous avons contribué à l'étude de la mise en place de ce processus de revue numérique d'atelier. Cette revue d'étude permet de valider la solution retenue à différents jalons du projet.

La première section présente quelques généralités sur la pratique des revues d'étude industrielles. La deuxième section détaille les étapes de préparation de données numériques à travers l'import de données, la modification de l'architecture d'implantation et la modification de la configuration d'une ligne de production. La troisième section présente un scénario de déroulement d'une revue d'étude basée sur la maquette numérique d'atelier. Ce scénario permet de montrer comment ce processus de revue permet de détecter au plus tôt les interférences entre les métiers afin d'y remédier avant la réalisation des moyens de production.

V.1 Revue d'étude industrielle

Cette section présente quelques généralités sur les revues d'études industrielles et leurs pratiques dans l'industrie. Quels sont leurs objectifs ? quelles sont les données d'entrée et de sortie ? Une utilisation d'un modèle numérique d'atelier est proposée comme support de ces revues d'études. Nous décrivons la nature de ce modèle 3D, ses différentes utilisations et l'avantage d'un processus de revue d'étude basé sur ce modèle.

V.1.1 Objectifs d'une revue d'étude industrielle

L'objet des revues d'études est de valider les principes généraux d'une configuration de ligne selon plusieurs vues métiers (Implantation, flux logistiques, processus d'assemblage, automatismes, sécurité, fiabilité, accessibilité, ergonomie). Ces revues d'étude correspondent à un jalon projet appelé "accord préliminaire de principe (APP)". Elles consistent à :

— Identifier les risques encourus par le non-respect des standards pour chaque métier

— Mettre en évidence les principes de fonctionnement retenus

— Assurer la cohérence avec les normes métiers

— Mettre en place les plans d'actions associés

Le processus de revue d'étude fait intervenir différents acteurs du projet. Nous nous sommes intéressés aux points de vue de 3 acteurs : le concepteur mécanicien qui réalise

l'étude du processus d'assemblage. Le concepteur système industriel, qui est chargé de réaliser l'implantation d'une unité de production et d'optimiser les flux d'approvisionnement des pièces aux postes de travail. L'automaticien qui définit les modes de fonctionnement d'une ligne d'assemblage pour les systèmes automatisés.

Cette analyse se déroule en présence de l'équipe projet, des fournisseurs de biens d'équipement, des spécialistes métiers et des représentants de l'usine de fabrication dans le projet. Ces deux rendez-vous permettent ainsi d'éviter les remises en causes tardives et également d'orienter les choix technologiques quand c'est encore possible.

Ces revues de projet se positionnent à des jalons d'avancement d'un projet d'industrialisation. Le premier concerne le choix d'une architecture d'implantation à développer, le deuxième concerne l'étude détaillée d'une configuration du processus d'assemblage, le troisième concerne la validation des études détaillées avant la réalisation d'outillages.

A l'issue de ces revues d'étude, un compte rendu est rédigé dans lequel sont mentionnés les risques identifiés par le groupe de travail, les solutions envisagées et les délais. Par la suite ce compte rendu fait office de tableau d'avancement des actions. On s'assure également à l'étape suivante que les actions ont été soldées sinon elles sont consignées à nouveau comme étant des points durs.

V.1.2 Importance des représentations intermédiaires

Les représentations intermédiaires de conception permettent de formaliser les états de maturité du système à plusieurs étapes du développement [Mer 95] [Scaravetti 04]. Les différentes architectures d'implantation, leurs déclinaisons et les vues particulières sont des représentations intermédiaires d'un système industriel. Chaque acteur du projet peut interagir et confronter son point de vue métier avec celle des autres (Implantation, assemblage, logistique, automatisme). Ces représentations intermédiaires peuvent être des plans, maquettes, prototypes physiques ou numériques. Vu la difficulté de réaliser des maquettes physiques et la difficulté d'intervenir sur le système réel, des représentations aussi précises que possibles sont nécessaires pour un meilleur déroulement des études.

L'importance de ces représentations intermédiaires pour la prise de décision a été étudiée dans le contexte d'une conception collaborative et pluridisciplinaire [Yannou 08b]. Les décisions du groupe de valider ou non certains aspects du système lors de revues d'études dépendent de la qualité de cette représentation intermédiaire. En effet elle permet de partager les solutions technologiques retenues et d'identifier certains conflits entre métiers.

V.1.3 Proposition d'un processus de revue numérique d'atelier

Un modèle numérique d'atelier consiste en un ensemble de représentations hétérogènes du système (Implantation, processus, flux, automatismes). Les données nécessaires à cette validation proviennent de différents systèmes d'information et différents acteurs. L'hétérogénéité des outils logiciels utilisés ne permet pas une modélisation plus globale du système de production (produit, processus, ressources) afin d'analyser la faisabilité et les performances des solutions. Les conflits entre les métiers sont identifiés tardivement et leur résolution nécessite du temps d'étude supplémentaire et engendre des surcoûts au projet. Ces conflits apparaissent plus particulièrement entre les métiers de l'implantation les métiers de la conception process.

Dans l'industrie automobile, la revue d'étude numérique est principalement appliquée à la conception du produit. L'idée consiste à transposer ce processus à l'analyse et la validation d'un système industriel.

L'objectif d'une revue numérique d'étude industrielle consiste à synchroniser les acteurs qui contribuent à la performance d'un système industriel autour d'une même hypothèse afin d'identifier au plus tôt les problèmes qu'on peut anticiper.

Le concept de DLOT (Digital Lot) [Feno 15b] ou lot de données numérique est proposée comme étant une représentation intermédiaire du système industriel. Il sert à valider la performance d'une implantation et d'une configuration du système d'assemblage de manière collaborative. Par analogie aux principes de validation numérique d'un produit (ex : revue de design et d'architecture d'un véhicule), les évolutions d'un système industriel nécessitent un suivi et une analyse des différentes solutions à étudier.

La figure V.1 montre l'exemple d'un modèle numérique d'atelier à un état de maturité de concept d'atelier préliminaire. Cette représentation intermédiaire permettra à un jalon donné du projet de valider ce concept avec une meilleure appréhension de son architecture et des configuration possibles de la ligne de production.

V.1.3.1 Description d'un modèle numérique d'atelier : DLOT Process

Une "DLOT process" est un modèle numérique d'une partie du système industriel associé à un jalon donné d'un projet. Une revue d'étude pour valider un système industriel consiste à agréger et partager un ensemble de données relatives au produit, au processus de fabrication et aux ressources disponibles dans l'usine de fabrication [Mas 13]. Ce lot de données correspond à un état figé des spécifications du système industriel à un jalon donné. Il s'agit donc de phases de convergence interdisciplinaire lors desquelles différents acteurs vont valider une solution vis à vis de leur métier.

Le modèle numérique d'atelier est un modèle "intelligent" dans le sens où chaque

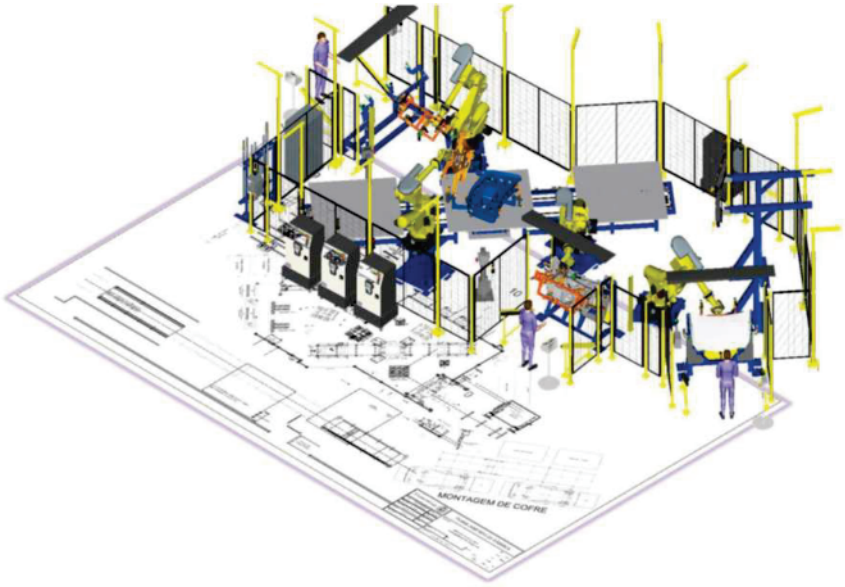


Figure V.1 – Modèle numérique d'atelier DLOT

objet instancié dans le modèle correspond bien à un équipement existant dans les bases de données de l'entreprise. Un simple clic sur un équipement permet d'avoir des informations sur ses caractéristiques (dimensions, poids, performances techniques ...). Ce modèle permet d'avoir plusieurs points de vue en fonction des acteurs métier (implantation, processus d'assemblage, automatisme). Pour cela une description utilisant des niveaux et des couleurs permet de découper un atelier de production en plusieurs périmètres.

La figure V.2 présente un modèle de donnée d'un projet représentant différents concepts autour d'une revue d'étude process.

Plusieurs produits peuvent être fabriqués dans l'*usine* d'industrialisation. Un *projet* correspond au développement d'un produit à travers des phases d'études délimités par des *jalons*. A chaque jalon une revue d'étude est nécessaire pour valider la maturité du projet. La *DLOT* process représente un état figé de la spécification du système industriel à un jalon donné. Des *conflits* correspondant au non-respect de règles métiers peuvent ainsi être identifiés durant la revue d'étude. Différentes "tâches" d'ingénierie sont ainsi déclenchées pour résoudre les conflits identifiés. Les livrables peuvent concerner des modifications sur l'implantation, les flux, l'affectation des opérations aux postes...

V.1.3.2 Processus de revue numérique d'atelier DLOT

Le processus de revue numérique d'atelier est positionné avant les passages de jalon du projet d'industrialisation. Le premier jalon concerne la validation des études d'avant-projet pour passer au développement. Le deuxième jalon concerne la validation des études

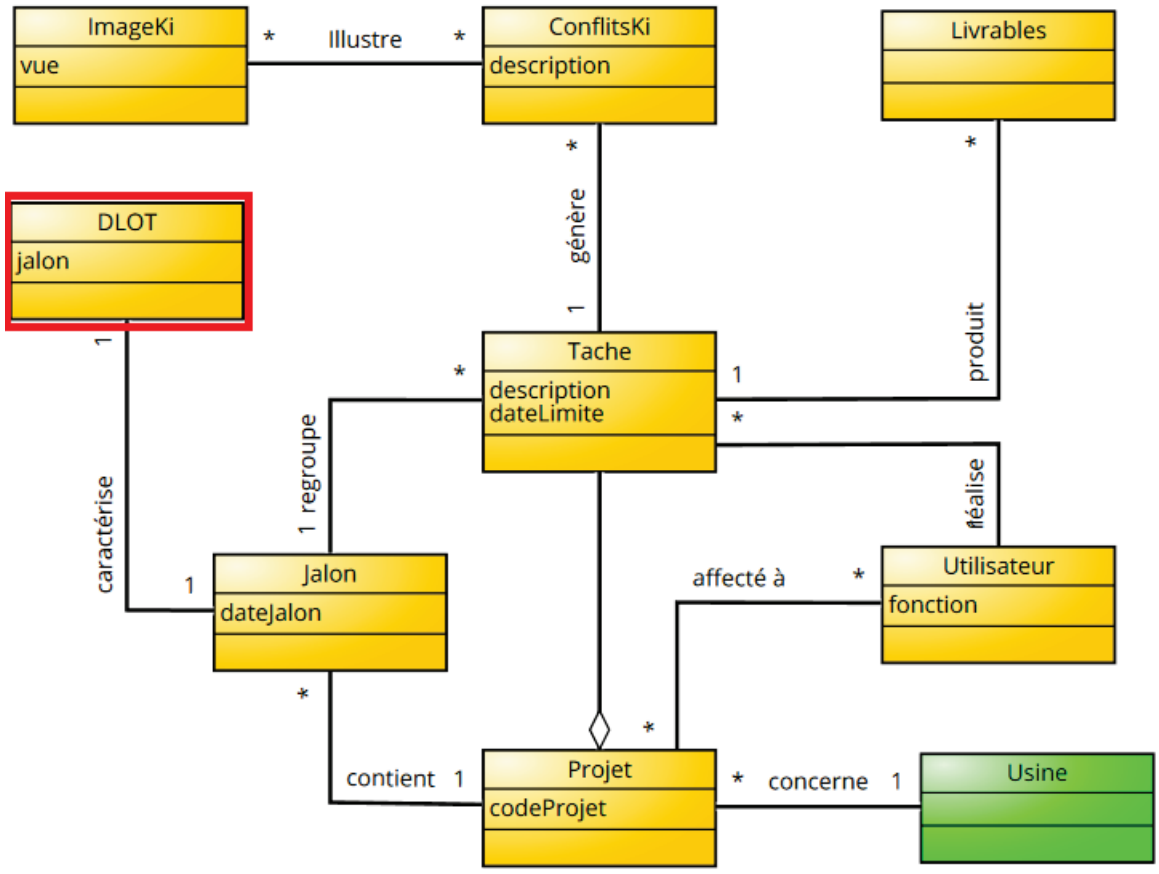


Figure V.2 – Modèle de données d'une revue numérique DLOT

détaillées.

Le processus contient les étapes communes suivantes :

— Une étape de figeage du contexte d'étude correspondant à la solution retenue à valider.

— Une phase de convergence pour reconstituer l'environnement numérique de l'atelier.

— Une phase de revue numérique.

— Une phase de validation et de résolution des problèmes.

La phase de convergence permet de préparer la revue d'étude. Il s'agit d'importer l'ensemble des données nécessaires pour la revue. La phase de revue correspond au déroulement de la revue numérique sur les différentes parties de l'atelier.

V.1.3.3 Avantages de l'utilisation d'un modèle numérique d'atelier

Les principaux avantages de l'utilisation d'un modèle numérique d'atelier pour la revue d'étude industrielle concernent le gain de temps lors de la définition et la mise au point des moyens de production.

Les données sont disponibles dans une même base de données et sont consultables à tout moment. Cela permet d'avoir un modèle commun qui sera partagé par tous les métiers concernés. Le modèle permet d'avoir une vision globale d'un périmètre de la ligne de production. En fonction de l'outil de gestion de données, des fonctions d'extraction de plans ou de nomenclatures peuvent être mis en place.

Les différentes versions du modèle numérique reflètent également les évolutions des études, ce qui permet une traçabilité des décisions prises aux différents jalons du projet.

Le modèle numérique permet de détecter au plus tôt les problèmes liés au développement, à l'intégration et au démarrage de l'outil de production. Il s'agit principalement d'interférences entre les équipements qui sont définis par différents acteurs. Ces interférences sont difficilement mises en évidence ; de ce fait, une mise en commun des données de chaque acteur métier est nécessaire.

V.1.4 Expérimentations préliminaires

Deux séries expérimentales ont été menées pour valider le principe et le processus d'une revue numérique d'un système industriel. La première série s'intéresse à la préparation des données nécessaires pour la revue d'étude et la deuxième série s'intéresse au déroulement de la revue d'étude.

V.1.4.1 Préparation d'une revue d'étude numérique d'atelier

La première consiste à mettre en œuvre dans un outil de gestion de processus de fabrication le processus de préparation de la revue d'étude. Cette preuve de concept permet mettre en évidence l'ensemble des fonctionnalités de l'outil logiciel. Un scénario d'utilisation comprenant les étapes suivantes a été défini :

— Import de données : plans d'implantation, cellules robotisées,

— Modélisation de la gamme d'assemblage

— Déroulement d'une revue statique et dynamique du processus d'assemblage

— Gestion des problèmes identifiés et des modifications

V.1.4.2 Simulation du déroulement d'une revue numérique d'atelier

La deuxième série expérimentale consiste à simuler une revue d'étude de la zone de chargement d'une ligne d'assemblage de côtés de caisse de véhicule. L'objectif est de reconstituer la maquette numérique du processus d'assemblage et plus particulièrement du poste de chargement pour en étudier les principes de fonctionnement et réaliser des constats visuels. L'idée consiste à partager une maquette numérique d'atelier la plus

réaliste possible représentant l'état futur de la ligne de production. A l'aide d'un outil de visualisation, chaque métier doit pouvoir :

— Naviguer dans la maquette numérique à différents niveaux de l'atelier (Ligne, Poste de travail)

— Coter les distances, réaliser des annotations et enregistrer différentes prises de vue

— Animer les cinématiques pour comprendre les modes de fonctionnement (Trajectoire, déplacement opérateur, ergonomie, mode approvisionnement)

— Réaliser des analyses de collision en propageant des gabarits 3D sur une trajectoire (Ex : passage de transpalette de maintenance pour changer une pince de robot, passage d'un conteneur dans un aménagement de poste)

Ces deux expérimentations préliminaires ont permis d'une part d'évaluer l'apport de la démarche en termes d'amélioration de la convergence multidisciplinaire et en termes d'identification précoce des problèmes liés au développement, à l'intégration et au démarrage des moyens de production. D'autre part, elle a permis d'évaluer l'impact de la démarche sur l'acceptabilité des utilisateurs afin de déterminer si la méthodologie proposée est viable pour une utilisation industrielle en projet.

V.1.4.3 Synthèse

Dans cette section, nous avons abordé la revue d'étude industrielle une suite de phases de convergence permettant de consolider et valider une configuration de ligne de production. Les représentations intermédiaires ont un rôle important pour le bon déroulement de ces revues. Nous avons proposé d'étudier, dans le cadre d'une étude prospective d'implémentation d'un outil de gestion de processus de fabrication (MPM), un processus de revue d'étude qui se base sur une maquette numérique de l'atelier. La section suivante s'intéresse à la préparation d'une revue d'étude numérique en vue de reconstituer l'environnement virtuel de l'atelier.

V.2 Préparation d'une revue numérique d'atelier

La préparation d'une revue d'étude consiste à reconstituer l'environnement virtuel de l'atelier à partir de l'ensemble des données sur la configuration existante et la configuration future souhaitée. La première étape consiste à importer l'ensemble de ces données dans un outil de gestion des processus de fabrication (MPM). La deuxième étape consiste à déployer l'ensemble des modifications à réaliser sur l'architecture d'implantation et la configuration de la ligne de production.

V.2.1 Import des données

L'import des données est une étape importante dans la préparation de la revue d'étude. La qualité des études dépend de l'exhaustivité et de la qualité des données d'entrée. En effet, les plans d'implantation doivent par exemple refléter fidèlement l'architecture d'implantation réelle et à jour de l'usine.

