



HAL
open science

Méthodologie d'organisation d'une ligne de montage véhicules basée sur l'analyse des variantes d'automatisation des opérations dans un contexte de production multi modèles

Hasnaa Ait Malek

► **To cite this version:**

Hasnaa Ait Malek. Méthodologie d'organisation d'une ligne de montage véhicules basée sur l'analyse des variantes d'automatisation des opérations dans un contexte de production multi modèles. Génie des procédés. HESAM Université, 2022. Français. NNT : 2022HESAE023 . tel-03811852

HAL Id: tel-03811852

<https://pastel.hal.science/tel-03811852>

Submitted on 12 Oct 2022

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

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

ÉCOLE DOCTORALE SCIENCES DES MÉTIERS DE L'INGÉNIEUR
Laboratoire de Conception, Fabrication et Commande – Campus de Metz

THÈSE

présentée par : **Hasnaa AIT MALEK**

soutenue le : **07 Avril 2022**

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

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

Spécialité : **Génie Industriel**

Méthodologie d'organisation d'une ligne de montage véhicules basée sur l'analyse des variantes d'automatisation des opérations dans un contexte de production multi-modèles

THÈSE dirigée par :

Pr. Ali SIADAT

et co-encadrée par :

MCf. Alain ETIENNE

Jury

M. Eric ZAMAÏ	Professeur	AMPERE, INSA Lyon	Président
Mme. Catherine DA CUNHA	Professeur	LS2N, Ecole Centrale Nantes	Rapporteuse
M. Pierre DAVID	Mcf HDR	G-SCOP, Grenoble INP	Rapporteur
M. Richard BEAREE	Professeur	LISPEN, Arts et Métiers	Examineur
M. Mohamed HAMLICH	Mcf HDR	Ingénierie des Structures, Systèmes Intelligents et Energie Electrique, ENSAM Casablanca	Examineur
M. Ali SIADAT	Professeur	LCFC, Arts et Métiers	Examineur
M. Alain ETIENNE	Mcf	LCFC, Arts et Métiers	Examineur
M. Thierry ALLAVENA	Expert montage	Groupe Stellantis	Invité

Remerciements

A celles et ceux qui, pendant ces trois années de thèse, m'ont aidée avec leurs expertises, leurs encouragements, leurs conseils ou leurs critiques bienveillantes. Je tiens à vous exprimer ici mes sincères remerciements.

Cette thèse n'aurait pas vu le jour sans la présence de trois personnes qui m'ont accompagnée pendant ces trois dernières années.

Mes remerciements vont donc au Pr. Ali SIADAT et au Mcf. Alain ETIENNE, pour avoir accepté de m'encadrer pendant ces trois années de thèse. Un grand merci pour vos conseils, votre écoute et votre relecture minutieuse des articles scientifiques et du manuscrit.

Je souhaite exprimer ma profonde gratitude à Mr Thierry ALLAVENA. Tu as permis d'apporter un fort aspect industriel à cette thèse. A travers ces quelques lignes, je tiens à te remercier pour ton accueil, ton écoute, ta disponibilité, le temps passé ensemble et le partage de ton expertise au quotidien. Tu étais d'une aide précieuse dans les moments les plus délicats.

Au sein du groupe Stellantis, je tiens à remercier mes collègues du Factory Booster et du plateau montage. C'est grâce aussi à leur collaboration et coopération que ce projet de thèse s'est bien déroulé.

Je souhaite remercier également Pr. Eric ZAMAÏ, Pr. Catherine DA CUNHA, Mcf HDR Pierre DAVID, Pr. Richard BEAREE, Mcf HDR Mohamed HAMLICH d'avoir accepté de suivre et d'évaluer ce travail de recherche.

Une pensée aux doctorants du groupe Stellantis et du laboratoire LCFC de Metz : Amélie, Ismail, Jelena, Juan, Mélodie, Mouad, Nadir, Safouane, Wahb... Ce fut un réel plaisir de partager cette expérience avec vous. Je vous souhaite le meilleur pour la suite.

Une pensée également à deux personnes avec qui je me suis liée d'amitié au cours de ces années de thèse : Hanane et Dylan.

Mes sincères remerciements aux meilleurs amis qu'une personne puisse rêver d'avoir : Hind, Mouad, Rehab et Zineb. J'ai trouvé auprès de vous une oreille attentive. Vous m'avez soutenue et encouragée durant toutes ces années, surtout pendant cette période de rédaction.

Un grand merci à la personne qui partage ma vie aujourd'hui. Tu as été d'un soutien précieux durant cette thèse. Etant toi-même Docteur, tu as su m'écouter, m'épauler et me conseiller.

Aux êtres les plus chers à mes yeux ; mes parents, aucun mot ne saura vous remercier suffisamment pour votre soutien indéfectible depuis mon premier jour aux bancs de l'école.

Ces remerciements ne peuvent s'achever sans une pensée très particulière pour mon petit frère Achraf.

Table des matières

LISTE DES TABLEAUX	1
LISTE DES FIGURES.....	3
ACRONYMES ET GLOSSAIRE	5
AVANT-PROPOS	7
CHAPITRE 1 : CONTEXTE GENERAL ET PROBLEMATIQUE DE L'AUTOMATISATION DES LIGNES DE PRODUCTION	9
1. CONTEXTE SCIENTIFIQUE : EVOLUTION DE L'AUTOMATISATION	10
2. CONTEXTE INDUSTRIEL : ATELIER MONTAGE AUTOMOBILE	11
2.1. Processus de production d'une voiture	11
2.2. Synoptique cible de l'atelier montage	12
2.3. Enjeux des lignes de montage multi-modèles	13
2.4. Besoins industriels.....	14
3. PROBLEMATIQUE ET OBJECTIFS DE LA THESE.....	15
CHAPITRE 2 : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE DES TRAVAUX CONCERNANT LE NIVEAU D'AUTOMATISATION ET LES METHODES D'AIDE A LA DECISION..	19
1. NIVEAU D'AUTOMATISATION (LOA)	20
1.1. LoA défini comme un degré d'évolution du système expert dans la prise de décision	21
1.2. LoA défini comme un degré d'automatisation des opérations physiques et cognitives	22
1.3. LoA défini comme un degré d'intelligence et d'autonomie	23
1.4. LoA défini comme un ratio de fonctions automatisées	24
1.5. LoA défini comme la répartition des tâches entre l'Homme et la machine.....	25
1.6. LoA défini comme un rapport de coûts	25
1.7. Synthèse de l'état de l'art	26
2. AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE L'AUTOMATISATION	26
3. L'HOMME ET L'AUTOMATISATION	28
3.1. Processus semi-automatisé	28
3.2. Automatisation hybride	30
4. CRITERES D'AUTOMATISATION	31
5. ETAT DE L'ART SUR LES DIFFERENTES METHODES D'AIDE A LA DECISION POUR AUGMENTER LE NIVEAU D'AUTOMATISATION.....	32
5.1. Méthode développée par Parasuraman, Sheridan et Wickens	33
5.2. Méthode développée par Ross	33
5.3. Méthode développée par Konold et Reger	34
5.4. Méthode développée par Boothroyd.....	34
5.5. Méthode développée par Almannai, Greenough et Kay	35
5.6. Méthode développée par Kapp	35
5.7. Méthodes développées par Lindstrom et Winroth, et par Fasth et Stahre	36
5.8. Méthode développée par Gorchach et Wessel	36
5.9. Méthode développée par Boothroyd et Dewhurst	36
5.10. Synthèse de l'état de l'art	37
6. CONCLUSION.....	38

CHAPITRE 3 : PROPOSITION D'UNE NOUVELLE METHODOLOGIE AFIN D'AMELIORER LE NIVEAU D'AUTOMATISATION DES LIGNES DE MONTAGE AUTOMOBILE..... 41

1. DEFINITION DU LOA PROPOSEE POUR LE SUJET DE THESE	42
2. PROPOSITION D'UNE METHODOLOGIE POUR AMELIORER LE NIVEAU D'AUTOMATISATION D'UNE LIGNE D'ASSEMBLAGE.....	43
2.1. Présentation de la méthodologie.....	43
2.2. Elaboration des gammes de montage	47
2.3. Modélisation des contraintes de précédence.....	49
3. QUANTIFICATION DES CRITERES DE SELECTION	51
3.1. Evaluation du coût.....	51
3.2. Evaluation de l'ergonomie	57
3.3. Evaluation de la flexibilité.....	62
3.4. Evaluation de la maturité de l'automatisation	63
4. METHODES D'ANALYSE MULTICRITERE	64
4.1. Méthodes d'agrégation totale	65
4.2. Méthodes d'agrégation partielle	66
4.3. Synthèse des méthodes d'analyse multicritère	67
5. CONCLUSION.....	68

CHAPITRE 4 : DEPLOIEMENT DE LA METHODOLOGIE ET MODELES DEVELOPPES SUR TROIS CAS D'ETUDE INDUSTRIELS..... 69

1. CONTEXTE DES ETUDES	70
2. ETUDE DE CAS INDUSTRIEL N°1 : VALIDATION DE LA METHODOLOGIE.....	70
2.1. Périmètre de l'étude.....	70
2.2. Application de la méthodologie.....	71
2.3. Analyse et comparaison des résultats obtenus par la méthodologie et par le métier montage.....	73
3. ETUDE DE CAS INDUSTRIEL N°2 : ANALYSE DES REGROUPEMENTS D'OPERATIONS	75
3.1. Périmètre de l'étude.....	75
3.2. Application de la méthodologie.....	76
3.3. A3 : Etude des regroupements.....	77
3.4. Analyse des résultats	78
4. ETUDE DE CAS INDUSTRIEL N°3 : OPERATIONS CRITIQUES EN ERGONOMIE.....	78
4.1. Périmètre de l'étude.....	79
4.2. Recherche de solutions	79
4.3. Estimation des critères.....	83
4.4. Application de la méthode AHP.....	86
5. CONCLUSION.....	87

CHAPITRE 5 : CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES 89

1. SYNTHESE DES TRAVAUX REALISES	90
1.1. Question 1 : Comment qualifier le degré d'automatisation d'un poste de travail ? Voir d'un atelier de montage ?	90
1.2. Question 2 : Quels sont les critères de regroupement d'opérations en vue d'équilibrer la charge opérateur et la charge moyens automatisés ?.....	90
1.3. Question 3 : Quelle est l'approche la plus adaptée pour chercher des regroupements d'opérations pour les automatiser ?.....	91
1.4. Question 4 : Quels sont les critères de sélection et la méthode permettant d'identifier le scénario d'automatisation optimal ?	91
2. LIMITES ET PERSPECTIVES.....	92