Etant donné que ces données d'entrée proviennent de différents systèmes d'information, il est important que lors de la préparation de la revue, chaque métier puisse retrouver la bonne version de l'étude correspondant à la solution qui sera étudiée. La figure V.3 montre l'ensemble des données d'entrée d'une revue industrielle. Ces données proviennent principalement des études d'implantation, de dimensionnement, de flux de processus, de faisabilité et d'engagement des opérateurs. Cela montre un besoin d'intégrer l'ensemble des données des différents métiers pour reconstituer l'environnement numérique du processus de fabrication.

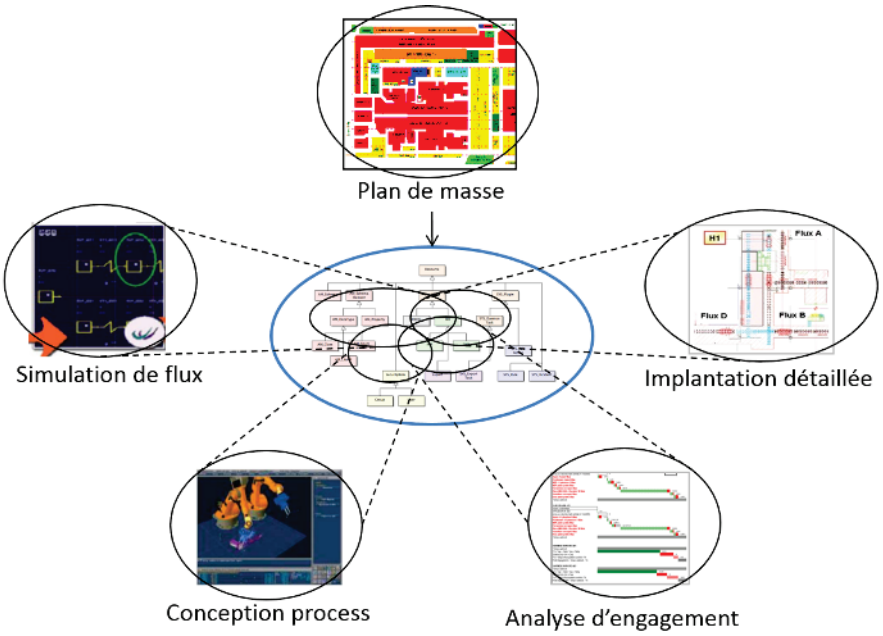


Figure V.3 – Données d'entrée d'une revue numérique d'atelier

Plusieurs types de données sont nécessaires pour reconstituer l'environnement numérique de l'atelier ou d'un périmètre de l'atelier. Les principales données d'entrée sont :

— Les données concernant le produit à assembler : il s'agit pour une unité de production donnée de la structure des pièces fabriquées par cette unité de production. Les variantes de produit ont un processus d'assemblage différent. Les données *produit* décrivent les entités relatives à la structure des produits à fabriquer.

— Les données concernant le processus d'assemblage : il s'agit de la gamme opératoire

permettant l'assemblage des produits. Les données *process* décrivent la structure du processus d'assemblage.

— Les données concernant l'usine : Il s'agit du plan d'implantation d'atelier, avec la nomenclature des équipements existants. Les données *usine* décrivent la structure des moyens de production existants dans l'atelier.

La structure du produit (BOM : Bill Of Material), la structure du processus d'assemblage (BOP : Bill Of Process) et la structure des ressources de production de l'usine de fabrication (BOE : Bill Of Equipment) sont représentés dans la figure V.4. Nous retrouvons dans la structure du milieu, la gamme d'assemblage permettant d'assembler une pièce du produit. Cette pièce est assemblée sur une ligne correspondant à une usine de fabrication donnée. Chaque opération de la gamme est réalisée dans un poste de travail donné de la ligne (ici une cellule).

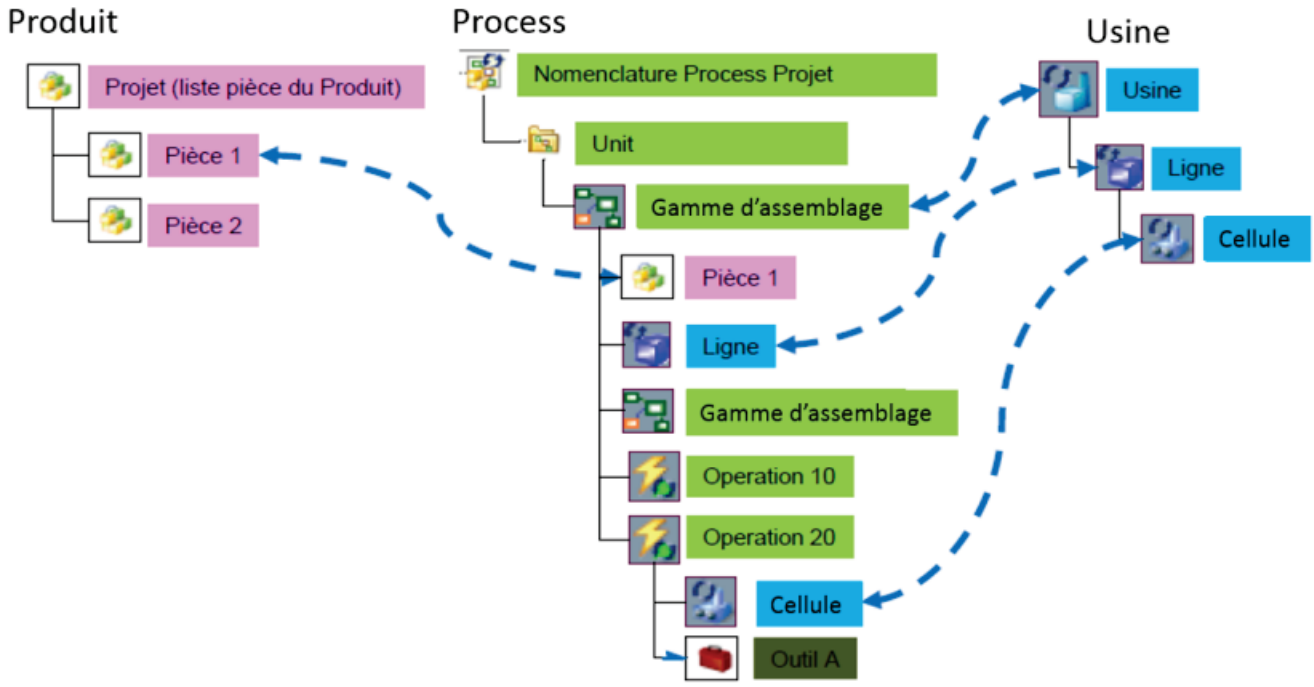


Figure V.4 – Structure des données Produit (BOM), Process (BOP) et Usine (BOE)

V.2.2 Modification de l'architecture d'implantation d'atelier

Maintenant, l'ensemble des données du produit, du processus d'assemblage et des moyens de production de l'usine sont importés dans le système d'information. L'étape suivante consiste à mettre en œuvre l'ensemble des modifications pour constituer l'environnement numérique de l'atelier.

Nous rappelons ici l'ensemble des opérations de reconfiguration identifiées au chapitre III :

— Opérations impactant l'implantation : Déplacement, regroupement, décomposition d'unité de production.

— Opérations impactant la capacité : Ajout, retrait, remplacement, transfert d'une ressource, d'un poste de travail, d'un îlot ou d'une unité de production.

Cette étape consiste à modéliser la gamme d'assemblage permettant de fabriquer le nouveau produit à partir d'une architecture d'implantation existante. La mise en œuvre de ces modifications peut être effectuée dans un environnement MPM qui contient l'architecture d'implantation existante.

Exemple En vue d'introduire un nouveau produit dans une usine existante, on demande d'ajouter une ligne d'assemblage composée de deux îlots de production en série. Le premier îlot existe dans les processus standards de l'entreprise (îlot std2), le deuxième îlot existe et est déjà mis en place dans une autre usine (îlot U2). La modification de l'architecture d'implantation envisagée consiste donc à récupérer une étude standard d'un îlot auquel on met en série un autre îlot de production qui existe déjà dans une autre usine.

Afin de préparer une revue d'étude numérique de cette solution, la modification de l'architecture consiste à libérer de la surface d'implantation puis à ajouter deux îlots à partir de données d'études existantes (fig. V.5). Il s'agit d'implémenter les opérations de reconfiguration de déplacement et d'ajout d'un îlot dans une unité de production.

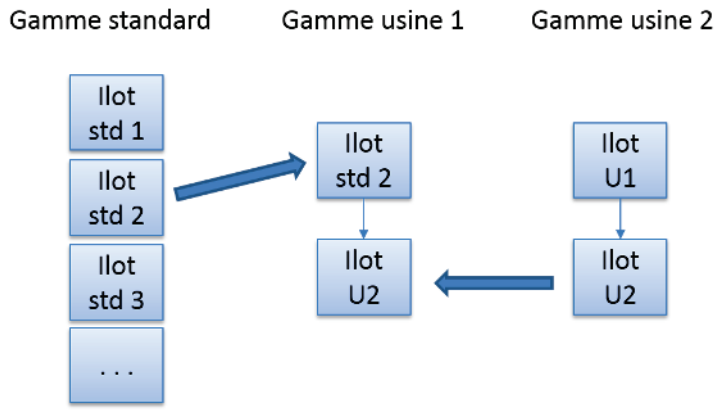


Figure V.5 – Modification d'une architecture d'implantation

Dans l'exemple précédent, l'unité de production comportera deux flux : un premier flux qui comprend l'ensemble des îlots de production existants et un deuxième flux qui comprend les deux îlots que l'on vient d'ajouter. Une étude détaillée de la configuration de ces deux nouveaux îlots est nécessaire pour s'assurer qu'ils permettent de fabriquer à la cadence demandée.

V.2.3 Modification de la configuration d'une ligne de production

A cette étape, l'architecture d'implantation de la ligne est définie. On s'intéresse aux modifications concernant l'affectation des ressources aux postes de travail. Dans un premier temps, il faut charger la configuration existante de la ligne de production. Ensuite, à partir des opérations de reconfiguration identifiées dans l'étape d'analyse, appliquer l'ensemble des modifications à la configuration existante.

Plusieurs fonctions permettent à un concepteur de définir une configuration du processus d'assemblage :

1. Choisir une configuration parmi celles qui sont enregistrées dans la base de données.

2. Définir une configuration à partir d'éléments standards qui sont paramétrés. Cette fonction permet de définir la configuration d'un processus d'assemblage à partir d'un ensemble de modules élémentaires prédéfinis. Un module peut être constitué d'un ou plusieurs postes de travail auxquels sont affectées des ressources.

3. Visualiser une configuration à partir de symboles représentant visuellement chaque élément constituant la configuration.

4. Evaluer une configuration à travers une nomenclature qui se constitue au fur et à mesure que le concepteur ajoute des éléments au processus d'assemblage. Cette nomenclature comprend des fonctions élémentaires de coût permettant de faire une analyse globale du coût d'une configuration. Il est également possible d'ajouter des fonctions élémentaires d'engagement pour une analyse de performance.

Dans la suite de cette étude, nous allons développer la fonction 2 qui permet à un concepteur de définir une nouvelle configuration à partir de modules élémentaires prédéfinis.

La figure V.6 présente une interface permettant de définir une configuration d'un processus d'assemblage (UAR : Unit Arrière) qui correspond à une hypothèse de travail (Hypothèse 1). Cette interface permet de gérer plusieurs hypothèses. Un module process vide ou prédéfini peut être ajouté à cette configuration (Module "A Cx"). Un ensemble de paramètres permet de spécifier en détail les caractéristiques du module. Ces paramètres peuvent concerner les outillages (avec changeur d'outil ou non), les opérateurs etc.

Dans cette section nous avons illustré les étapes de préparation d'une revue numérique d'atelier. La première étape consiste à importer les données nécessaires à l'étude, la deuxième étape consiste à modifier l'architecture d'implantation si besoin et la troisième étape consiste à modifier la configuration de la ligne.

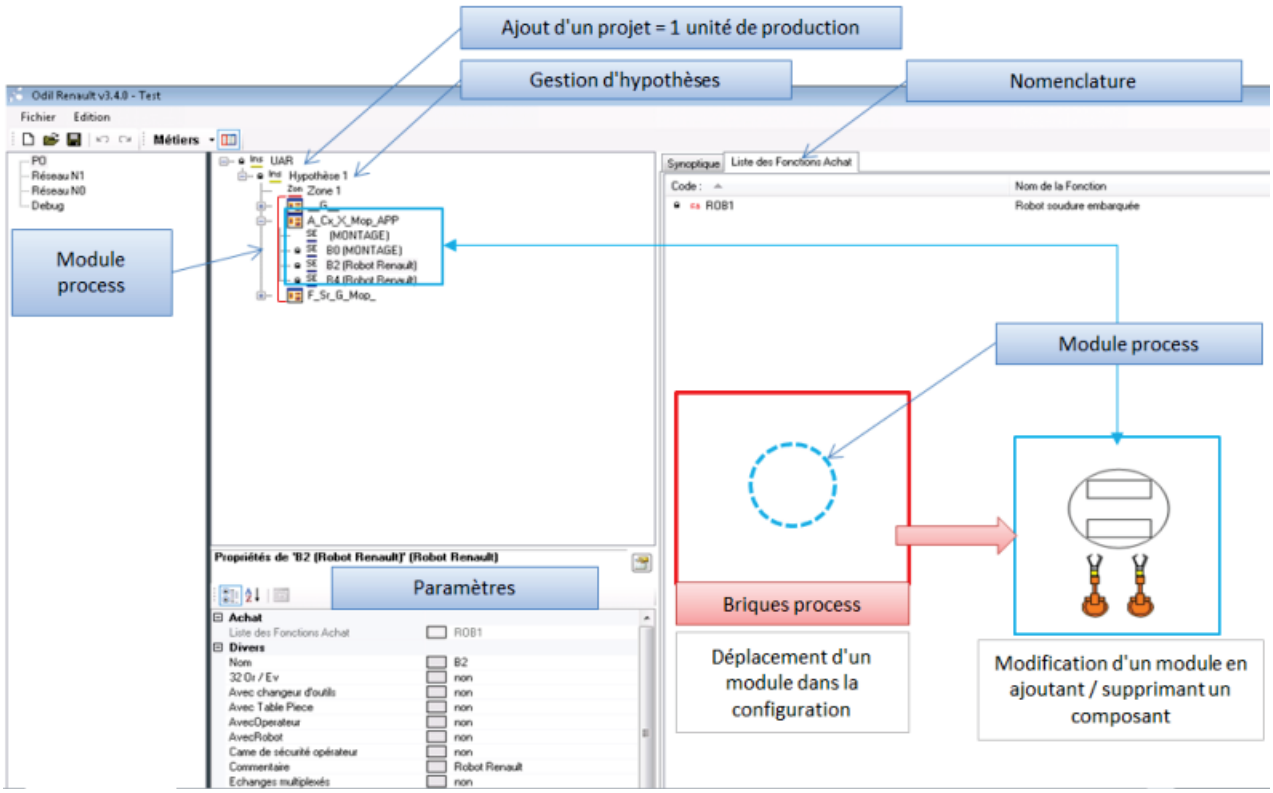


Figure V.6 – Interface de configuration d'un processus d'assemblage

V.3 Déroulement d'une revue numérique d'atelier

Une revue d'étude industrielle commence par une étape de partage de l'architecture d'implantation qui permet d'avoir une vue globale sur tout l'atelier. Ensuite, une revue détaillée permet de se focaliser sur chacune des unités de production. Un constat d'ensemble montrant les problèmes et interférences éventuelles est fait à chaque étape. Enfin, une synthèse des problèmes identifiés lors de la revue est présentée en vue d'une résolution pour la prochaine revue.

V.3.1 Revue globale d'architecture d'implantation d'atelier

Lors d'une revue globale d'architecture d'implantation, trois points sont partagés avec les acteurs métier : l'implantation pour l'occupation des surfaces, les flux de pièces et l'engagement des opérateurs. Cette vision macro de l'atelier permet d'avoir une vue d'ensemble des unités de production. Elle permet également de se focaliser sur une unité de production en particulier en fonction des résultats d'analyses de flux logistiques, d'implantation (Ex : Respect des règles métiers), d'engagement global ou d'ergonomie. Dans l'exemple de la figure V.7, les zones qui seront prochainement disponibles sont marquées pour permettre d'analyser la situation globale de l'implantation au moment de

l'introduction du nouveau produit.

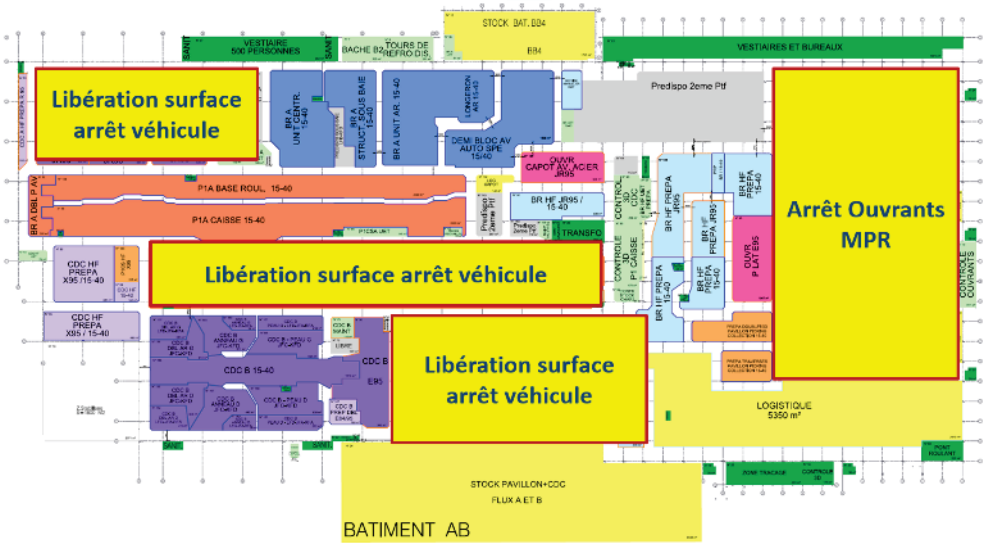


Figure V.7 – Revue globale d'architecture d'implantation d'atelier

Le support numérique (DLOT) de cette revue globale contient le plan de masse (bloc layout) et l'implantation prévisionnelle de l'étude. Un format de données permettant l'échange entre l'implantation et les outils de conception de processus est nécessaire pour la lecture des données. Le format jt [1] est a été étudié pour la première série expérimentale.