2.1. Définition du niveau d'automatisation	92
2.2. Recherche des regroupements d'opérations	92
2.3. Méthodologie développée	93
2.4. Autres perspectives.....	93
LISTE DES PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES.....	95
BIBLIOGRAPHIE	97
ANNEXES.....	103
ANNEXE 1 : METHODE PROPOSEE PAR PARASURAMAN, SHERIDAN ET WICKENS	105
ANNEXE 2 : METHODE DEVELOPEE PAR ROSS.....	106
ANNEXE 3 : METHODE DEVELOPEE PAR KONOLD ET REGER	107
ANNEXE 4 : METHODE PROPOSEE PAR ALMANNAI, GREENOUGH ET KAY	108
ANNEXE 5 : METHODE DEVELOPEE PAR BOOTHROYD	109
ANNEXE 6 : GRILLE D'EVALUATION RULA.....	110
ANNEXE 7 : FEUILLE DE SCORE MAC	111
ANNEXE 8 : CHECKLIST DE KEYSERLING.....	112
ANNEXE 9 : GRILLE D'EVALUATION DES 6 PARAMETRES DE LA METHODE STRAIN INDEX	113
ANNEXE 10 : ANALYSE DES DIFFERENTES METHODES D'EVALUATION DE L'ERGONOMIE	115
ANNEXE 11 : ETUDE DE CAS N°1 : MATRICE DE PRECEDENCE.....	116
ANNEXE 12 : ETUDE DE CAS N°1 : REGROUPEMENT D'OPERATIONS	117
ANNEXE 13 : ETUDE DE CAS N°2 : MATRICE DE PRECEDENCE.....	118
ANNEXE 14 : ETUDE DE CAS N°2 : REGROUPEMENT D'OPERATIONS	121
ANNEXE 15 : APPLICATION DE LA METHODE AHP POUR CALCULER LES POIDS DES PARAMETRES VOLUME ET VARIABILITE.....	123
ANNEXE 16 : EVALUATION DE LA FLEXIBILITE DES SOLUTIONS	124
ANNEXE 17 : APPLICATION DE LA METHODE AHP POUR LE CHOIX D'UNE SOLUTION TECHNIQUE	125

Liste des tableaux

Tableau 1 : Description des commandes proposées par Sheridan et Verplank [29]	21
Tableau 2 : Définition de LoA proposée par Sheridan et Verplank [29].....	21
Tableau 3 : Définition de LoA proposée par Endsley [32].....	22
Tableau 4 : Définition du LoA proposée par Frohm, Lindström et Winroth [33].....	22
Tableau 5 : Niveaux d'intelligence proposés par Riley [36].....	23
Tableau 6 : Niveaux d'autonomie proposés par Riley [36].....	23
Tableau 7 : Evaluation des définitions LoA issues de la littérature	26
Tableau 8 : Avantages et inconvénients des processus automatisés et manuels	27
Tableau 9 : Critères d'automatisation à étudier avant d'automatiser une ligne de production	31
Tableau 10 : Données d'entrée à prendre en compte avant d'automatiser une ligne de production.....	32
Tableau 11 : Evaluation des méthodologies issues de la littérature	37
Tableau 12 : Niveaux de LoA proposés pour la démarche de la thèse (Images de [75])	42
Tableau 13 : Exemple de codes et critères de regroupement	45
Tableau 14 : Description des différents types de gammes chez Stellantis [77].....	47
Tableau 15 : Facteurs à prendre en compte pour le calcul du coût	52
Tableau 16 : Quantification des paramètres du critère flexibilité	63
Tableau 17 : Quantification de la maturité d'automatisation	64
Tableau 18 : Comparatif des méthodes d'analyse multicritère	67
Tableau 19 : Caractéristiques des vissages des pièces concernées par les regroupements.....	72
Tableau 20 : Comparaison des résultats obtenus par la méthodologie et par le métier montage	74
Tableau 21 : Extrait des différents types d'opérations analysées.....	75
Tableau 22 : Regroupements d'opérations identifiés en appliquant l'activité A3.....	78
Tableau 23 : Exemple d'opérations critiques en ergonomie	79
Tableau 24 : Description du montage du TOP	80
Tableau 25 : Coûts des investissements pour chaque solution d'automatisation.....	84
Tableau 26 : Evaluation de la flexibilité des solutions techniques d'automatisation	85
Tableau 27 : Evaluation de la maturité des technologies proposées par les deux fournisseurs.....	86
Tableau 28 : Méthode AHP appliquée pour le choix d'une solution d'automatisation	86

Liste des figures

Figure 1 : Les axes de recherche du LCFC [1].....	7
Figure 2 : Evolution de l'industrie (Adaptée des travaux de [11]).....	10
Figure 3 : Synoptique des différentes étapes de production d'une voiture (Schéma adapté des travaux de Feno [18])	12
Figure 4 : Synoptique cible de l'atelier montage [19].....	13
Figure 5 : Schéma représentant les zones de déplacement des opérateurs sur une ligne de montage [22]	14
Figure 6 : Schéma d'un poste de travail positionné à gauche de la voiture sur une ligne de montage [23]	14
Figure 7 : Synthèse des objectifs des travaux recherche et des modèles développés.....	17
Figure 8 : Représentation des différents coûts en fonction du LoA dans le secteur de fabrication [37].....	24
Figure 9 : Modes de collaboration entre l'Homme et le robot. Les ombres vertes symbolisent les tâches exécutées par l'Homme et les bleues celles exécutées par le robot. La zone beige représente l'espace de travail [61]	29
Figure 10 : Evolution de la technologie entre 1960 et aujourd'hui [63]	30
Figure 11 : Présentation de la méthodologie proposée d'aide à la décision pour améliorer le niveau d'automatisation	43
Figure 12 : Détails de A2 – Identification de la nature d'opération la plus pénalisante en temps	44
Figure 13 : Détails de A3 – Analyse de regroupements d'opérations	45
Figure 14 : Détails de A6 – Etude de l'automatisation et de l'équilibrage de la ligne	46
Figure 15 : Elaboration d'une gamme d'assemblage : Contraintes et Indicateurs de performance (Adaptée des travaux d'Andolfatto [78])	48
Figure 16 : Diagramme de classes présentant la gamme d'assemblage de Stellantis.....	48
Figure 17 : Différentes étapes du programme développé pour modéliser et traiter les contraintes de précédence.....	49
Figure 18 : Décomposition des facteurs du coût	53
Figure 19 : Schéma d'obtention du score final en appliquant la méthode RULA	58
Figure 20 : Evaluation des tâches par la méthode MAC [106]	59
Figure 21 : Synthèse des valeurs OCRA et classement du risque	62
Figure 22 : Représentation d'une ligne HAM [126].....	71
Figure 23 : Exemple de gammes extraites avec code RGPT.....	71
Figure 24 : « Base de données » créée	72
Figure 25 : Configuration initiale de la ligne HAM	73
Figure 26 : Configuration de la ligne de production basée sur les résultats obtenus en appliquant la méthodologie.....	73
Figure 27 : Configuration de la ligne de production basée sur les résultats obtenus par l'industriel.....	74
Figure 28 : Configuration du flux principal	76
Figure 29 : Extrait de la base de données opérations, temps, critères de regroupement	76
Figure 30 : Configuration actuelle des brins de ligne MV2 et MV3	77
Figure 31 : Regroupement d'opérations proposé pour le site de Poissy	78
Figure 32 : Schéma de fixation du TOP extrait d'une gamme de montage de Stellantis	80
Figure 33 : Schématisation du processus du montage du TOP	81
Figure 34 : Présentation des skillets [19]	81
Figure 35 : Solution conçue avec le fournisseur (F1).....	82

Figure 36 : Solution conçue avec le fournisseur (F2).....	83
Figure 37 : Calcul des scores des solutions 2 et 4 en appliquant la méthode RULA	85

Acronymes et Glossaire

Acronymes

AF	Assemblage automatisé avec des machines de transfert libre
AHP	Analytic Hierarchy Process
AI	Assemblage automatisé avec des machines à indexation
AP	Assemblage automatisé avec chargement des pièces en manuel
AR	Arrière
AV	Avant
DST	Design Standard Time
DYNAMO	Dynamic Levels of Automation for Robust Manufacturing Systems
ELECTRE	ELimination Et Choix Traduisant la REalité
FCA	Fiat Chrysler Automobiles
FMEA	Failure Mode and Effects Analysis (<i>en Français : AMDEC</i>)
H	Hexagonale
HAM	Habillage Moteur
HC	Habillage Caisse
LI	Lifting Index
LoA	Level of Automation
LW	Loaded Weight
MA	Assemblage manuel
MAC	Manual handling Assessment Charts
Macbeth	Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique
MM	Assemblage manuel avec assistance mécanique
MV	Montage Véhicule
NA	Nombre total de pièces à assembler
ND	Nombre de pièces dont le Design a été changé durant les trois premières années
NP	Nombre de modèles de produits différents à assembler sur la ligne
NT	Nombre total de pièces qui concernent les différents modèles de la ligne
OCRA	OCCupational Repetitive Actions

OV	Opel Vauxhall
PC	Parechoc
PP	Préparation Porte
Prométhée	Preference Ranking Organisation METHod for Enrichment Evaluations
PSA	Peugeot Société Anonyme
QFD	Quality Function Deployment
RGPT	Regroupement
RI	Potentiel d'investissement dans l'automatisation
RULA	Rapid Upper Limb Assessment
RWL	Recommended Weight Limit
SH	Nombre d'équipe
SoPI	Square of Possible Improvements
TMS	Troubles Musculo-Squelettiques
TOP	Toit Ouvrant Panoramique
TRL	Technology Readiness Level
USA	Understand Simplify Automate
VS	Volume de production annuel par équipe
WA	Salaire annuel d'un opérateur

Glossaire

Au défilé	Par besoin d'efficience, les lignes sont dans un fonctionnement dit « au défilé ». Les opérations se font alors que les pièces avancent sur la ligne. Le but étant d'assurer la continuité de la production et limiter les temps non productifs des transferts.
DST	C'est le temps manuel de montage des pièces ainsi que les temps de contrôle inhérents à une non-capabilité produit/process (ex: contrôle qualité).
Stop & Go	C'est un mode de fonctionnement où la ligne de production est mise à l'arrêt pour effectuer les opérations nécessaires. Dans le cas d'une automatisation, si la technologie n'est pas assez mature pour faire les opérations au défilé, le poste automatisé est mis en mode Stop & Go. Ceci est plus pénalisant à la fois pour la régularité de la production mais aussi du fait du surcoût des pas de transfert entre les postes au défilé et les postes arrêtés. Une façon de minimiser cet impact est de positionner ces postes en Stop & Go, si possible, en fin de ligne.

Avant-propos

Cet avant-propos a pour but de donner un aperçu du contexte où se sont déroulés ces travaux de recherche. Pour illustrer la problématique et l'environnement dans lequel la recherche a été accomplie, plusieurs points sont introduits. Tout d'abord, le laboratoire de recherche est présenté, en mettant l'accent sur son expérience en matière de recherche. Ensuite, le contexte industriel est expliqué, en soulignant les besoins du partenaire industriel de cette recherche.

Contexte de la recherche

La recherche a été menée principalement au centre de recherche de développement du groupe Stellantis à Vélizy Villacoublay. Les travaux s'inscrivent dans le cadre d'une thèse CIFRE entre le groupe Stellantis et Arts et Métiers campus de Metz. Dans ce qui suit, l'accent est mis sur le laboratoire LCFC de Metz

Présentation des recherches menées au LCFC

Le LCFC, Laboratoire de Conception, Fabrication et Contrôle [1] est un laboratoire de recherche scientifique à l'Institut de Technologie Arts et Métiers en cotutelle avec l'Université de Lorraine. Il aborde des questions de recherche relative au développement des systèmes de production.