V.3.2 Revue détaillée d'une configuration de ligne de production

La revue détaillée d'une configuration de ligne de production permet de se focaliser sur une unité de production en particulier. Elle consiste à revoir en détail l'ensemble des postes de travail et les ressources qui y sont affectées. En fonction des données disponibles, deux modes de revue détaillée permettent de valider une unité d'assemblage : une revue statique et une revue dynamique.

V.3.2.1 Revue statique

La revue statique s'intéresse à l'agencement des postes de travail et à l'affectation des ressources aux postes sans s'intéresser à leurs interactions lors du fonctionnement de la ligne.

Cette vue statique permet d'identifier les problèmes liés à l'occupation d'espace sur la surface d'implantation, plus particulièrement dans les postes de chargement, les postes de manutention, les postes de déchargement.

1. jt :format d'échange standardisé proposé par Siemens

Le résultat d'une cotation de l'application des règles métiers (fig.IV.3) permet d'indiquer les inducteurs de performances modifier pour améliorer la configuration d'une unité d'assemblage.

La figure V.8 présente la configuration d'une ligne de production de côtés de caisse d'un véhicule. Le partage de cette maquette permet de partager : l'environnement autour des postes de travail, les solutions techniques retenues pour chaque poste de travail (chargement, assemblage, évacuation) et le mode d'approvisionnement (par convoyage).

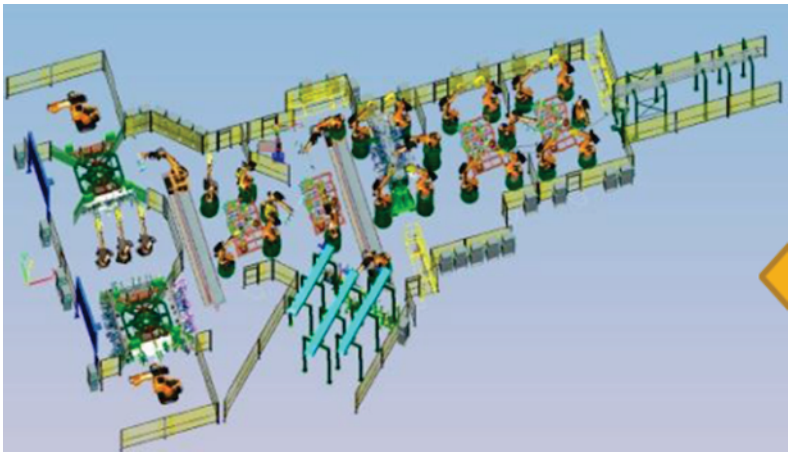


Figure V.8 – Revue statique d'un processus d'assemblage

V.3.2.2 Revue dynamique

La revue dynamique consiste à rejouer une simulation d'une partie du processus d'assemblage. Cette revue dynamique consiste à vérifier la dynamique des pièces et des moyens de production. Elle permet d'identifier d'éventuelles collisions entre les éléments d'implantation et les ressources. Par exemple une collision entre la trajectoire d'un robot et une structure du bâtiment. Elle permet également d'identifier des collisions entre les moyens de production, principalement aux chargements de pièces aux transferts de pièces entre les postes de travail.

Ces constats sont faits à partir des volumes enveloppes des trajectoires de ressources en mouvement. Par exemple le volume global de la rotation d'un robot crée une interférence avec un élément du bâtiment (mur, poteau ...). Une analyse des déplacements de l'opérateur lors de chargement au bord de chaîne permet également d'illustrer les problématiques d'aménagement de poste, d'ergonomie et des déplacements.

La figure V.9 présente un résultat de simulation d'un poste de chargement manuel. Cette simulation permet de constater la dynamique des opérations de chargement et plus particulièrement les tâches effectuées par l'opérateur pour collecter l'ensemble des pièces

et les positionner sur l'outillage du poste de travail. Un résultat en temps réel d'une cotation ergonomique est disponible.

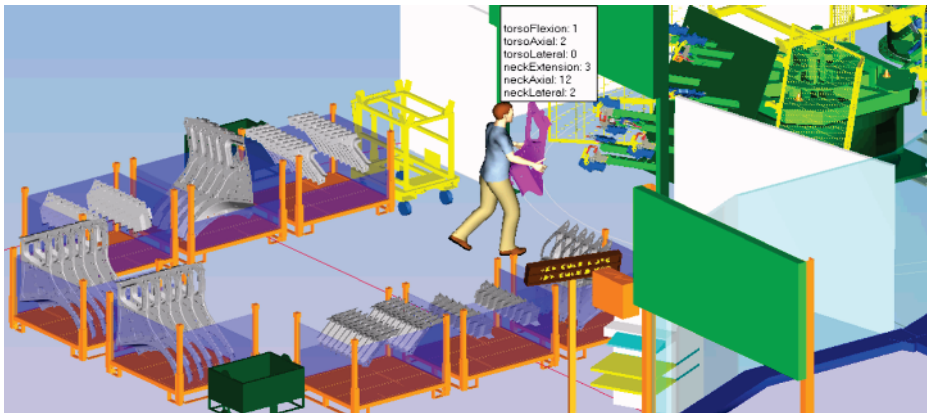


Figure V.9 – Revue dynamique d'une zone de chargement

V.3.3 Constats et détection des interférences

L'ensemble des constats réalisés durant la revue globale et la revue détaillée permettent de classer les problèmes en différentes catégories et par ordre d'importance. Les interférences sont principalement fréquentes lors de ces revues car elles sont difficilement identifiables sans une mise en commun des données numériques de plusieurs métiers (ex : implantation et processus d'assemblage).

Les types d'interférences que l'on peut identifier lors de la revue numérique peuvent concerner un métier en particulier ou une interface entre plusieurs métiers. Quelques exemples d'interférence sont présentés ci-dessous et les constats peuvent porter sur :

— Une collision entre un moyen de production et un élément de bâtiment : Il s'agit d'une interférence rencontrée fréquemment lors de modifications au niveau des équipements de production.

— Un écart de nomenclatures entre l'implantation, le processus d'assemblage et l'automatisme : Dans une zone en particulier de l'unité de production, il peut arriver que l'implantation n'ait pas été mise à jour, alors que le métier conception process a défini un moyen de manutention robotisée après le poste d'évacuation, tandis que les métiers de l'automatisme ont redéfini les modes de fonctionnement en se basant sur une ancienne définition de la zone d'évacuation des pièces.

— Le non-respect des contraintes ergonomiques pour les opérations manuelles : L'activité d'analyse ergonomique du travail est principalement faite par des experts. La simulation des opérations manuelles permet d'identifier les moments où l'opérateur fait le plus d'effort afin de modifier l'aménagement ou les moyens en conséquence.

La synthèse des problèmes identifiés et leur caractérisation permet de valider la faisabilité et la performance de l'unité de production par rapport aux objectifs. La caractérisation des problèmes résulte d'une démarche d'analyse des risques qui met en évidence l'importance et la criticité de ces problèmes.

V.4 Conclusions

Afin d'accélérer les processus de développement et d'améliorer les temps de mise sur le marché du produit, une nouvelle approche a été explorée pour la validation des lignes d'assemblage de caisse automobile. Ce chapitre a présenté une étude prospective sur l'utilisation d'une maquette numérique d'atelier lors de revues de projet d'industrialisation. Le concept de DLOT process ou lot de données process numérique est introduit comme une représentation intermédiaire du système permettant de valider l'implantation et les processus d'assemblage. L'objectif est d'identifier au plus tôt les problèmes liés au développement, à l'intégration et au démarrage de la ligne de production.

Pour cela quelques généralités sur la pratique des revues d'étude industrielles ont été présentées. Ensuite nous avons détaillé les étapes de préparation de données numériques à travers l'import de données, la modification d'une architecture d'implantation et la modification d'une configuration de la ligne de production. Une des difficultés de l'import de données concerne l'hétérogénéité des données qui nécessite un format d'échange commun et un outil de gestion des processus de fabrication (MPM) qui puisse agréger ces données. Ensuite nous avons décrit le déroulement d'une revue d'étude basée sur la maquette numérique d'atelier. Une revue globale de l'architecture d'implantation et une revue détaillée d'une configuration de ligne sont proposées lors du déroulement. Un scénario a été défini afin de montrer comment ce processus de revue permet de détecter au plus tôt les interférences entre les métiers afin d'y remédier avant la réalisation des moyens de production.

Au vu des deux séries expérimentales concernant la préparation et le déroulement d'une revue numérique d'atelier, la convergence multidisciplinaire est améliorée par la mise en commun des données métiers dans une maquette d'atelier commune. Le processus de revue d'étude numérique proposé permet de détecter les principaux points bloquants aux principaux jalons du projet.

Dans cette deuxième partie du manuscrit, trois propositions ont été présentées : une méthode de reconfiguration progressive de ligne de production, une méthode d'évaluation applicable en avant-projet d'industrialisation et un processus de revue numérique d'atelier qui permet de valider les performances et la faisabilité des solutions. Le chapitre VI

présente un cas d'étude industriel qui montre l'application de ces propositions.

Troisième partie

Application industrielle

Chapitre VI

Application à l'assemblage des ouvrants d'une caisse de véhicule

"Une connaissance est une information validée par l'expérience." (Albert Einstein)

Résumé

Ce chapitre présente une application industrielle de la méthode d'analyse et d'évaluation des solutions de reconfiguration. L'objectif est d'appliquer notre approche dans le cadre de l'introduction d'un nouveau produit dans une usine existante. Ce cas d'étude montre les principales problématiques rencontrées lors d'une étude d'avant-projet d'industrialisation dans l'automobile. Le cas d'une unité d'assemblage de portes de coffre de véhicule est utilisé pour illustrer nos propositions.

Sommaire

VI.1 Contexte de l'étude : assemblage des ouvrants 141

VI.1.1 Généralités sur le processus d'assemblage des "ouvrants" 142

VI.1.2 Objectifs de l'étude 143

VI.1.3 Description de la configuration initiale 143

VI.1.4 Objectifs de production : capacité et diversité 144

VI.2 Recherche de solutions 145

VI.2.1 Mise en œuvre de la stratégie de reconfiguration 145
VI.2.2 Identification des solutions 146
VI.3 Evaluation des solutions 148
VI.3.1 Evaluation des critères métier 148
VI.3.2 Evaluation des critères projet 150
VI.4 Conclusions 155

La première partie de ce manuscrit a présenté le contexte et l'état de l'art sur l'analyse et l'évaluation du processus de reconfiguration d'une ligne de production. La deuxième partie a présenté les propositions dont la première consiste à identifier les solutions avec une approche progressive. La deuxième consiste en une approche multicritère basée sur des critères métier et projet. La troisième consiste en un processus de revue numérique de la solution retenue.

Cette troisième et dernière partie du manuscrit développe sur une application les propositions concernant l'analyse, l'évaluation et la validation des choix de reconfiguration d'une ligne de production, puis présente une conclusion générale sur le travail de thèse. Ce chapitre présente une application industrielle des méthodes proposées à travers une étude de cas sur la reconfiguration d'une unité d'assemblage de portes de coffre de véhicule.

L'étude se situe dans la phase avant-projet d'industrialisation d'un nouveau véhicule dans une usine de fabrication donnée. Le choix d'affectation de ce véhicule est en dehors du périmètre de cette étude. Nous nous focaliserons plutôt sur l'analyse des différentes solutions possibles pour faire évoluer la configuration du système de production existant afin de prendre en compte la fabrication du nouveau véhicule. La première étape consiste à identifier les stratégies de reconfigurations possibles et les modifications nécessaires. La deuxième étape consiste à évaluer ces solutions en vue de proposer au décideur un classement et une synthèse pour faire son choix. La dernière étape qui concerne la validation de la solution retenue dans le cadre d'une revue numérique d'atelier ne sera pas traitée dans ce chapitre.

La première section présente le contexte de l'étude de cas sur l'assemblage des portes de coffre d'un véhicule, la deuxième section développe la méthode de reconfiguration progressive en vue d'identifier les solutions potentielles. La troisième section fournit une évaluation et une synthèse permettant de choisir parmi ces solutions.

VI.1 Contexte de l'étude : assemblage des ouvrants

Dans une ligne d'assemblage de caisse de véhicule, la gamme d'assemblage type d'une portière de véhicule est présentée dans la figure VI.1.

Nous allons d'abord décrire le périmètre du processus d'assemblage des ouvrants, puis définir les objectifs de l'étude. Ensuite, nous définissons la configuration initiale de l'unité de production dans l'usine de fabrication et enfin nous détaillons les contraintes et les objectifs de production.

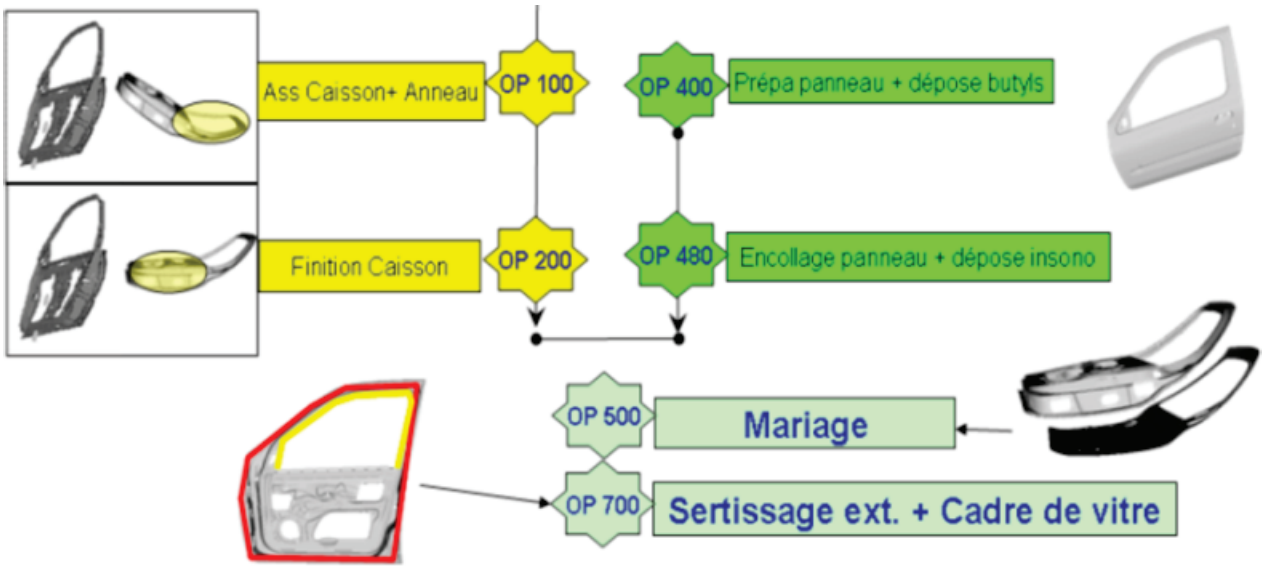


Figure VI.1 – Gamme d'assemblage d'une portière de caisse de véhicule

VI.1.1 Généralités sur le processus d'assemblage des "ouvrants"

Un "ouvrant" désigne un élément d'ouverture qui permet d'accéder à l'intérieur du véhicule. Il s'agit principalement des portières, du capot et de la porte de coffre. Ces derniers peuvent avoir différentes configurations en fonction du type de caisse du véhicule (Pour plus de détail sur les différents types de caisse de véhicule, voir en annexe B.1).

Une unité d'assemblage d'ouvrants est généralement composée de plusieurs lignes permettant d'assembler :

— Les portes avant, côté gauche et droit (PAV)

— Les portes arrière, côté gauche et droit (PAR)

— Le capot (CAP) et la porte de coffre (PDC)

Une ligne d'assemblage type d'un ouvrant est composée de deux îlots principaux :

— Un îlot de **préparation** sur 2 ou 3 postes de travail permettant d'assembler indépendamment la partie intérieure et la partie extérieure de l'ouvrant.

— Un îlot de **sertissage** sur plateau tournant permettant d'assembler ces deux pièces par déformation mécanique des bords des pièces. Plusieurs outillages sont fixés sur le plateau tournant pour assembler différentes variantes d'ouvrants.

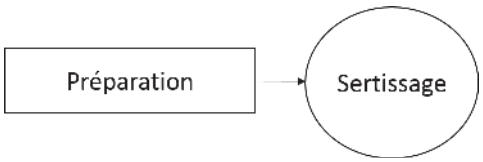


Figure VI.2 – Schéma d'une configuration type de ligne d'assemblage d'ouvrant

VI.1.2 Objectifs de l'étude

L'objectif de l'étude est d'analyser l'impact de l'introduction d'un nouveau véhicule X dans une usine qui produit déjà d'autres véhicules A, B, C et D. Cette analyse nécessite d'évaluer plusieurs solutions de reconfiguration du système de production existant. Le véhicule X présente deux diversités (1) et (2) dont les spécificités sont détaillées plus bas. La diversité d'un modèle de véhicule correspond à une variante de type caisse (ex : break, monospace, cabriolet). La diversité d'une pièce correspond à une variante de cette pièce pour un modèle de véhicule.

La figure VI.3 présente une synthèse de la production de chaque variante de véhicule dans les années à venir. Initialement (année N), les quatre véhicules sont en production, on souhaite démarrer la production du véhicule X dans 2 ans (N+2).

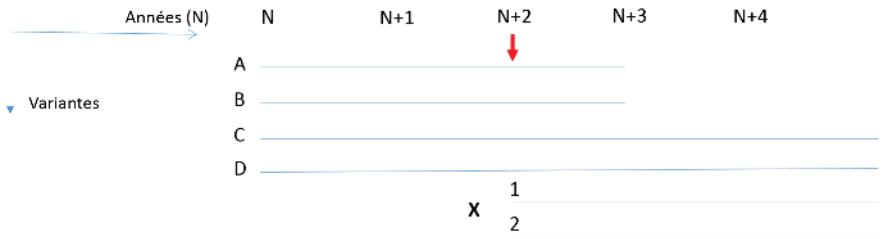


Figure VI.3 – Planification de la production intégrant les futurs véhicules à fabriquer

VI.1.3 Description de la configuration initiale

La configuration initiale de l'unité d'assemblage des ouvrants est composée de 3 lignes robotisées : une ligne pour les portes avant, une ligne pour les portes arrière et une autre pour le capot et les portes de coffres. Les moyens d'assemblages installés permettent de fabriquer 4 variantes de véhicules différents. Cette flexibilité est garantie par des changements d'outillages automatisés dans les îlots de préparation et des outillages fixes sur plateau tournant dans les îlots de sertissage.