Les travaux au sein du LCFC s'articulent autour de trois axes principaux [1] :

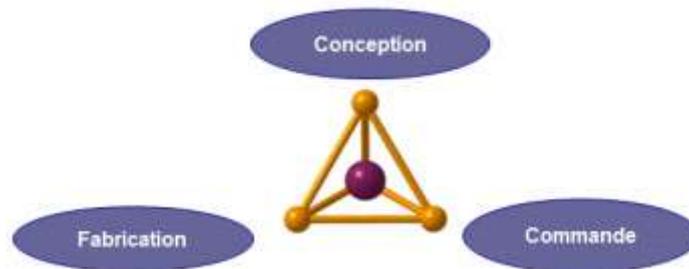


Figure 1 : Les axes de recherche du LCFC [1]

- **Conception** : Les travaux visent le développement des méthodologies et approches pour une conception robuste et fiable des systèmes de production.
- **Fabrication** : Les travaux visent le développement des méthodes et outils ayant pour objectifs l'optimisation des processus de fabrication.
- **Commande** : Les travaux visent le développement des modèles pour la commande robuste des systèmes de production.

Le sujet de la thèse traite l'axe *Conception* et s'inscrit dans le cadre de l'industrie du futur, plus connue sous le nom de l'industrie 4.0. Cette dernière représente une révolution industrielle qui permet de mettre en place des usines intelligentes. L'objectif est d'améliorer la productivité et faire face aux changements dans la production.

Toutefois, plusieurs questions sont abordées. Notamment les questions de coûts, de flexibilité ou encore de maturité technologique. Ainsi les travaux de la thèse visent à développer des méthodes et

modèles spécifiques ou d'adapter des méthodes et outils existants pour l'optimisation et l'automatisation des systèmes de production.

Contexte industriel

Cette thèse est menée en coopération avec le constructeur automobile Stellantis. Quatorze marques automobiles sont commercialisées par le groupe. Cinq marques sont issues du Groupe PSA et neuf sont issues du groupe FCA (*Fiat Chrysler Automobiles*). Cela signifie une production à haut débit et une grande diversité des modèles véhicules et pièces. Cette dernière est conduite également par la concurrence à laquelle est soumise l'industrie automobile et par les attentes et exigences des clients. Ainsi, les constructeurs automobiles font appel à l'automatisation et aux nouvelles technologies pour faire face à toutes ces contraintes.

Sur une ligne d'assemblage automobile, la fabrication des véhicules requiert des milliers d'opérations. Ces opérations sont de très courtes durées (quelques secondes). Ainsi pour réussir à rentabiliser un projet d'automatisation, il faut :

- Regrouper plusieurs opérations
- Equilibrer la ligne en maîtrisant la charge des opérateurs et celles des moyens automatisés

Ainsi, les travaux de recherche s'intéressent à analyser l'atelier assemblage automobile et à déployer les nouvelles technologies afin d'améliorer sa performance et son efficacité. Cela passe par la maîtrise l'équilibrage de la ligne, et par l'analyse des gammes d'assemblage pour regrouper et réorganiser les opérations.

Chapitre 1 : Contexte général et problématique de l'automatisation des lignes de production

Résumé

Ce chapitre a pour but d'expliquer le contexte scientifique et industriel du sujet de la thèse ainsi que la problématique et les questions de recherche axés sur les systèmes d'assemblage automobile. Ce chapitre présente également les défis rencontrés par les fabricants les conduisant à optimiser leur système de production, notamment du point de vue de l'automatisation.

Après la révolution industrielle, les usines ont connu de grands changements quant à leur mode d'organisation et de travail [2] [3] [4]. Avec la mondialisation, la concurrence, et l'évolution des exigences des clients, les industriels cherchent à maîtriser et optimiser d'avantage leurs systèmes de production. L'objectif est d'obtenir une meilleure performance industrielle tout en réduisant les coûts de fabrication.

Ainsi, afin de garantir une meilleure compétitivité sur le marché, il est devenu crucial de bien maîtriser son processus de production. Cela implique de faire des choix appropriés concernant la conception et l'automatisation.

Etant en constante évolution, l'industrie automobile était la première à automatiser ses lignes de fabrication [5]. Les industriels se sont dirigés vers l'automatisation pour accroître leur capacité de production et répondre au mieux à la variabilité de produits. Néanmoins, l'automatisation des lignes de montage reste un défi majeur. Certes, les nouvelles technologies en matière d'automatisation des opérations d'assemblage sont très développées, mais le débat sur ce sujet est toujours présent au sein des industriels et dirigeants. L'utilisation de processus hautement automatisés n'est évidemment pas la meilleure solution. Plusieurs critères rentrent en jeu pour répondre à plusieurs questions « Quelles opérations automatiser ? Quelle technologie ? L'automatisation est-elle rentable ? ». Ces critères peuvent être relatifs à l'aspect rentabilité et coût, à l'aspect qualité ou encore à l'aspect ergonomie.

C'est pour répondre à toutes ces questions, et pour analyser ces différents critères que ce travail de thèse a été initié. Ce chapitre présente, dans un premier temps, le contexte industriel en décrivant l'atelier montage automobile et en définissant les besoins industriels. Par la suite, il présente le contexte scientifique en expliquant les différentes définitions de l'automatisation ainsi que les changements liés à cette dernière. Pour finir, ce chapitre résume la problématique et les objectifs de la thèse.

1. Contexte scientifique : évolution de l'automatisation

Malgré les efforts fournis par Taylor et Ford, la majorité des observateurs s'accordent pour reconnaître que leur organisation n'est plus viable dans l'industrie [6], et en particulier dans l'industrie automobile [7], [8]. Ainsi, les entreprises ont commencé à instaurer de nouvelles méthodes d'organisation afin de remédier aux problèmes techniques que pose la production industrielle actuelle.

Plusieurs définitions du terme automatisation sont présentées dans la littérature. En 1997, Parasuraman et Riley [9] l'ont défini comme étant l'exécution, par une machine (généralement un ordinateur), d'une fonction précédemment faite par un humain.

En 2005, Claverie [10] fait une différenciation entre automatisation et automation. Il définit l'automatisation comme étant la démarche qui permet de rendre automatique un processus, ou l'état qui résulte du fait de l'automatiser. Par contre, il présente l'automation comme étant l'ensemble des processus automatiques substituant à l'Homme des automates, c'est à dire des systèmes matériels réalisant un comportement automatique. Ainsi d'après Claverie, l'automatisation des processus a changé les conditions de travail et le rôle de l'Homme dans l'industrie. Ce dernier est devenu, au lieu d'un acteur, un concepteur, un agent de maintenance ou un superviseur. Pour cela, deux voies ont été appréhendées. La première, avec une forte dominance en informatique, correspond à l'automatisation des postes de travail et au développement du domaine de l'interface entre l'Homme et la machine. La deuxième est établie en se basant sur le maintien de l'organisation traditionnelle des chaînes de montage, en substituant à l'Homme des automates particuliers qui imitent le mouvement.

La Figure 2 décrit l'évolution de l'industrie et les changements qu'elle a connus. La première révolution a apporté des changements majeurs dans l'industrie en utilisant la vapeur comme source d'énergie. La deuxième révolution industrielle a utilisé l'énergie électrique et la chaîne de montage pour la production de masse. L'intégration de l'électronique, de la technologie et des ordinateurs dans la fabrication a été vue dans la troisième révolution industrielle. Aujourd'hui, c'est la quatrième révolution industrielle qui prend place, et qui conduit au prochain niveau de fabrication où les machines vont se redéfinir dans la manière dont elles communiquent et effectuent des fonctions individuelles. Il s'agit du Smart Manufacturing et de l'internet des objets.

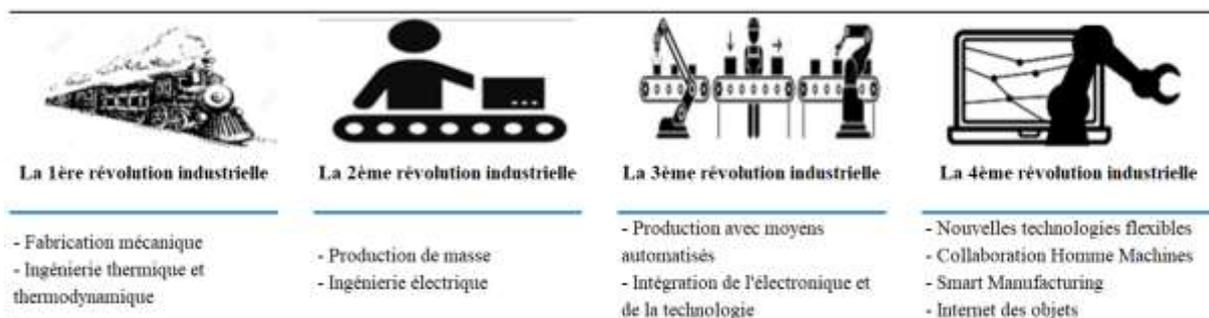


Figure 2 : Evolution de l'industrie (Adaptée des travaux de [11])

Ainsi avec l'automatisation, un nouveau terme a vu le jour : **Industrie 4.0**. Cette notion a été inventée par Henning Kagermann [11], [12] qui fusionne le monde virtuel et le monde réel en mettant l'accent sur des applications techniques telles que la robotique, la cobotique, la numérisation et l'automatisation. Dans l'industrie 4.0, la fabrication et les services sont caractérisés par des processus d'automatisation et de numérisation hautement développés. En effet, elle modifie considérablement les produits et les systèmes de production concernant la conception, les processus, les opérations et les

services [12]. Cependant, l'industrie 4.0 ne concerne pas uniquement l'industrie, il s'agit d'une transformation globale utilisant l'intégration numérique et l'ingénierie intelligente [11].

Du point de vue de la production et de la gestion des services, l'industrie 4.0 se concentre sur la mise en place de systèmes intelligents et communicatifs tels que l'interaction machine-machine et l'interaction Homme-machine [13]. Ainsi, l'industrie 4.0 favorise l'autonomie, l'agilité, la flexibilité, la prise de décision, l'efficacité et la réduction des coûts [14]. Néanmoins, l'automatisation peut engendrer plusieurs changements tant sur l'Homme que sur les systèmes de production.

L'automatisation modifie le rapport des Hommes au processus de production et les différentes installations utilisées [15]. En 2009, Lee et Seppelt [16] ont présenté une nouvelle vision des concepteurs vis-à-vis de l'automatisation. Ils la considèrent comme un moyen d'accroître l'efficacité et la sécurité du système tout en réduisant la participation de l'Homme. Toutefois, pour que l'automatisation tienne ses promesses, les concepteurs doivent éviter l'approche centrée sur la technologie et adopter une approche prenant en compte l'Homme et l'automatisation.

Cette thèse se positionne dans un contexte d'automatisation des lignes de montage en proposant une méthode d'aide à la décision qui analyse plusieurs données d'entrée (produits, environnement/usine, gammes de montage ...) et qui prend en compte plusieurs critères d'évaluation (coût, ergonomie, flexibilité ...) afin de proposer le meilleur scénario d'automatisation.