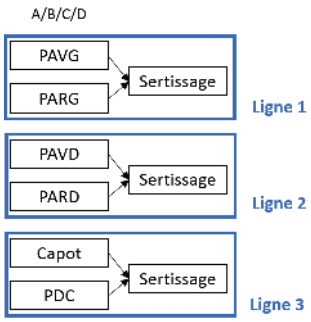


Figure VI.4 – Configuration initiale

VI.1.4 Objectifs de production : capacité et diversité

Le véhicule X est une évolution majeure du véhicule existant A. Plusieurs pièces sont donc communes. Il s'agit des portes avant (PAV) et arrières (PAR). Deux variantes de ce véhicule seront produites, si possible dans les mêmes installations :

— une diversité X(1) qui possède une nouvelle porte de coffre (PDC1) et un nouveau capot commun à 1 et 2 (CAPX).

— une diversité X(2) qui possède une nouvelle porte de coffre (PDC2) et un nouveau capot commun à 1 et 2 (CAPX)

Il y aura donc des hypothèses de capacité et de diversités à gérer.

VI.1.4.1 Assurer la capacité demandée

Etant donné que le véhicule X partage les mêmes portes avant et arrière, son introduction nécessite de gérer la capacité des unités permettant d'assembler ces pièces. Dans cette étude, deux hypothèses de capacité globale de l'usine sont prises comme références pour la recherche de solution. La première hypothèse correspond au maintien de la capacité de production globale de l'usine. La deuxième hypothèse consiste à augmenter la capacité de production de l'usine d'environ 30%.

VI.1.4.2 Fabriquer l'ensemble de la diversité demandée

Etant donné que le véhicule X possède de nouvelles portes de coffre et un nouveau capot, des hypothèses de diversités sont à étudier dans les modifications à prévoir sur la configuration initiale. En effet, la flexibilité de la configuration initiale est limitée à 4 diversités due au nombre d'outillages disponibles dans l'îlot de sertissage. Cela implique de prévoir une capacité supplémentaire permettant de gérer ces nouvelles diversités.

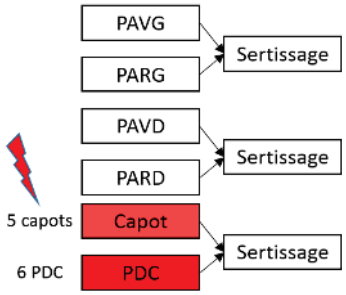


Figure VI.5 – Problème lié à la diversité sur la configuration initiale

Dans cette section, nous avons présenté le contexte du cas d'étude à travers une description du périmètre d'assemblage des ouvrants, des objectifs de l'étude de cas et

des contraintes de production. Dans la section suivante nous nous basons sur ces hypothèses pour la recherche de solutions permettant de reconfigurer la ligne existante.

VI.2 Recherche de solutions

Dans cette section, l'objectif est de mettre en œuvre la stratégie de reconfiguration progressive pour identifier les solutions en fonction de leur impact sur la configuration initiale. Les solutions sont parcourues par ordre d'impact croissant des modifications à implémenter.

VI.2.1 Mise en œuvre de la stratégie de reconfiguration

Le principe de la reconfiguration progressive consiste à identifier les solutions par degré d'impact croissant sur la configuration initiale de la ligne de production. Trouver en premier lieu les solutions qui impliquent le moins de modification possible à effectuer sur le système existant.

En appliquant ce principe à la capacité de production, nous chercherons d'abord à identifier des solutions avec une première hypothèse de maintien de la capacité de production existante (H1). Ensuite, envisager une augmentation de capacité si nécessaire (H2).

Dans le premier cas, le point bloquant qui ne permet pas de fabriquer les deux diversités de portes de coffres se situe au niveau de l'îlot de sertissage. L'application d'une reconfiguration locale à ce niveau consiste à ajouter deux outillages supplémentaires qui peut se concrétiser par l'ajout d'un îlot de sertissage de plus qui comporte au moins deux positions d'outillage (H1A). Cette solution nécessite de modifier le mode de fonctionnement de l'îlot de préparation car au lieu d'avoir quatre changements d'outillages réguliers, il faudrait en prévoir six. Afin d'éviter cela, une solution moins locale qui consisterait à ajouter une ligne complémentaire de même type qui produirait les deux diversités de plus (H1B).

Dans le deuxième cas, une augmentation de la demande commerciale est prévue. Cela implique d'augmenter la capacité de production existante en prenant en compte les deux diversités de plus à fabriquer. L'ajout d'une ligne complémentaire pose la question du niveau de robotisation à spécifier. Une ligne robotisée (H2A) est moins contraignante en production mais coûte chère en investissement. Une ligne manuelle (H2B) est moins cher en investissement mais le mode de fonctionnement est plus contraignant en production. En termes d'impact sur la configuration existante, la ligne robotisée est plus compacte (voir fig. VI.6) en termes d'implantation par rapport à la solution manuelle

(fig. VI.7). Une dernière solution plus impactante en termes d'implantation et de configuration de ligne consiste à revoir entièrement l'architecture de la ligne existante pour pouvoir installer un processus d'assemblage flexible à huit diversités (H2C). Ce nouveau processus d'assemblage correspond à une solution prédéfinie et standardisée.

VI.2.2 Identification des solutions

Les solutions identifiées pour intégrer le nouveau véhicule dans les installations existantes consistent à gérer des hypothèses d'augmentation de capacité et des hypothèses de gestion de la diversité.

— H1- Maintien de la capacité initiale de l'usine

  H1A – Ajouter un poste de sertissage pour les deux diversités en plus

  H1B – Ajouter une ligne complémentaire pour les deux diversités en plus

— H2- Augmentation de la capacité de l'usine (env. 33% de la capacité initiale)

  H2 A – Ajouter une ligne robotisée pour la capacité supplémentaire

  H2 B – Ajouter une ligne manuelle pour la capacité supplémentaire

  H2 C – Installer une nouvelle ligne flexible à 8 diversités

On note qu'il s'agit d'hypothèses de solution qui peuvent changer durant le projet. Ces changements peuvent être liés a de nouvelles spécifications du produit ou de nouvelles contraintes de production.

Nous détaillons ci-dessous chacune de ces solutions pour expliquer en quoi elles consistent :

VI.2.2.1 H1- Maintenir la capacité initiale de l'usine

Cette hypothèse correspond à un scénario de prévision de vente stable de l'ensemble des véhicules à produire dans les années à venir. De ce fait, la capacité globale de l'usine peut être maintenue au même niveau.

La conséquence directe pour l'unité d'assemblage qui nous intéresse, c'est à dire l'assemblage des portes de coffres et du capot de l'ensemble des véhicules, c'est la nécessité de gérer les diversités de pièces supplémentaires à produire pour le nouveau véhicule X.

H1A- Ajout d'un poste de sertissage pour les deux diversités en plus Afin de fabriquer les pièces supplémentaires des diversités de capot (CAPX) et de porte de coffre (PDC1 et PDC2), il est possible de réutiliser la ligne de préparation existante

(Ligne 3 de la figure VI.4). En effet, cet îlot de préparation fonctionne par changement d'outillage sur chacun des postes de travail.

Les modifications au niveau de cet îlot consistent à prévoir 2 outillages supplémentaires plus des moyens de stockage spécifiques à ces deux diversités à la sortie de l'îlot. Par contre, la capacité des outillages de l'îlot de sertissage est limitée à 4 diversités. Il est nécessaire d'implanter un îlot supplémentaire avec deux outillages fixes qui sont spécifiques aux deux nouvelles diversités de pièces pour le nouveau véhicule X.

H1B- Ajout d'une ligne d'ouvrant complémentaire pour les deux diversités en plus Cette solution consiste à implanter un nouvel îlot de préparation, c'est à dire ne pas réutiliser l'îlot de préparation afin d'éviter les problèmes liés à l'augmentation du nombre de changements d'outillage et donc de la réduction des temps de production.

VI.2.2.2 H2-Augmenter la capacité de l'usine

Cette hypothèse correspond à un scénario d'augmentation des ventes d'un véhicule en cours de production et une éventualité d'anticiper l'intégration d'un futur véhicule après le véhicule X qu'on est en train d'étudier. L'augmentation estimée de la capacité de l'usine est d'environ 33%.

Afin de réutiliser au mieux les installations existantes, une autre solution consiste à ajouter une ligne correspondante à la capacité supplémentaire dont on a besoin. Cette ligne peut être soit manuelle, soit robotisée.

H2A – Ajouter une ligne robotisée pour la capacité supplémentaire Dans le cas d'une solution robotisée, deux lignes sont ajoutées. Une ligne pour les portes latérales, avant et arrière puis une autre ligne pour les capots et les portes de coffre. Ces lignes complémentaires sont capables de fabriquer 4 diversités de pièces.

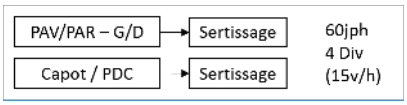


Figure VI.6 – Ajouter une ligne robotisée

H2B – Ajouter une ligne manuelle pour la capacité supplémentaire Il est également possible d'opter pour une solution manuelle. Dans ce cas, trois lignes sont ajoutées. Une ligne pour les portes latérales une autre pour les portes avant et arrière puis une autre ligne pour les capots et les portes de coffre. Chacune de ces lignes est capable de fabriquer 2 diversités de ligne.

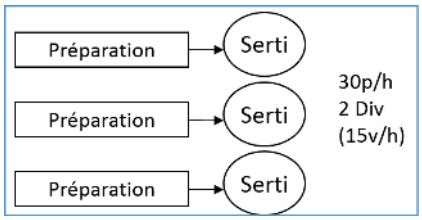


Figure VI.7 – Ajouter une ligne manuelle

H2C- Installer une nouvelle ligne flexible à 8 diversités Cette solution consiste à installer une nouvelle configuration des lignes d'assemblage d'ouvrants. Une ligne dite "capacitaire" permet de fabriquer l'ensemble des variantes de produits sur un même tronçon sans dédoublement de flux. La figure VI.8 montre cette différence de configuration en termes d'affectation des types de porte aux lignes. La configuration initiale assemble les portes avant ou arrière sur la même ligne tandis que la configuration envisagée pour cette solution assemble les portes latérales (gauches et droites) sur la même ligne. Les lignes d'assemblage représentées en traits discontinus ne seront pas installées car elles ne sont pas nécessaires.

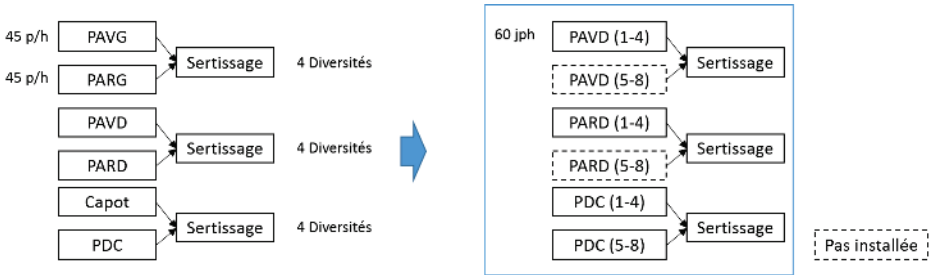


Figure VI.8 – Solution H2C : Installer une nouvelle ligne flexible

Les numéros 1 à 8 correspondent aux diversités à produire sur la ligne.

VI.3 Evaluation des solutions

Cette section présente les résultats de l'évaluation de l'impact des solutions sur les performances du système de production.

VI.3.1 Evaluation des critères métier

Les critères qui permettent d'évaluer l'application des principales règles métiers relatives à la configuration de la ligne d'assemblage sont :

— **Critère 1** - Mode de chargement et moyen d'approvisionnement. Le moyen de chargement (ou d'évacuation) correspond au type de ressource permettant

d'alimenter ou d'évacuer la ligne d'assemblage. Le mode d'approvisionnement définit le type de moyen permettant d'acheminer les pièces au poste de chargement.

— **Critère 2** - Engagement des moyens. Ce critère représente la capacité globale de la ligne à réaliser des opérations à valeur ajoutée.

— **Critère 3** - Flexibilité au produit. La flexibilité au produit est la capacité du système à fabriquer plusieurs variantes de produit.

— **Critère 4** - Mode de fonctionnement. Ce critère permet de définir si un processus d'assemblage peut fonctionner selon un principe de conduite « à la demande » ou « par lot ».

Les résultats de l'évaluation sont synthétisés dans la matrice de décision de la figure VI.9 :

Solutions / critères	1-Appro	2- Engagement	3-Flexibilité	4-Fonctionnement
H0	2	0	3	3
H1A	2	1	3	3
H1B	2	1	3	3
H2A	2	1	3	3
H2B	2	1	1	2
H2C	3	2	4	4

Figure VI.9 – Matrice de décision pour les règles métiers

La solution H0 correspond à la configuration initiale décrite plus haut (§. VI.1.3). Elle a un niveau d'engagement plus faible que les autres.

La solution H1A, H1B et H2A ont le même niveau de performance d'un point de vue purement métier. Nous avons vu que l'utilisation d'une échelle standard pour l'agrégation des critères peut conduire à des ex-aequo. Toutefois, on en conclut que ces trois solutions respectent à un même niveau l'ensemble des règles métiers relatives à la configuration du processus d'assemblage.

La solution H2B qui consiste à ajouter une ligne manuelle pour la capacité supplémentaire est moins flexible puisque l'ajout d'une diversité nécessite de dupliquer la ligne.

La solution H2C est mieux notée sur l'ensemble des critères métier étant donné qu'il s'agit d'installer une nouvelle ligne robotisées flexibles à 8 diversités pour un besoin de 6 diversités à l'année N+2. Toutefois, cette solution permet d'anticiper une augmentation de capacité pour l'introduction de futurs véhicules.

VI.3.2 Evaluation des critères projet

Dans ce paragraphe, une approche de surclassement est utilisée pour évaluer conjointement les points de vue métiers et projet. Les critères métiers retenus sont : la capacité maximale, le mode de fonctionnement et la flexibilité de la ligne de production. Les critères projet qui sont pertinents pour notre étude sont : l'investissement initial, le coût de reconfiguration et le délai de reconfiguration. L'idée est de garder les unités usuelles des critères au lieu d'agréger l'ensemble des critères en une valeur unique qu'il faudra ramener à une échelle unique pour faire la comparaison. Ensuite, nous proposons un classement des solutions et une synthèse permettant de faire des compromis.

— Investissement : correspond au coût des moyens de production à installer pour une solution donnée.
— Coût de reconfiguration : correspond à l'investissement supplémentaire pour l'ajout de véhicules sur la ligne.
— Capacité maximale
— Mode de fonctionnement : L correspond à un mode de fonctionnement par lot et D correspond à un mode de fonctionnement à la demande.
— Flexibilité : correspond au nombre de diversités de caisse de véhicule que l'on peut assembler sur la ligne.
— Délai de reconfiguration : Le délai de reconfiguration correspond à la durée en semaines des modifications.

Les valeurs de l'investissement et du coût de reconfiguration sont données à titre indicatif pour des questions de confidentialité. Toutefois celles qui sont utilisées pour cette étude sont représentatives.

VI.3.2.1 Application de la méthode Prométhée

La figure VI.10 présente les paramètres de l'étude tels qu'ils sont définis dans l'outil Visual Prométhée, développée par le laboratoire Lamsade (http ://www.promethee-gaia.net/resourcesF.html). On retrouve l'ensemble des critères dans chaque colonne et l'ensemble des solutions dans les cinq dernières lignes de la partie évaluation. Deux autres parties sont disponibles dans les lignes supérieures. La

Critères	H1A	H1B	H2A	H2B	H2C
Investissement	0,5	1	2	1,5	4
Coût de reconfiguration	1,5	1	1	2	0,25
Capacité maximale	45	45	60	60	60
Mode de fonctionnement	L	L/D	L/D	L	L/D
Flexibilité	6	6	6	6	8
Délai de reconfiguration	0,5	1	1,5	2	3

Tableau VI.1 – Matrice de décision pour la méthode Prométhée

partie statistique reprend quelques valeurs standards de chaque critère (min, max, moyenne, écart-type). La partie préférence propose des paramètres pour l'évaluation.

Les paramètres de l'évaluation correspondent aux paramètres de la méthode Prométhée présentés dans la section §. IV.4.1.2 :

— Min/Max : Est-ce que le critère est à minimiser ou à maximiser ?

— weight : Quelle est la pondération donnée à un critère en fonction de son importance ?

— Préférence function : quelle allure a la fonction de préférence ?

— Threshold : Permet de définir les seuils de préférence (P), les seuils d'indifférence (Q) et la fonction critère (S)

Scenario1	Investiss...	Cout rec...	Capacté...	Flexbilté	Délai de ...	Fonction...
Unit	k€	Ratio	v/h	unit	Week	unit
Cluster/Group	◆	◆	◆	◆	◆	◆
Preferences						
Min/Max	min	min	max	max	min	max
Weight	1,50	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Preference Fn.	V-shape	V-shape	Level	Linear	Linear	Usual
Thresholds	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute
- Q: Indifference	n/a	n/a	0,00	0,98	0,64	n/a
- P: Preference	€ 2,6	€ 1,26	16,35	1,78	1,84	n/a
- S: Gaussian	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Statistics						
Minimum	€ 0,5	€ 0,25	45,00	6,00	0,50	0,00
Maximum	€ 4,0	€ 2,00	60,00	8,00	3,00	1,00
Average	€ 1,8	€ 1,15	54,00	6,40	1,60	0,60
Standard Dev.	€ 1,2	€ 0,58	7,35	0,80	0,86	0,49
Evaluations						
H1A	€ 0,5	€ 1,50	45,00	6,00	0,50	no
H1B	€ 1,0	€ 1,00	45,00	6,00	1,00	yes
H2A	€ 2,0	€ 1,00	60,00	6,00	1,50	yes
H2B	€ 1,5	€ 2,00	60,00	6,00	2,00	no
H2C	€ 4,0	€ 0,25	60,00	8,00	3,00	yes

Figure VI.10 – Paramètres de l'étude dans Visual Prométhée

L'objectif de l'évaluation est de minimiser l'investissement, minimiser le coût de reconfiguration, maximiser la capacité de production, minimiser les délais de

reconfiguration et maximiser la flexibilité sur le mode de fonctionnement. Dans notre cas, le coût d'investissement a un poids plus important (1,5) par rapport aux autres critères. Pour plus de détail sur la méthode de définition des seuils d'indifférence et de préférence, le lecteur est invité à se référer à l'annexe 1.

Le premier résultat concerne le calcul des flux entrants et sortants de chaque solution pour l'établissement d'un classement. Le tableau VI.2 table des flux de puissance et de faiblesse de chaque solution. On peut constater que la solution H1B possède une valeur de flux net supérieur aux autres.

Solutions	Flux net	Puissance	Faiblesse
H1B	0.133	0.263	0.130
H2A	0.094	0.232	0.138
H2C	0.062	0.391	0.329
H1A	-0.064	0.216	0.280
H2B	-0.225	0.115	0.340

Tableau VI.2 – Table des flux des solutions

Le graphe de surclassement qui en résulte (fig. VI.11) permet d'identifier quelle solution surclasse les autres. Les flèches représentent des liens de surclassement. Les valeurs des flux Phi+ correspondent à la puissance de la solution et les valeurs des flux Phi- correspondent à la faiblesse de la solution. Le flux net est la différence entre la puissance et la faiblesse. La solution H1B surclasse la solution H2A qui surclasse à son tour la solution H1A. La solution H2B est à la fois surclassée par la solution H1A et H2C.

VI.3.2.2 Synthèse de l'évaluation : Plan GAIA

La figure VI.12 présente la synthèse GAIA de l'évaluation. Une analyse des caractéristiques des critères et des solutions (longueur, dispersion, projections) nous permet de faire les conclusions suivantes :

Concernant les critères, le plan montre ceux qui sont opposés. L'investissement et la flexibilité sont des critères opposés, car pour améliorer la flexibilité, il est nécessaire d'investir plus. Il en est de même pour le délai de reconfiguration et la capacité de production maximale. La longueur du vecteur capacité maximale montre qu'il a une faible influence sur le classement, contrairement au critère mode de fonctionnement. En fonction des principaux critères projet (investissement et délai de reconfiguration), les solutions H1A et H1B se démarquent des autres vu l'orientation des deux vecteurs critères.

Concernant les solutions, leur dispersion dans le plan permet de dire qu'il n'y a pas de solution ayant un profil de performance similaire. Il est possible de déterminer visuellement

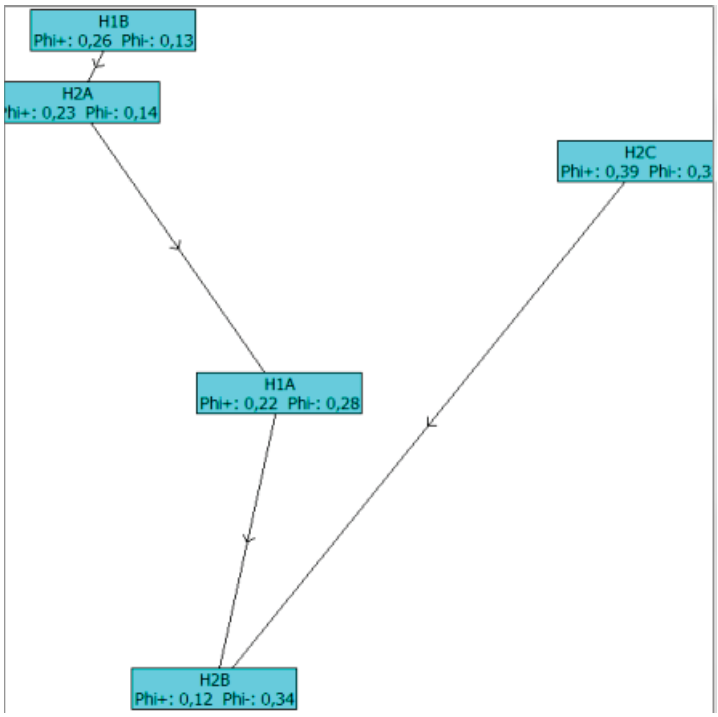


Figure VI.11 – Graphe de surclassement

les puissances et les faiblesses des solutions par projection successive sur les critères. Ces projections peuvent supporter de manière quantitative les avantages et inconvénients de chaque solution vis-à-vis des critères utilisés. Par exemple, en projetant la solution H1B sur le vecteur délai de reconfiguration, on peut avoir une idée de la valeur de sa puissance. Par contre si on projette cette solution sur le vecteur flexibilité, on a une idée de la valeur de sa faiblesse.

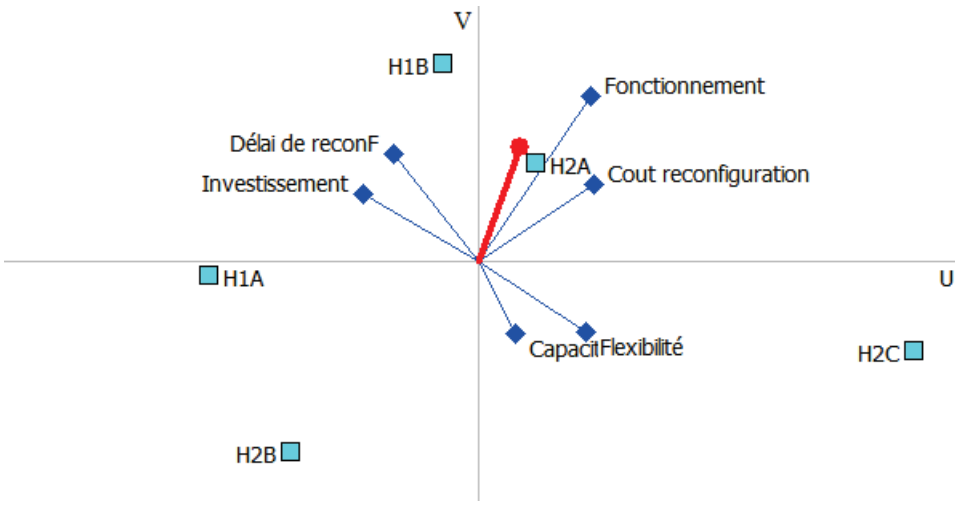


Figure VI.12 – Plan Gaia pour les choix de reconfiguration de la ligne de porte de coffre

VI.3.2.3 Analyse de sensibilité

Une analyse de sensibilité permet d'affiner la synthèse présentée pour la prise de décision. Une première approche consiste à varier les poids affectés aux critères pour voir leur impact sur le résultat de l'évaluation. Une deuxième approche consiste à étudier les intervalles dans lesquelles ces pondérations n'ont pas d'impact sur le résultat de l'évaluation.

L'analyse de sensibilité par rapport aux poids affecté aux critères consiste à changer le poids d'un critère et de voir l'impact sur le résultat de l'évaluation. Cette étude permet d'analyser la robustesse de l'évaluation par rapport à la pondération. La figure VI.13 présente l'affectation des poids pour l'étude réalisée dans ce chapitre.

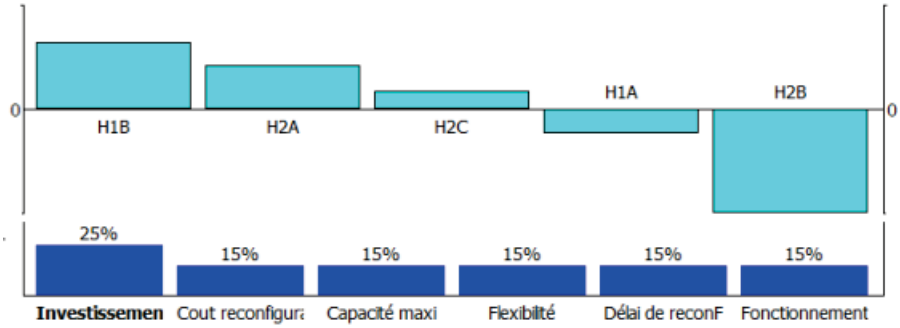


Figure VI.13 – Analyse de sensibilité : Affectation des poids

Dans la pondération initiale, le coût d'investissement est le critère le plus important (23%). En effet, l'immobilisation du capital investi est en général le facteur prépondérant pour les choix de reconfiguration de l'outil de production. En effet, elle impacte directement le retour sur investissement des projets de l'entreprise. Afin de voir l'impact de cette pondération sur le résultat de l'évaluation, on se propose de modifier l'importance relative du critère de coût de reconfiguration (33% au lieu de 15%). La figure VI.14 montre un changement dans le classement proposé : la solution H2C a un meilleur score par rapport aux autres solutions.

On peut en conclure que si le coût de reconfiguration est pris comme le critère le plus important, la solution H2C (Installer une nouvelle ligne neuve flexible à 8 diversités) est préconisée. Cela implique que des objectifs à long terme sur l'intégration de plusieurs produits (5 à 10 ans) sont pris en compte dans cette décision.

La deuxième approche d'analyse de sensibilité consiste à analyser des intervalles de stabilité de l'évaluation par rapport au poids affecté à un critère. Cette analyse propose à visualiser l'impact de la pondération sur la valeur du flux net (Phi). L'axe horizontale correspond au poids du critère sélectionné et l'axe vertical correspond à la valeur du flux net (fig.VI.15).

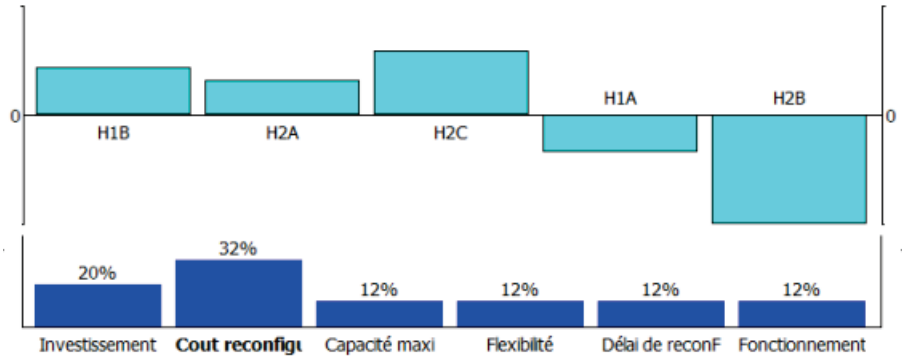


Figure VI.14 – Analyse de sensibilité : Modification de l'affectation des poids

Dans l'exemple de la figure VI.16, le score de la solution H2C décroit plus par rapport au score des autres critère quand le critère du coût d'investissement augmente. En effet, c'est la solution la plus chère tandis que les solutions H1A et H1B ont un score croissant puisque ces solutions sont moins couteuses. L'intervalle de stabilité par les deux traits verticaux discontinus représente la zone dans laquelle le surclassement reste inchangé (23% dans le cas du critère d'investissement)

VI.4 Conclusions

Dans ce chapitre nous avons illustré à travers un cas d'étude industriel nos propositions concernant l'identification des solutions par une approche de reconfiguration progressive et l'évaluation des solutions par une approche multicritère.

Le contexte de l'étude a présenté le processus d'assemblage des ouvrants d'une caisse de véhicule. L'objectif est d'étudier les solutions possibles permettant de reconfigurer la ligne en vue d'introduire un nouveau produit qui présente deux diversités de porte de coffre.

Nous avons identifié cinq solutions en appliquant l'approche de reconfiguration progressive d'une ligne de production. Ces solutions sont principalement liées à une augmentation ou non de la capacité de production mais répondent à la contrainte principale d'intégrer deux diversités supplémentaires.

L'évaluation des critères métier a mis en évidence un classement ordinal qui prend en compte la faisabilité technique des solutions. La prise en compte de critères projet a permis d'intégrer le coût et le délai de reconfiguration. Une approche de surclassement Prométhée permet d'avoir une évaluation plus globale des solutions.

Cette application a permis de couvrir principalement les opérations de reconfiguration liées à une augmentation de capacité. Les critères d'évaluation qui ont été mis en évidence par le cas d'application n'est pas exhaustif mais plutôt représentatif des principaux points

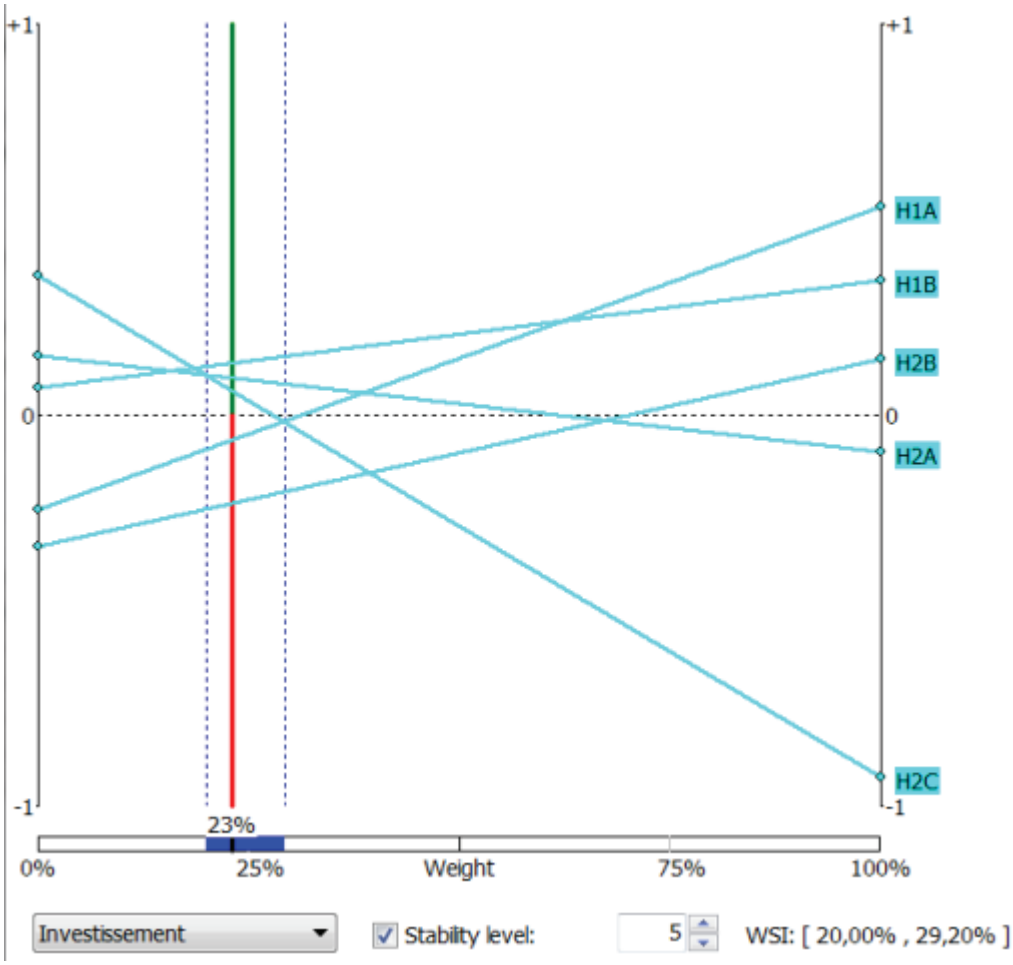


Figure VI.15 – Analyse de sensibilité : intervalle de stabilité de la pondération

de vue métier et projet.

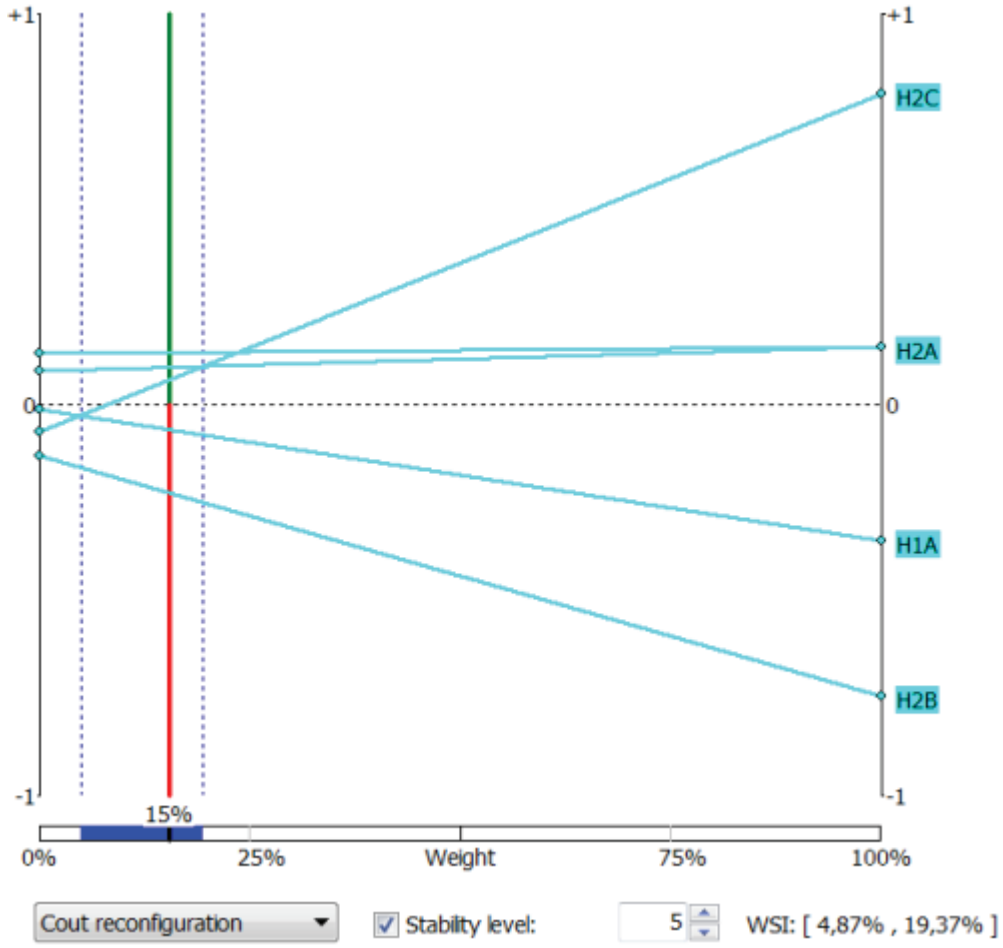


Figure VI.16 – Analyse de sensibilité : Modification de l'intervalle de stabilité de la pondération

Chapitre VII

Conclusion générale et perspectives

Résumé

Ce chapitre présente l'ensemble de nos conclusions sur les propositions et l'analyse des résultats obtenus. Des perspectives pouvant faire l'objet de recherches futures sont également présentées

Sommaire

VII.1Conclusions 160

VII.2Perspectives 161

VII.1 Conclusions

Les organisations industrielles font face à de plus en plus de changements dus à l'augmentation de la fréquence de lancement de nouveaux produits. Afin d'améliorer les délais de développement et le temps de mise sur le marché, une possibilité consiste à prendre en compte les reconfigurations futures du système dans les choix d'architecture et de configuration du système.