2. Contexte industriel : atelier montage automobile

Le processus de production d'une voiture suit plusieurs étapes allant de la fabrication de la carrosserie jusqu'au montage et assemblage final des divers composants. Cette partie présente le processus de production, les enjeux des lignes de montage, ensuite les besoins industriels qui sont à l'origine de ce travail de thèse.

2.1. Processus de production d'une voiture

Le produit automobile est composé de deux sous-ensembles. Le premier est la carrosserie qui répond à trois fonctions majeures : la fonction structure, la fonction abri et la fonction aérodynamique. Le second est l'ensemble des organes mécaniques : la chaîne de transmission (embrayage, boîte de vitesse, arbres et différentiel), les organes de liaison à la route (suspension, direction, circuit de freinage), la source et la distribution d'énergie (moteur, batterie, câblage...) et les équipements et accessoires (glaces, sièges...) [17]. Cette diversité de composants impacte le processus de production d'une voiture, ce dernier suit les quatre étapes suivantes : l'emboutissage, le ferrage, la peinture et le montage comme le décrit la Figure 3.

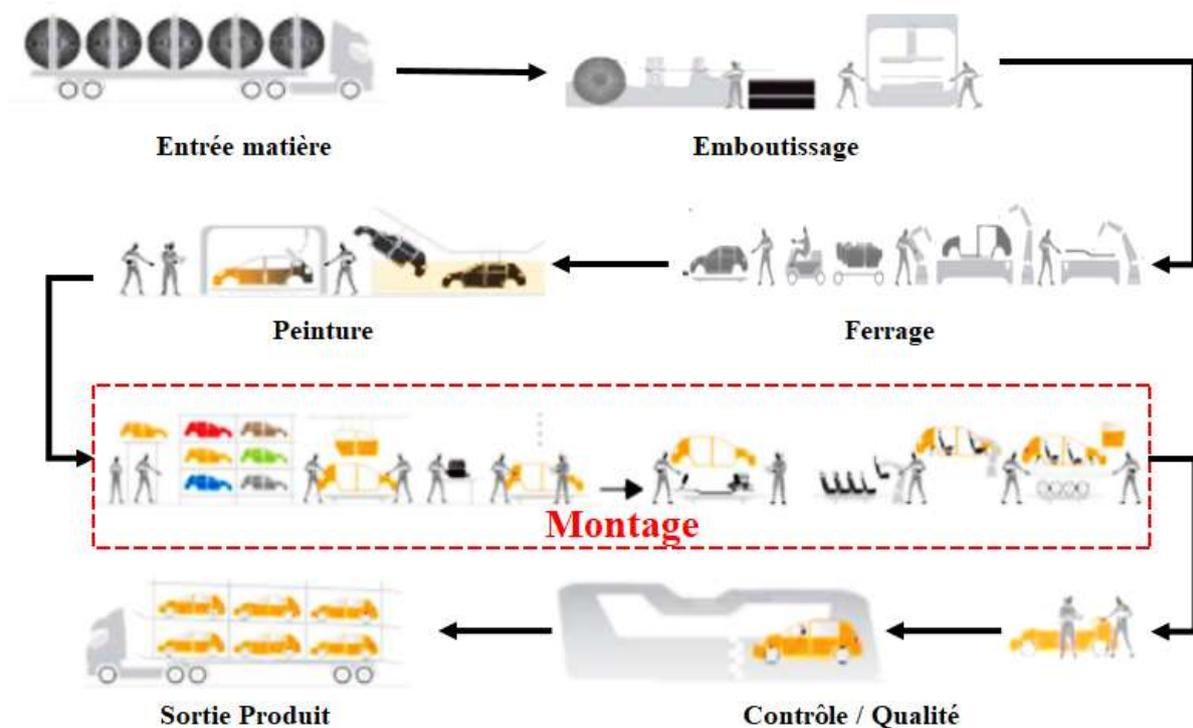


Figure 3 : Synoptique des différentes étapes de production d'une voiture (Schéma adapté des travaux de Feno [18])

Emboutissage : la préparation des pièces métalliques pour construire l'armature du véhicule, sa carrosserie et son châssis se fait dans cet atelier en transformant des bobines d'acier en pièces embouties consommées, par la suite, par l'atelier ferrage.

Ferrage : à partir des pièces embouties et en utilisant des outils de soudure automatisés, l'armature est fabriquée puis les éléments de la carrosserie (portes, capots...) sont assemblés.

Peinture : dans cet atelier, plusieurs traitements sont effectués sur le véhicule ; traitement de surfaces (anti-gravillons, anticorrosion, étanchéité), apprêts, laques et vernis.

Montage : cet atelier est le plus complexe et le moins automatisé ; l'Homme y est omniprésent. En effet, c'est dans cet atelier, que le véhicule prend sa forme finale ; différents composants y sont assemblés (vitres, tableau de bord, moteur, sièges, roues, calculateurs) et plusieurs contrôles qualité y sont effectués.

Chez les constructeurs automobiles, le montage est l'étape du processus de production des véhicules le moins automatisé. Les réflexions continuent pour définir la forme d'automatisation à mettre en place. Cet atelier est donc l'objet de ce travail de thèse.

2.2. Synoptique cible de l'atelier montage

L'atelier montage dispose d'une ligne principale qui est découpée en deux grands secteurs. Le premier est l'Habillage Caisse (HC) où sont installés les éléments structurels comme les faisceaux, la miroiterie ou encore le tableau de bord. Le deuxième secteur est le Montage Véhicule (MV) où sont installés les éléments fonctionnels comme : le moteur, les sièges ou encore les roues. Autour de cette ligne principale, se trouvent des zones de préparation comme la préparation des portes, du groupe

motopropulseur, ou encore la préparation des organes mécaniques. La Figure 4 illustre l'architecture de l'atelier montage et les différentes zones de préparation.