Nous nous sommes appuyés sur une étude de terrain pour dégager la problématique industrielle et scientifique. Nous avons constaté qu'il est difficile d'avoir une vision détaillée des modifications à mettre en œuvre pour une solution de reconfiguration donnée. L'évaluation de ces solutions se base sur des critères métiers et projets parfois conflictuels pour la prise de décision. Il n'existe pas de processus de revue d'étude numérique positionné en phase amont de projet pour valider et justifier les choix.

L'objectif de ces travaux est de proposer des méthodes et des outils d'aide à la décision pour orienter les choix de reconfiguration d'un système de production en phase avant-projet d'industrialisation.

Les besoins industriels à l'origine de cette thèse, sont repris et discutés au regard des propositions développées. D'abord, il s'agit d'orienter les choix concernant la manière de faire évoluer une ligne de production lors de l'introduction d'un nouveau produit. Pour cela nous avons proposé une méthode de reconfiguration progressive permettant de construire des solutions qui prennent en compte l'impact des modifications sur la configuration de la ligne existante.

Ensuite, il s'agit d'évaluer et valider plus tôt dans le projet la faisabilité et les performances des solutions industrielles afin de réduire les délais d'étude entre la définition de solutions industrielles et le démarrage de la production en usine. Pour cela, nous avons utilisé une approche multicritère permettant de comparer différentes configurations d'atelier et de gamme d'assemblage pour choisir celle qui permet d'obtenir un meilleur compromis entre le coût et les efforts de reconfiguration.

Enfin, il s'agit d'identifier au plus tôt les problèmes potentiels pour les résoudre avant que la mise en service de la ligne de production soit effective. Pour cela, nous avons proposé un processus de revue numérique d'usine qui permet de détecter les problèmes potentiels liés au développement, à l'intégration et au démarrage de la ligne de production.

Nous pouvons en conclure d'une part que, l'introduction d'un nouveau produit représente une perturbation pour un système de production existant. Afin d'évaluer

l'impact de cette perturbation il est nécessaire d'analyser les modifications mises en œuvre lors du processus de reconfiguration de la ligne. Nous nous sommes inspirés de méthodes de réparation de planning pour minimiser l'impact de ces perturbations. Une analogie entre le réordonnancement et la reconfiguration de système a permis de mettre en évidence les concepts de base d'une méthode de reconfiguration progressive de ligne de production.

D'autres part, l'évaluation des choix de reconfiguration nécessite de prendre en compte le point de vue métier et le point de vue projet afin d'avoir une vision plus complète de la faisabilité et la performance technico-économique des solutions identifiées. Une des difficultés concernant le point de vue métier concerne l'identification des critères pertinents à partir des règles métiers. Une autre difficulté concernant le point de vue projet concerne la formalisation du problème multicritère et la présentation synthétique de l'évaluation à un décideur. Pour cela, nous avons pu confronter les outils de la méthode Prométhée à un cas d'application industriel.

VII.2 Perspectives

Les résultats de ce travail ouvrent des perspectives industrielles et scientifiques qui pourront faire l'objet de recherches futurs.

La méthode de reconfiguration progressive s'est basée sur une approche de gestion des perturbations dans un système sociotechnique. Nous avons mis en évidence la généricité de l'approche par la transposition et l'application à un domaine industriel de plus. Des perspectives d'approfondissement de la méthode sont possibles, notamment en ce qui concerne la stratégie unique d'exploration des solutions. Cette stratégie implique une exploration exhaustive de l'espace des solutions. Ce qui laisse au décideur le choix sur le niveau de modifications qu'il est prêt à mettre en œuvre. D'autres stratégies peuvent faire l'objet de travaux futures car dans la pratique, la manière de présenter les solutions ont un impact sur leur évaluation dans le sens où les ingénieurs vont étudier en premier lieu une solution de base, et en fonction du délai, les solutions secondaires sont étudiées.

Le principe d'évaluation proposé dans cette thèse préconise de prendre en compte deux points de vue : le point de vue métier pour la faisabilité technique des solutions et le point de vue projet pour la faisabilité financière et de planning. Un troisième point de vue concernant les contraintes propres à l'usine de fabrication peut être intégré dans l'étude. En effet, l'usine de fabrication représente l'utilisateur final du processus d'assemblage à reconfigurer. Il serait intéressant d'intégrer les préférences de l'utilisateur final dans l'évaluation.

L'analyse et l'évaluation des choix de reconfiguration ont permi d'étudier un certain

nombre fini de solutions en vue de permettre au décideur de faire un choix. Une fois ce choix déterminé, il serait intéressant d'étudier les possibilités d'optimisation de cette solution lors des études détaillées. En effet, des travaux plus ou moins aboutis existent dans le domaine de la recherche opérationnelle notamment en ce qui concerne l'équilibrage de ligne de production dans un contexte de reconfiguration. Ces études se base principalement sur des approches d'optimisation multiobjectifs [Chehade 12].

Les propositions concernant le processus de revue numérique d'atelier ont permis d'identifier les besoins métiers et mettre en évidence l'ensemble des fonctionnalités requises pour l'implémentation d'une solution logicielle de gestion des processus de fabrication (MPM). Il est envisageable d'implémenter les modèles de données utilisés lors du développement du scénario de revue d'étude dans un outil du marché et de déployer les cas d'usage du processus de revue numérique identifiés [Yannou 05], [Raza 11].

Liste des publications

Revue internationale avec comité de lecture

Feno, Remiel, Aline Cauvin, and Alain Ferrarini. 2016. Evaluation of assembly system reconfigurations at early stage of a re-engineering process using business rules. International Journal of Production Research. Soumis le 15 décembre 2015. En cours de révision.

Conférences internationales avec actes et comité de lecture

M. R. Feno, P. Martin, B. Daille-Lefevre, A. Etienne, J. Marsot, and A. Siadat "Safety of Manufacturing Equipment : Methodology Based on a Work Situation Model and Need Functional Analysis," in Advances on Mechanics, Design Engineering and Manufacturing : Proceedings of the International Joint Conference on Mechanics, Design Engineering & Advanced Manufacturing (JCM 2016), 14-16 September, 2016, Catania, Italy, B. Eynard, V. Nigrelli, S. M. Oliveri, G. Peris-Fajarnes, and S. Rizzuti, Eds. Cham : Springer International Publishing, 2017, pp. 1149–1157.

Feno, R., Cauvin, A., Ferrarini, A., 2015. Verification of design rules as an evaluation method during the reconfiguration of an assembly process. INCOM IFAC Symposium on Information Control in Manufacturing, Ottawa, Canada.

Feno, R., Cauvin, A., Ferrarini, A., Dalançon, T. 2015, Manufacturing engineering data integration for assembly process design review. ETFA Emerging Technologies for Factory Automation. Luxembourg, France.

Feno, R., Cauvin, A., Ferrarini, A., 2014. A Production System Reconfiguration Model Based on Repair Approach, in : Grabot, B., Vallespir, B.,

Gomes, S., Bouras, A., Kiritsis, D. (Eds.), Advances in Production Management Systems. Innovative and Knowledge-Based Production Management in a Global-Local World SE - 43, IFIP Advances in Information and Communication Technology. Springer Berlin Heidelberg, pp. 344–351.

Feno, R., Cauvin, A., Ferrarini, A., 2014. Conceptual Design and Simulation of an Automotive Body Shop Assembly Line, in : Benghozi, P., Krob, D., Lonjon, A., Panetto, H. (Eds.), Digital Enterprise Design and Management SE - 14, Advances in Intelligent Systems and Computing. Springer International Publishing, pp. 139–140.

Conférences nationales avec actes et comité de lecture

Feno, R., Cauvin, A., Ferrarini, A., 2013. Démarche de conception pour l'amélioration des performances des systèmes de production, in : *Congrès International de Génie Industriel*. La Rochelle, France, p. 7.

Références bibliographiques

[AFIS 09] AFIS. *Découvrir et comprendre l'ingénierie système*. Rapport technique, Association Française d'Ingénierie Système, 2009.

[Angéniol 05] Sandrine Angéniol, Bernard Yannou, Mickaël Gardoni & Roland Chamerois. *Analyse des besoins induits par la mise en place du Design to Cost chez Eurocopter Vers une amélioration du rôle des équipes support Design to Cost dans l ' aéronautique*. In CIGI05 : 6ème Congrès International de Génie Industriel, numéro 6, Besançon, 2005.

[Bana e Costa 08] Carlos a. Bana e Costa, Jean-Claude Vansnick & Carlos A Bana. *A critical analysis of the eigenvalue method used to derive priorities in AHP*. European Journal of Operational Research, vol. 187, no. 3, pages 1422–1428, jun 2008.

[Berrah 02] Lamia Berrah. L'indicateur de performance : Concepts et applications. Cépaduès-Editions, 2002.

[Berrah 07] Lamia Berrah & Vincent Clivillé. *Towards an aggregation performance measurement system model in a supply chain context*. Computers in Industry, vol. 58, no. 7, pages 709–719, sep 2007.

[Berruet 14] Pascal Berruet. *RMS : une évolution des systèmes manufacturiers*. Techniques de l'ingenieur, vol. 33, no. AG 3 515, 2014.

[Bi 08] Zhuming Bi, Sherman Lang & Weiming Shen. *Reconfigurable manufacturing systems : the state of the art*. International Journal of Production Research, vol. 46, no. 4, pages 967–992, feb 2008.

[Black 07] J Black. *Design rules for implementing the Toyota Production System.* International Journal of Production Research, vol. 45, no. 16, pages 3639–3664, 2007.

[Boothroyd 96] Geoffrey Boothroyd. *Design for Manufacture and Assembly : The Boothroyd-Dewhurst Experience.* In G Q Huang, editeur, Design for X SE - 2, pages 19–40. Springer Netherlands, 1996.

[Bosch-Mauchand 14] Magali Bosch-Mauchand & Vincent Cheutet. *Usine Numérique.* Techniques de l'ingénieur : Industrialisation et systèmes industriels, no. ref. article : ag3810, 2014.

[Bracht 05] U. Bracht & T. Masurat. *The Digital Factory between vision and reality.* Computers in Industry, vol. 56, no. 4, pages 325–333, may 2005.

[Brans 05] J P Brans, B Mareschal & Al. *PROMETHEE Methods.* In J Figueira, S Greco & M Ehrgott, editeurs, Multiple Criteria Decision Analysis : State of the Art Surveys, pages 163–196. Springer Verlag, Boston, Dordrecht, London, 2005.

[Cauvin 11] Aline Cauvin, Sebastien Fournier & Alain Ferrarini. *Disruption management in distributed organizations : a cooperative repair approach for reactive planning and scheduling.* In Albert Tavidze, editeur, Progress in Economic Research, volume 23, chapitre 6. Nova Science Publishers, Inc, 2011.

[Cerezuela 96] Catherine Cerezuela. *Contribution à l' élaboration de méthodes et d' outils d' aide à la conception dans une perspective d'ingénierie concourante. Le cas du câblage électrique.* PhD thesis, Université d'Aix-Marseille III, 1996.

[Chehade 12] H. Chehade, a. Dolgui, F. Dugardin, L. Makdessian & F. Yalaoui. *Multi-Objective Approach for Production Line Equipment Selection.* Management and Production Engineering Review, vol. 3, no. 1, pages 4–17, jan 2012.

[Chen 09] Jie Chen. *Reconfiguration Cost Analysis Based on PetriNet for Manufacturing System.* Journal of Software Engineering and Applications, vol. 02, no. 05, pages 361–369, 2009.

[Chen 12] Danfang Chen. *Information Management for Factory Planning and Design.* PhD thesis, KTH Royal Institute of Technology School of Industrial Engineering and Management, 2012.

[Chryssolouris 09] G Chryssolouris, D Mavrikios, N Papakostas, D Mourtzis, G Michalos & K Georgoulias. *Digital manufacturing : history, perspectives, and outlook*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B : Journal of Engineering Manufacture, vol. 223, no. 5, pages 451–462, may 2009.

[CIMDATA 03] CIMDATA. *Product Lifecycle Management (PLM) "Empowering the future of business"*. 2003.

[Colorni 01] A Colorni, M Paruccini & B Roy. A-MCD-A - Aide Multi Critère à la Décision - Multiple Criteria Decision Aiding. Joint Research Center. The European Commission, 2001.

[Dean 90] Edwin B Dean. *The Design-To-Cost Manifold by Design-To-Cost Design-For-Cost*. pages 1–13, 1990.

[Demoly 10] Frederic Demoly. *Conception intégrée et gestion d'informations techniques : application l'ingénierie du produit et de sa séquence d'assemblage*. PhD thesis, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard - UTBM, 2010.

[Djeridi 10] Radhouane Djeridi. *Contribution à la maîtrise de la disponibilité de systèmes complexes : proposition d'une méthode de réordonnancement proactif de la maintenance*. PhD thesis, École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers d'Aix-en-Provence, 2010.

[Dolgui 06] Alexandre Dolgui & Proth J M. Les systèmes de production modernes. Lavoisier, hermes edition, 2006.

[Ducq 07] Yves Ducq. *Evaluation de la performance d'entreprise par les modèles. HDR, Université de Bordeaux*, 2007.

[EFFRA 12] EFFRA. *Factories of the Future FoF 2020 Roadmap, EFFRA European Factories of the Future Research Association*, 2012.

[Farid 07] Amro M Farid. *Reconfigurability Measurement in Automated Manufacturing Systems*. PhD thesis, University of Cambridge, 2007.

[Feno 14] Remiel Feno, Aline Cauvin & Alain Ferrarini. *A Production System Reconfiguration Model Based on Repair Approach*. In Bernard Grabot, Bruno Vallespir, Samuel Gomes, Abdelaziz Bouras & Dimitris Kiritsis, editeurs, Advances in Production Management Systems. Innovative and Knowledge-Based

Production Management in a Global-Local World SE - 43, volume 440 of *IFIP Advances in Information and Communication Technology*, pages 344–351. Springer Berlin Heidelberg, 2014.

[Feno 15a] Mahenina Remiel Feno, Aline Cauvin & Alain Ferrarini. *Verification of design rules as an evaluation method during the reconfiguration process of production systems.* In IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline), volume 48, pages 1676–1681, Ottawa, Canada, 2015.

[Feno 15b] Remiel Feno, Aline Cauvin, Alain Ferrarini & Thomas Dalancon. *Manufacturing engineering data integration for assembly process design review.* In Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA), 2015 IEEE 20th Conference on, pages 1–4, Luxembourg, 2015.

[Feno 17] Mahenina Remiel Feno, Patrick Martin, Bruno Daille-Lefevre, Alain Etienne, Jacques Marsot & Ali Siadat. Safety of Manufacturing Equipment : Methodology Based on a Work Situation Model and Need Functional Analysis, pages 1149–1157. Springer International Publishing, Cham, 2017.

[Ferrarini 09] Alain Ferrarini, Sebastien Fournier, Erwan Tranvouez, C Cauvin & Aline Cauvin. *Decision aid using multiagent models and simulation : Disruption Management in Building Site organization.* In 20th International Conference on Production Research (ICPR'20), numéro 2004, pages 61 – 68, Shanghaï, Chine, 2009.

[Fleschutz 08] Timo Fleschutz. *Evaluation of assembly equipment reuse with real options.* In 2nd CIRP Conference on Assembly Technologies and Systems, Toronto, Canada, 2008.

[Garel 96] G Garel. *L'entreprise sur un plateau : un exemple de gestion de projet concourante dans l'industrie automobile.* In GERPISA, 1996.

[Geiskopf 04] François Geiskopf. *Formalisation et exploitation des contraintes Produit/Process pour la conception de systèmes de production : Application à l'Usinage Grande Vitesse.* PhD thesis, Université Louis Pasteur – Strasbourg I, 2004.

[Georgoulias 07] Konstantinos Georgoulias & Nikos Papakostas. *Flexibility assessment platform for the factory of the future.* Technology Management Conference (ICE), IEEE International, 2007.

[Georgoulias 10] Konstantinos Georgoulias. *Flexibility in manufacturing systems*. PhD thesis, University of Patras, Grece, 2010.

[Girard 01] Philippe Girard. *Analyse des décisions en conception*. Techniques de l'ingenieur AG 2 220, pages 1–12, 2001.

[H. Garbie 14] Ibrahim H. Garbie. *A methodology for the reconfiguration process in manufacturing systems*. Journal of Manufacturing Technology Management, vol. 25, no. 6, pages 891–915, 2014.

[Herrmann 03] JW Herrmann. *Design for production : Concepts and applications*. Proceedings of the SME East Coast Region 3 annual ..., pages 1–9, 2003.

[Holt 09] Raymond Holt & Catherine Barnes. *Towards an integrated approach to "Design for X" : an agenda for decision-based DFX research*. Research in Engineering Design, vol. 21, no. 2, pages 123–136, nov 2009.

[Hon 07] K.K.B. Hon & S. Xu. *Impact of Product Life Cycle on Manufacturing Systems Reconfiguration*. CIRP Annals - Manufacturing Technology, vol. 56, no. 1, pages 455–458, jan 2007.

[INRS 11] INRS. *Conception des lieux et des situations de travail - Santé et sécurité : démarche, méthode et connaissances techniques*. Rapport technique, Institut National de Recherche en Sécurité, 2011.

[Kichou 13] Loubna Kichou. *Evaluation et validation de l'évolution d'un ensemble d'indicateurs. Rapport de Master Recherche. Arts et Métiers ParisTech Aix en Provence.*, 2013.

[Koren 10] Yoram Koren & Moshe Shpitalni. *Design of reconfigurable manufacturing systems*. Journal of Manufacturing Systems, vol. 29, no. 4, pages 130–141, oct 2010.

[Kovalev 12] Sergey Kovalev. *Problemes combinatoires en configuration des lignes de fabrication : analyse de complexite et optimisation*. PhD thesis, Ecole Nationale Supérieure des mines de Saint Etienne, 2012.

[Kühn 06] Wolfgang Kühn. *Digital factory - Simulation enhancing the product and production engineering process*. In Proceedings of the 2006 Winter Simulation Conference, Vols 1-5, pages 1899–1906, New York, USA, 2006. IEEE, IEEE.

[Lamotte 06] Florent Frizon De Lamotte. *Proposition d'une approche haut niveau pour la conception, l'analyse et l'implantation des systèmes reconfigurables.* PhD thesis, Université de Bretagne Sud, 2006.

[Lee 93] HauL. Lee. *Design for Supply Chain Management : Concepts and Examples.* In RakeshK. Sarin, editeur, Perspectives in Operations Management SE - 3, pages 45–65. Springer US, 1993.

[Lelièvre 11] A Lelièvre. *Définition d'un cadre conceptuel et méthodologique pour concevoir un système à fléxibilité souhaitée.* PhD thesis, École Centrale Paris, 2011.

[Mas 13] Fernando Mas, JoséLuis JL Menéndez, Manuel Oliva, Alejandro Gómez & José Ríos. *Collaborative Engineering Paradigm Applied to the Aerospace Industry.* In Alain Bernard, Louis Rivest & Debasish Dutta, editeurs, Product Lifecycle Management for Society SE - 66, volume 409 of *IFIP Advances in Information and Communication Technology*, pages 675–684. Springer Berlin Heidelberg, 2013.

[Mer 95] Stéphane Mer, Alain Jeantet & Serge Tichkiewitch. *Les objets intermédiaires de la conception Modélisation et Communication.* In La communicationnelle pour concevoir, pages 21–41, Paris, France, 1995.

[Midler 93] Christophe Midler. L'auto qui n'existait pas : Management des projets et transformation de l'entreprise. Dunod edition, 1993.

[Minhas 12] S U H Minhas & U Berger. *A reconfiguration concept to enable versatile production in the automotive factories.* In Hoda A ElMaraghy, editeur, Enabling Manufacturing Competitiveness and Economic Sustainability SE - 58, pages 352–357. Springer Berlin Heidelberg, 2012.

[Moukkar 15] Zakaria Moukkar. *Modélisation du processus de reconfiguration des systèmes de production. Rapport de Master Recherche. Arts et Métiers ParisTech Aix en Provence.*, 2015.

[Nalepa 09] Grzegorz J. Nalepa & Maria a. Mach. *Business rules design method for Business Process Management.* International Multiconference on Computer Science and Information Technology, pages 165–170, 2009.

[Nguyen 13] Tal Nguyen. *Méthodologie de (re) conception de l'outil de production pour minimiser sa consommation d'énergie.* In 21è Congrès Français de mécanique, pages 1–6, Bordeaux, France, 2013.

[Nowak 05] Pierre Nowak & Benoît Eynard. *Managing design alternatives : from the alternatives model towards an aided design system Research survey.* pages 1–15, 2005.

[Oueslati 15] Slim Oueslati. *Elaboration et opérationnalisation d'une méthode d'évaluation solutions de reconfiguration de systèmes de production. Rapport de master recherche. Arts et Métiers ParisTech Aix en Provence.*, 2015.

[Pahl 07] G Pahl, W Beitz, HJ Schulz & U Jarecki. Engineering Design - A Systematic Approach. Springer, 3 edition, 2007.

[Pierreval 01] Henri Pierreval & JL Paris. *De l'optimisation de systèmes via la simulation à la configuration des systèmes via la simulation'.* In Modélisation et Simulation MOSIM, 2001.

[Poulet 11] A Poulet, B Rose & E Caillaud. *Towards a Quality Referential for Performance in Design.* In Alain Bernard, editeur, Global Product Development SE - 61, pages 609–618. Springer Berlin Heidelberg, 2011.

[Raza 11] M B Raza, T Kirkham, R Harrison & Q Reul. *Knowledge Based Flexible and Integrated PLM System at Ford.* vol. 1, no. 1, pages 8–16, 2011.

[Rebiha 02] Bacha Rebiha. *De la gestion des données techniques pour l'ingenierie de production referentiel du domaine et cadre methodologique pour l'ingenierie des systemes d'information techniques en entreprise.* PhD thesis, Ecole Centrale Paris, 2002.

[Rösiö 11] Carin Rösiö. *Considering Reconfigurability Characteristics in Production System Design.* 4th International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production (CARV2011), pages 57–62, 2011.

[Rösiö 14] Carin Rösiö & Jessica Bruch. *Focusing Early Phases in Production System Design.* In Bernard Grabot, Bruno Vallespir, Samuel Gomes, Abdelaziz Bouras & Dimitris Kiritsis, editeurs, Advances

in Production Management Systems. Innovative and Knowledge-Based Production Management in a Global-Local World SE - 13, volume 440 of *IFIP Advances in Information and Communication Technology*, pages 100–107. Springer Berlin Heidelberg, 2014.

[Roucoules 07] Lionel Roucoules. *Contribution à l'intégration des activités collaboratives et métier en conception de produit. Une approche au juste besoin. des spécifications fonctionnelles du produit aux choix des procédés de fabrication. HDR, Université de Technologie de Compiègne*, 2007.

[Roy 96] B Roy. Multicriteria Methodology for Decision Aiding. Kluwer Academic, Dordrecht, 1996.

[Saaty 00] T Saaty. Fundamentals of Decision Making and Priority Theory With the Analytic Hierarchy Process. RWS Publications, kindle edition, 2000.

[Scaravetti 04] Dominique Scaravetti. *Formalisation d'un problème de conception pour l'aide à la décision en conception préliminaire*. PhD thesis, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers de Bordeaux, 2004.

[Senechal 04] Olivier Senechal. *Pilotage des systèmes de production vers la performance globale*. PhD thesis, Université de valenciennes et du hainaut cambresis, 2004.

[Simon 60] H A Simon. *The New Science of Management Decision*. In Proceedings of the 33 rd Conference of the Operational Research Society of New Zealand, 1960.

[Skander 06] Achraf Skander. *Méthode et modèle DFM pour le choix des procédés et l'intégration des contraintes de fabrication vers l'émergence de la solution produit*. PhD thesis, Université de technologie de Troyes, 2006.

[Sprumont 07] Francois Sprumont & Jean-Pierre Muller. *Amacoia a multiagent system for designing flexible assembly lines*. Applied Artificial Intelligence, vol. 11, no. 6, pages 573–589, 2007.

[Tranvouez 01] Erwan Tranvouez. *IAD et ordonnancement : une approche coopérative du réordonnancement par systèmes multi-agents*. PhD thesis, Université de Droit, d'Economie et des Sciences d'Aix-Marseille III, 2001.

[Ullman 11] David G Ullman, Ryan Arlitt & Robert B. Stone. *Decision-Thinking in PLM.* Research in Engineering Design, pages 1–22, 2011.

[Vernadat 99] F Vernadat. Techniques de modélisation en entreprise : applications aux processus opérationnels. Gestion. Série Production et techniques quantitatives appliquées à la gestion. Economica, 1999.

[Walla 11] Waldemar Walla & Jens Kiefer. *Life Cycle Engineering – Integration of New Products on Existing Production Systems in Automotive Industry.* pages 1–6, 2011.

[Weston 08] R H Weston, Z Cui, X T Yan, B Eynard & W J Ion. *Next Generation Manufacturing Systems.* Enterprise Engineering and Integration Building International Consensus, pages 274–281, 2008.

[Wiendahl 07] H.-P. Wiendahl, H.a. ElMaraghy, P. Nyhuis, M.F. Zäh, H.-H. Wiendahl, N. Duffie & M. Brieke. *Changeable Manufacturing - Classification, Design and Operation.* CIRP Annals - Manufacturing Technology, vol. 56, no. 2, pages 783–809, jan 2007.

[Yannou 05] Bernard Yannou & R Bacha. *Gestion des données techniques pour l'ingénierie de process - Un cadre de référence pour l'ingénierie des systèmes d'information technique.* Revue internationale de CFAO et d'informatique graphique, vol. 4, no. 18, pages 485–504, 2005.

[Yannou 08a] Bernard Yannou, Hervé Christofol, Daniel Jolly & Nadège Troussier. La conception industrielle de produits Vol. 3 : ingénierie de l'évaluation et de la décision. Lavoisier edition, 2008.

[Yannou 08b] Bernard Yannou, Vincent Robin, Jean-Pierre Micaelli, Mauricio Camargeo & Lionel Roucoules. La conception industrielle de produits - Volume II : Spécifications, déploiement et maîtrise des performances. Hermès Sciences, 2008.

[Youssef 06] Ayman M. A. Youssef & Hoda A. ElMaraghy. *Assessment of manufacturing systems reconfiguration smoothness.* The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 30, no. 1-2, pages 174–193, 2006.

[Zolghadri 15] Marc Zolghadri & Florent Couffin. *Amélioration de performance de produit ou de systèmes : proposition et cadre d'analyse.* In Journées STP (Sciences et Techniques de Production) du GDR MACS, Troyes, France, 2015.

Liste des figures

I.1 Etapes de fabrication d'un véhicule 10
I.2 Processus d'assemblage de caisse automobile 11
I.3 Les acteurs du processus de développement d'un véhicule 12
I.4 Données d'entrée et de sortie du processus d'industrialisation 13
I.5 Processus de développement automobile 14
I.6 Etapes du cycle de vie d'un système industriel 18
I.7 Intégration de l'ingénierie produit et processus [EFFRA 12] 20

II.1 Processus global de reconfiguration 29
II.2 Concept d'activité et performances associées 31
II.3 Zones d'applicabilité des approches par options réelles 36
II.4 Processus de décision en ingénierie 37
II.5 Processus d'évaluation et justification en ingénierie système [AFIS 09] . . . 46
II.6 Pyramide de l'information pour la prise de décision 48
II.7 Structure du produit et du système d'assemblage 56
II.8 Positionnement de l'usine numérique 59

III.1 Passage d'une configuration initiale à une configuration souhaitée 68
III.2 Architecture et de configuration de ligne de production 69
III.3 Diagramme de bloc SysML d'une architecture d'implantation 70

III.4 Architectures d'unité d'assemblage de planchers arrières de véhicule 70
III.5 Diagramme de bloc SysML d'une configuration d'un processus d'assemblage 71
III.6 Configurations d'une ligne d'assemblage de plancher central 72
III.7 Schéma de configurations de ligne d'assemblage de plancher central 72
III.8 Phase de reconfiguration dans le cycle de vie du système de production . . 73
III.9 Données d'entrée et de sortie du processus de reconfiguration 74
III.10Processus de reconfiguration 74
III.11Principes de l'analogie 77
III.12Dynamique d'une stratégie de réparation d'ordonnancement 80
III.13Métamodèle de la méthode de réparation de planning 82
III.14Stratégie de reconfiguration progressive 86
III.15Opération de reconfiguration : décomposition d'une unité de production . . 87
III.16Opération de reconfiguration : transfert d'activité de production 88
III.17Opération de reconfiguration : échange de ressources ou d'outillages 88
III.18Métamodèle de la méthode de reconfiguration progressive 91

IV.1 Cycles de vie du produit et du système industriel [Wiendahl 07] 97
IV.2 Modèle d'évaluation des règles métiers 101
IV.3 Matrice de décision pour les critères métiers 105
IV.4 Configuration d'une unité d'assemblage de plancher central 106
IV.5 Résultats de l'évaluation 108
IV.6 Notion de préférence dans la méthode Prométhée 110
IV.7 Fonctions critères dans la méthode Prométhée 111
IV.8 Exemple de plan Gaia 114
IV.9 Courbe de coût-efficacité 115

V.1 Modèle numérique d'atelier DLOT 123
V.2 Modèle de données d'une revue numérique DLOT 124
V.3 Données d'entrée d'une revue numérique d'atelier 127
V.4 Structure des données Produit (BOM), Process (BOP) et Usine (BOE) . . 128
V.5 Modification d'une architecture d'implantation 129
V.6 Interface de configuration d'un processus d'assemblage 131

V.7 Revue globale d'architecture d'implantation d'atelier 132
V.8 Revue statique d'un processus d'assemblage 133
V.9 Revue dynamique d'une zone de chargement 134

VI.1 Gamme d'assemblage d'une portière de caisse de véhicule 142
VI.2 Schéma d'une configuration type de ligne d'assemblage d'ouvrant 142
VI.3 Planification de la production intégrant les futurs véhicules à fabriquer . . 143
VI.4 Configuration initiale 143
VI.5 Problème lié à la diversité sur la configuration initiale 144
VI.6 Ajouter une ligne robotisée 147
VI.7 Ajouter une ligne manuelle 148
VI.8 Solution H2C : Installer une nouvelle ligne flexible 148
VI.9 Matrice de décision pour les règles métiers 149
VI.10Paramètres de l'étude dans Visual Prométhée 151
VI.11Graphe de surclassement 153
VI.12Plan Gaia pour les choix de reconfiguration de la ligne de porte de coffre . 153
VI.13Analyse de sensibilité : Affectation des poids 154
VI.14Analyse de sensibilité : Modification de l'affectation des poids 155
VI.15Analyse de sensibilité : intervalle de stabilité de la pondération 156
VI.16Analyse de sensibilité : Modification de l'intervalle de stabilité de la pondération 157

A.1 Fonction de préférence : cas du critère d'investissement 189
A.2 Choix du type de fonction critère 190
A.3 Définition du seuil de préférence 191

B.1 Segment et gammes véhicules 194
B.2 Common Module Familly CMF 195
B.3 Mode de fabrication au remboursement (Rafale) 195
B.4 Fabrication par encyclage 196
B.5 Architectures d'implantation d'assemblage de plancher arrièr 197

Liste des tableaux

II.1 Avantages et inconvénients des langages de modélisation de processus . . . 32
II.2 Synthèse des langages de modélisation 33
II.3 Synthèse des approches de conception pour X 41
II.4 Comparatif des méthodes d'aide à la décision multicritère 52
II.5 Eléments comparatifs de la conception du produit et du process 54
II.6 Entités utilisées pour la conception du produit et du système de production 55
II.7 Vision usine du futur (Commission ICT de l'Union Européenne) 57
II.8 Comparatifs des fonctionnalités des systèmes PDM et MPM 60
II.9 Apport et limites de l'état de l'art 61

III.1 Analogie entre l'ordonnancement et le placement de câble [Cerezuela 96] . 77
III.2 Analogie entre le réordonnancement et la reconfiguration 83

IV.1 Tableau d'évaluation 104
IV.2 Exemple de matrice de décision : configurations du processus 112
IV.3 Limites d'indifférence et de préférence 112

VI.1 Matrice de décision pour la méthode Prométhée 151
VI.2 Table des flux des solutions 152

B.2 Attributs détaillés d'une unité de production 198

Terminologie

Système : ensemble d'éléments (humains ou matériels) interagissant entre eux selon un certain nombre de principes ou règles. Ensemble d'éléments en interaction mutuelle et en interaction avec l'environnement organisé en fonction d'un but. Correspond au système d'assemblage du produit dans ce manuscrit.

Système complexe : Système constitué d'un grand nombre d'entités en interaction qui empêchent l'observateur de prévoir sa rétroaction, son comportement ou son évolution par le calcul.

inducteur de performance : Un inducteur est un facteur qui influe le niveau de performance d'une activité [Berrah 02].

Processus d'assemblage

Assemblé Ensemble de pièces nues (pas encore travaillé), qui une fois liées ensemble, constituent un élément rigide pour une diversité donnée.

Chargement Opération de mise à disposition de pièces sur un moyen. Peut être effectué manuellement ou par un robot.

Diversité Décrit les différents cas d'utilisation pour un objet donné. Ex. B84,C84/DD (décrit une diversité B84 ou C84 en direction à droite uniquement).

Engagement Taux d'occupation effectif d'un moyen ou d'un opérateur.

Finition Réalisation des éléments de liaison qui assureront la tenue mécanique d'un assemblé. Complément du pointage.

Gamme d'assemblage (ou gamme opératoire) Liste ordonnée d'opérations à effectuer pour assembler un sous ensemble. Elle décrit l'ensemble des informations nécessaires pour spécifier le processus d'assemblage.

Graphe d'assemblage (ou cascade d'assemblage) Représentation schématique du processus d'assemblage qui montre (1) les assemblés constitués et (2) leur séquence d'assemblage (càd l'ordre dans lequel les pièces constituant une caisse sont assemblées entre elles)

Liaison Element permettant d'assembler deux ou plusieurs pièces (Point de soudure, gougon, colle ...).

Ligne d'assemblage Un ensemble de postes définis sur une zone géographique donnée.

Moyens d'assemblage L'ensemble des éléments nécessaires pour réaliser une opération (outillage, l'outil et l'élément manipulateur (robot ou opérateur) de l'outil)

Noeud d'assemblage Elément du graphe d'assemblage comprenant l'ensemble des assemblés qui sont créés sur un même poste et qui représentent une même pièce générique assemblée.

Nomenclature structuration de l'ensemble des composants et assemblages utiles pour les véhicules et organes.

Opération Toute action permettant de manipuler, positionner ou transformer des pièces en utilisant des moyens dans le processus d'assemblage. Ex. Chargement, évacuation, soudage...

Pièce générique Désignation générique d'une même pièce nue ou assemblée quelle que soit la diversité (ex. coté de caisse).

Poste de travail Lieu physique où sont réalisées des opérations sur le produit fabriqué. On y effectue au moins une opération d'approvisionnement et une opération d'évacuation.

Produit bien et/ou service proposé pour répondre à un besoin. Correspond au produit véhicule dans ce manuscrit.

Flux logistique

Flux Parcours qui permet de réaliser une caisse donnée. Un flux peut emprunter plusieurs lignes d'assemblage.

Kitting Mise en collection de pièces d'un véhicule pour plusieurs postes de travail qui sont préparées dans une boîte ou un support aménagé. Les boîtes ou supports seront introduits en séquence sur le flux principal du véhicule auxquels ils sont affectés.

Picking Sélection d'un ensemble de pièces pour un même poste qui sont encyclés sur un support aménagé (sens du film ou sens inverse). Le support est introduit au poste de travail.

Abréviations

D.M.D.R Digital Mock-Up Design Review ou remontage numérique du produit ou des processus de fabrication finalisant une phase de convergence du projet sur une solution technique.

AHP Analytic Hierarchy Process : méthode d'aide à la décision multicritère à base d'utilité.

TRIZ En russe Teorija Reshenija Izobretateliskih Zadatch ou théorie de résolution des problèmes inventifs.

Annexes

Annexe A

Compléments sur la méthode Prométhée

Sommaire

A.1 Terminologie 188
A.2 Choix de la fonction de préférence 188
A.2.1 Données statistiques sur la distribution de l'évaluation 189
A.2.2 Définition du type de fonction critère 190
A.2.3 Définition du seuil de préférence 190

En complément aux généralités présentés dans le manuscrit, cette section présente quelques terminologies de plus sur la méthode Prométhée. Quelques éléments de choix de la fonction de préférence et du type de fonction critère sont également présentés.

A.1 Terminologie

Solution : un choix possible à évaluer par rapport à plusieurs critères.

Catégorie : ensemble de solution qui partagent un même profil de performance

Cluster : ensemble de critères appartenant à un ou plusieurs groupes. C'est le premier niveau de la décomposition hiérarchique des critères.

Critère : attribut associé à chaque solution qui permet de comparer les solutions entre elles.

Groupe : sous ensemble de critères qui partagent le même profil dans un cluster. C'est le deuxième niveau de la décomposition hiérarchique des critères.

Hierarchie : Le premier niveau est compose de cluster Le deuxième niveau est composé de groupes de critères Le troisième niveau est composé de critères individuels

Incomparabilité : situation où la comparaison de deux solutions est difficile, souvent parcequ'elles ont des profils différents et l'un est meilleur que l'autre par rapport à plusieurs critères tandis que l'autre est meilleur que le premier par rapport au reste des critères. Cette situation rend les préférences des décideurs difficile à exprimer.

Fonction de préférence : Définit comment la différence des comparaisons par paire des solutions est traduit en degré de préférence. Elle représente la perception de l'échele de critère par le décideur.

Scénario : Ensemble d'évaluations et de paramètres de préférence qui sont définis pour un problème de décision. Un scénario peut représenter un point de vue de différents décideurs ou différentes hypothèses dévaluation.

Poids : pondération par un nombre positif qui représente l'importance relative d'un critère dans l'évaluation.

A.2 Choix de la fonction de préférence

La méthode Prométhée propose six types de fonction critère (fig. IV.7) : un critère usuel, un critère en U, un critère en V, un critère à pallier, un critère linéaire et un critère gaussien.

Le choix de la fonction de préférence dépend d'un certain nombres ce paramètres qui dépendent des informations concernant la distribution des évaluations d'une solution par rapport à un critère donné. Pour cela nous prenons l'exemple du critère "coût d'investissement".

A.2.1 Données statistiques sur la distribution de l'évaluation

Un premier bloc d'information concerne la distribution de l'évaluation des solutions. On y retrouve :

— Le type de critère : numérique, monétaire ou qualitative

— La valeur maximale

— La valeur minimale

— L'étendue

— La valeur moyenne

— L'écart type

— L'objectif de l'évaluation pour le critère : maximiser ou minimser

Un second bloc d'information concerne la distribution des différences par comparaison paire à paire de l'évaluation des solutions.

— La plus petite différence d'évaluation

— La plus grande différence d'évaluation

— La différence moyenne

— L'écart type de la différence

— La diversité est égale à 100% si toutes les évaluations sont différentes et décroit quant le nombre de lien augmente.

Criterion:	**Investissement**	***Evaluated on a currency scale***	
Minimum value:	€ 0,5	Average value:	€ 1,8
Maximum value:	€ 4,0		
Range:	€ 3,5	Standard deviation:	€ 1,2

This criterion is to minimize.

PROMETHEE relies on the principle of pairwise comparison of the actions.
We will thus look at the differences between the evaluations of the actions.
Here are some statistics:

Minimum (> 0) difference:	€ 0,5	Average difference:	€ 1,6
Maximum difference:	€ 3,5	Standard deviation:	€ 1,0
Diversity:	100,0 %		

Figure A.1 – Fonction de préférence : cas du critère d'investissement

A.2.2 Définition du type de fonction critère

Le choix du type de fonction critère est différent s'il s'agit d'un critère quantitatif ou qualitatif. En fonction de ce choix, une question est posée à l'utilisateur pour savoir si la différence est négligeable en comparant deux solutions par rapport à ce critère. Dans la capture d'écran, il apparaît en rouge comme le type actuellement sélectionné (en forme de V) est différent du type suggéré (linéaire).

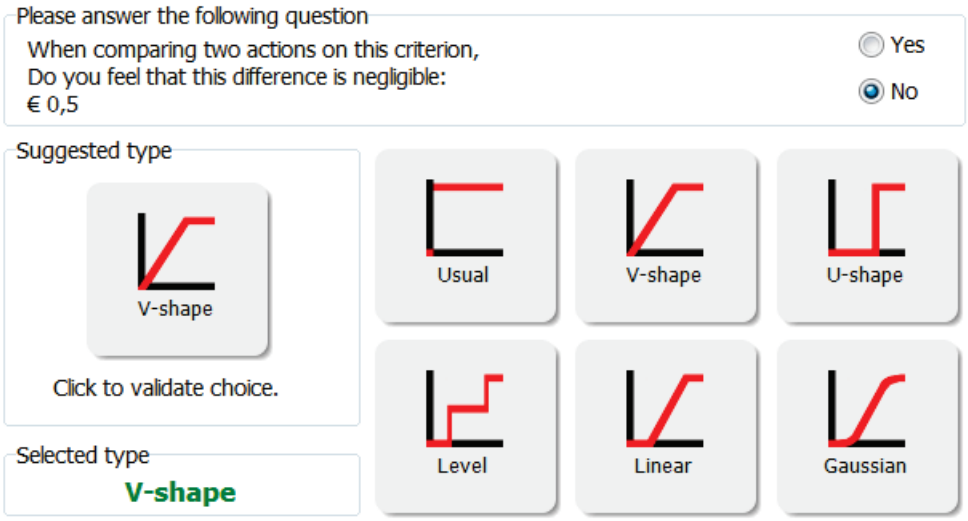


Figure A.2 – Choix du type de fonction critère

A.2.3 Définition du seuil de préférence

En fonction du type de fonction de préférence, on peut définir un seuil de préférence (P) et la valeur de ce seuil de préférence.

Le type de seuil de préférence peut être absolu ou variable. Pour définir ce type de seuil comparons deux solutions A et B par rapport au critère d'investissement et prenons en compte deux situations :

— Cas 1 : A=0,5 et B=1,2

— Cas 2 : A=3,3 et B=4,0

Dans les deux cas la solution A est préfèrable à la solution B. Mais est ce que cette préférence est :

1. plus importante dans le cas 1. Dans cette situation, un seuil de préférence variable (pourcentage) est approprié.
2. plus importante dans le cas 2. Dans cette situation, un seuil de préférence absolu est approprié.

3. n'est pas aussi importante dans le cas 1 que dans le cas 2. Dans cette situation, un seuil de préférence absolu est approprié.

Concernant la valeur du seuil de préférence La figure A.3 montre une représentation graphique de la fonction de préférence avec d'autres éléments information. Le rectangle du milieu (bleu) représente la distribution de la comparaison par paire des différences d'évaluation, de la plus petite à la plus grande différence, la barre verticale du milieu correspond à la valeur moyenne. Le trait à l'angle de la fonction de préférence (vert) représente la différence entre la valeur courante et la valeur suggérée pour le seuil de préférence.

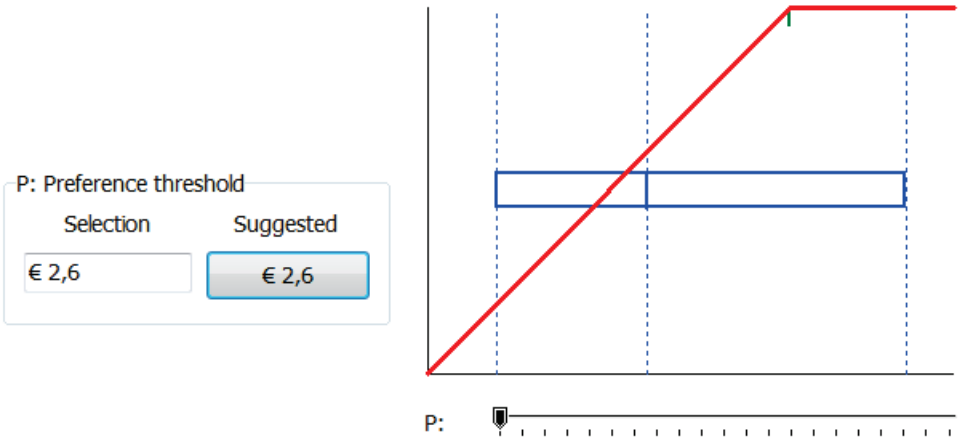


Figure A.3 – Définition du seuil de préférence

Annexe B

Processus d'assemblage tôlerie automobile

Sommaire

B.1 Notion de famille, plateforme et modèle de véhicule 194
B.2 Principes de gestion des flux d'assemblage 195
B.3 Architectures d'implantation de plancher arrière 196
B.3.1 Attributs détaillés d'une unité de production 197

B.1 Notion de famille, plateforme et modèle de véhicule

Un modèle de véhicule est caractérisé par son type de caisse (CS) et sa plateforme (PF). Le type de caisse définit le profil de la carrosserie et nombre de portes du véhicule.

Une famille de véhicule correspond à un ensemble de modèles de véhicules appartenant au même programme et qui partagent la même plateforme. On peut citer la famille X85 (Logan, Sandero)

La gamme du véhicule ou segment correspond à un découpage du marché selon les critères de taille (longueur, hauteur) et de type de carrosserie (sedan, break, monospace) (figure B.1).

Segmentation internationale	Segmentation Renault		Exemple Renault
A	I1	Economique	Twingo
B	I2	Inférieure	Clio, Sandero
C	M1	Moyenne inférieure	Megane, Scénic
D	M2	Moyenne supérieure	Laguna
E	S1	Haut de Gamme	Espace, Latitude

Figure B.1 – Segment et gammes véhicules

Notion de plateforme automobile Une plate-forme est la structure de base d'un véhicule, composée d'un châssis et de certaines pièces non visibles. Cette structure de base peut être utilisée pour construire des véhicules de modèles différents, de familles différentes et même de marques différentes.

Une "Common Module Familly" ou CMF est une architecture de fabrication qui couvre plusieurs modèles pouvant appartenir à plusieurs segments de véhicules et peut donc impliquer plusieurs plateformes. Elle est fondée sur l'assemblage de modules importants tels que : le compartiment moteur, habitacle, sous-caisse avant, sous-caisse arrière, circuit électrique/électronique (figure B.2). Une plateforme est une division horizontale tandis qu'une CMF est un concept transversal.



Figure B.2 – Common Module Familly CMF

B.2 Principes de gestion des flux d'assemblage

Trois modes de fonctionnement peuvent être rencontrés pour gérer les diversités des produits : à la demande, au remboursement et par encyclage. Il est toutefois important de fabriquer à la demande, du moins sur un périmètre donnée. Chaque mode de fonctionnement conduit à une architecture différente des lignes d'assemblage tôlerie.

B.2.0.1 Fabrication à la demande (au film)

La fabrication à la demande consiste à fabriquer directement les pièces de la bonne diversité, dans l'ordre d'une séquence des produits demandée (film véhicules). Elle permet de gérer un nombre important de diversité de produit (souvent > 20 en tôlerie).

B.2.0.2 Fabrication au remboursement (Kanban)

Sur des petits périmètres fabriquant peu de diversités (ex : unités de préparations), il est possible de ne pas fabriquer à la demande. La fabrication au remboursement consiste à produire une certaine quantité d'une diversité (rafale). Elle nécessite de prévoir un stock aval par diversité afin qu'elles soient disponibles pour l'atelier aval (voir figure B.3).

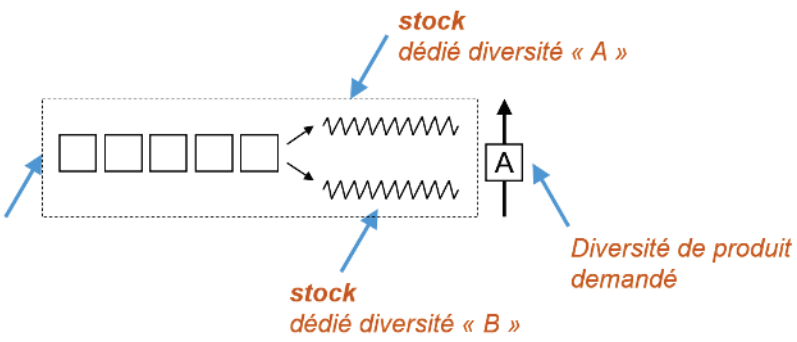


Figure B.3 – Mode de fabrication au remboursement (Rafale)

B.2.0.3 L'encyclage

L'encyclage est un mode de fabrication particulier à la demande (figure II.4). Le principe consiste à récupérer l'information de la diversité d'une pièce fabriquée à la demande sur la ligne principale, et de s'en servir pour lancer la fabrication dans une ligne secondaire. Cela permet de s'assurer que la diversité à lancer correspond à ce qui est réellement fabriquée sur la ligne principale.

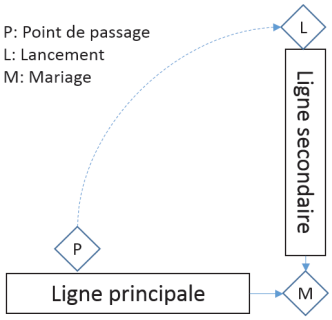


Figure B.4 – Fabrication par encyclage

Comparaison des modes de fabrication à la demande et au remboursement

B.3 Architectures d'implantation de plancher arrière

La figure B.5 présente le détail de plusieurs architectures d'implantation de lignes d'assemblage de plancher arrière de véhicule. Un choix parmis ces différentes architectures est à faire en phase avant-projet d'industrialisation. La configuration initiale correspond à la solution "usine1". Les autres solutions impliquent des modifications qui impactent l'implantation (topologie, découpage en îlots) et la capacité de production finale de la ligne.

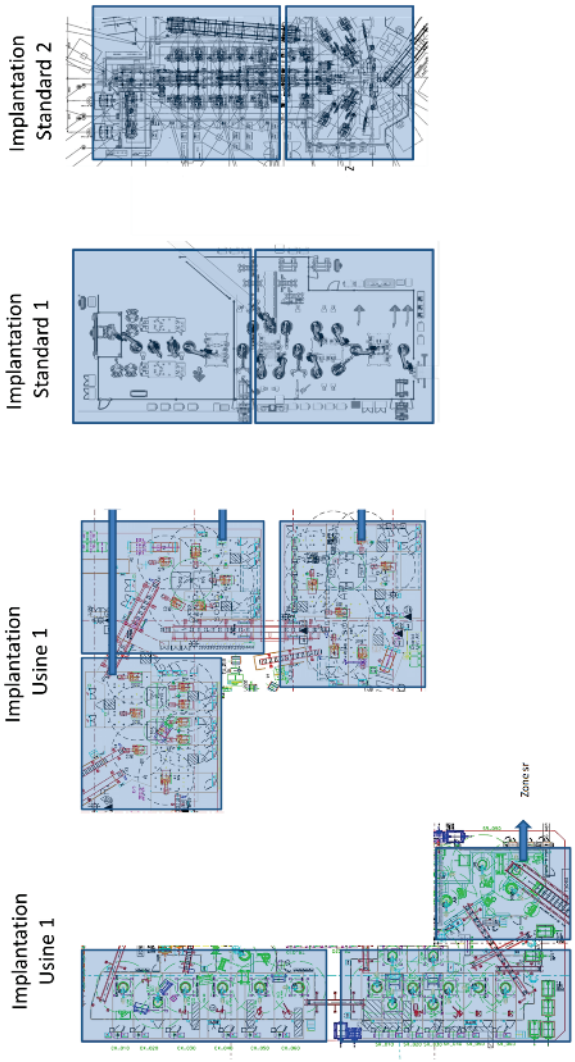


Figure B.5 – Architectures d'implantation d'assemblage de plancher arrièr

B.3.1 Attributs détaillés d'une unité de production

Le tableau B.2 reprends en détail attribut d'une unité de production présentés dans le chapitre 2. Ils sont organisés en catégories avec les paramètres, le type et les unités.

Catégorie	Attributs	Paramètres	Type / unité
Attributs spatiaux	Position	Coordonnées (Xi,Yi)	numérique
	Surface total	Surface	numérique (m^2)
	Surface fonctionnel	Surface process	numérique (m^2)
Attributs physiques	Postes de travail	Position	coordonnée
	Opérateurs	Nombre	numérique
	Capacité	capacité maximale	p/h
	Ressources	Quantité / type	numérique / texte
Attribut structurel	Décomposabilité	O/N	Booleen

Tableau B.2 – Attributs détaillés d'une unité de production

Analyse et évaluation de la reconfiguration d'une ligne de production en avant-projet d'industrialisation : application à l'assemblage en tôlerie automobile

RESUME :

En vue, d'introduire un nouveau produit dans une usine existante, plusieurs décisions concernant les évolutions possibles du système de production sont à prendre. Ces changements sont de plus en plus fréquents et nécessitent de reconfigurer aussi souvent le système, ce qui constitue de véritables perturbations durant son cycle de vie. Dans la phase avant-projet d'industrialisation, différentes solutions process sont à évaluer en termes de coût d'investissement, de délai de mise en œuvre, de qualité et de flexibilité du système de production. Les objectifs de conception sont multiples et parfois conflictuels. Ce qui rend difficile l'obtention d'un consensus lors de l'évaluation des solutions. De plus, il est difficile d'avoir une vision partagée de l'impact des modifications sur la configuration initiale d'une ligne de production. Les décisions prises dans cette phase ont un impact considérable sur les autres phases du projet (Développement, intégration, démarrage). Dans le but d'améliorer ces décisions, cette thèse se propose dans un premier temps, d'étudier les processus de reconfiguration d'une ligne de production afin d'identifier les solutions et leurs impacts sur la configuration initiale de la ligne. Ensuite, les critères de performances pertinents sont identifiés et organisés afin d'évaluer les solutions dans les phases amont du projet. Enfin, un processus de revue numérique d'atelier est proposé afin d'identifier au plus tôt les problèmes liés à l'intégration et au démarrage de la ligne pour valider les solutions retenues à différents jalons du projet.

Mots clés : Assemblage, reconfiguration, performances, décision,

Analysis and assessment of production system reconfiguration: application to a car body assembly process

ABSTRACT :

In order to introduce a new product in an existing plant, several decisions concerning possible changes in the production system have to be made. These changes are more frequent and require to reconfigure the system as often as needed. It represents a disruption during the system life cycle. Several solutions are assessed in terms of investment cost, reconfiguration time, quality and flexibility of the production system at the preliminary phases of the project. The objectives are multiple and sometimes conflicting. That makes difficult to reach a consensus in the assessment of solutions. Moreover, it is difficult to have a shared vision of the impact of changes on the initial configuration of a production line. The decisions made during this phase have a significant impact on the other project phases (development, integration, start of production). In order to improve these decisions, this thesis proposes first, to study the reconfiguration process of a production line in order to identify solutions and their impacts on the initial system configuration, then after, we identify and organize the relevant performance criteria to assess solutions with a multi-criteria based approach in the early phases of the project. Finally, we develop a factory digital review process to detect problems earlier and validate the solutions adopted at several project milestones.

Keywords : assembly, reconfiguration, performance, decision



ARTS ET MÉTIERS ParisTech

ParisTech INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES PARIS INSTITUTE OF TECHNOLOGY