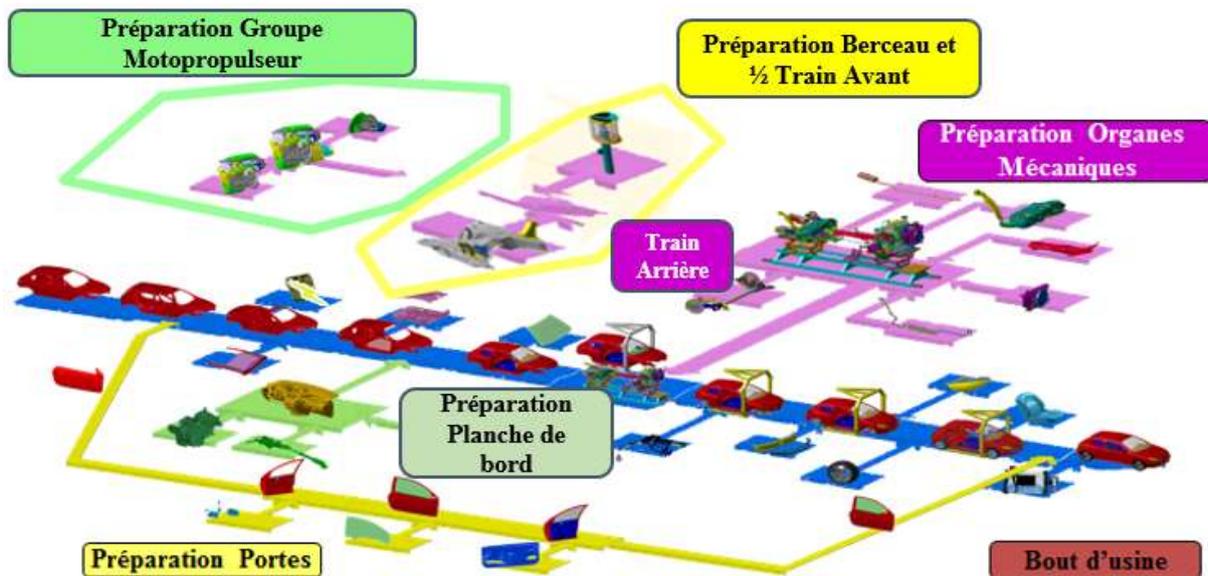


Figure 4 : Synoptique cible de l'atelier montage [19]

Le synoptique cible est un document qui décrit le fonctionnement considéré optimal de l'atelier montage allant de son architecture jusqu'à l'enchaînement des opérations. En effet, vu la complexité de cet atelier, il faut qu'il soit dimensionné au mieux, dans un esprit de gain de coûts de main d'œuvre et d'infrastructure.

2.3. Enjeux des lignes de montage multi-modèles

Le processus de montage est caractérisé par l'ensemble des relations de précédence qui induisent l'ordre d'exécution des tâches ainsi que par les temps opératoires. Selon le dictionnaire de la gestion de la production et des stocks [20], la ligne de montage est : « ... un système de production caractérisé par une implantation linéaire des postes de travail. Cette chaîne peut être constituée par une série de machines-outils reliées entre elles par des canalisations ou des convoyeurs. »

Aujourd'hui, la production de voitures connaît un accroissement et une diversité de modèles et d'options. Etant donné le coût des installations, le montage de ces différents modèles se fait sur la même ligne. Ces lignes de production sont appelées lignes d'assemblage multi-modèles [21]. Ceci pousse les entreprises à repenser l'organisation des flux et des moyens de production pour faire face à la diversité produit, mais aussi pour avoir des flux tendus qui permettent de réduire les délais clients [22]. Dans ces lignes, moyennant un convoyage automatisé, les produits passent par différents postes de travail. Le temps entre deux produits consécutifs est constant ; ce temps est appelé « Temps de cycle ».

Les opérateurs, quant à eux, suivent les produits durant leur passage dans les convoyeurs et doivent réaliser leurs tâches dans la limite du temps de cycle et en respectant leur zone de déplacement comme le montre la Figure 5.

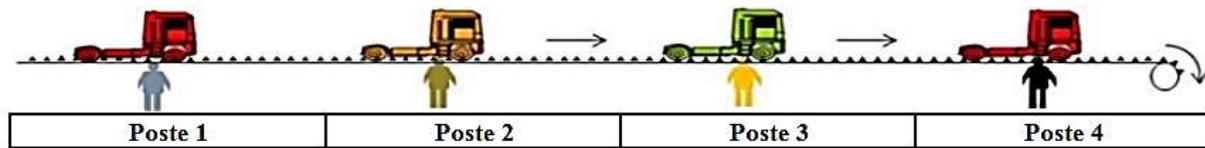


Figure 5 : Schéma représentant les zones de déplacement des opérateurs sur une ligne de montage [22]

Une ligne d'assemblage est découpée en plusieurs pas de travail ayant des longueurs identiques qui représentent l'écart entre l'avant de deux véhicules consécutifs [23]. Des zones de stockage d'outils et de pièces nécessaires à la réalisation des opérations sont présentes de chaque côté de la ligne. La Figure 6 schématise un poste de travail situé sur le côté gauche de la voiture. L'opérateur évolue dans un espace de travail délimité (rectangle avec traits discontinus). Il utilise des outillages fixes ou mobiles et consomme des pièces qui sont présents dans des zones de stockage. Le pas de travail est présenté par des traits discontinus.

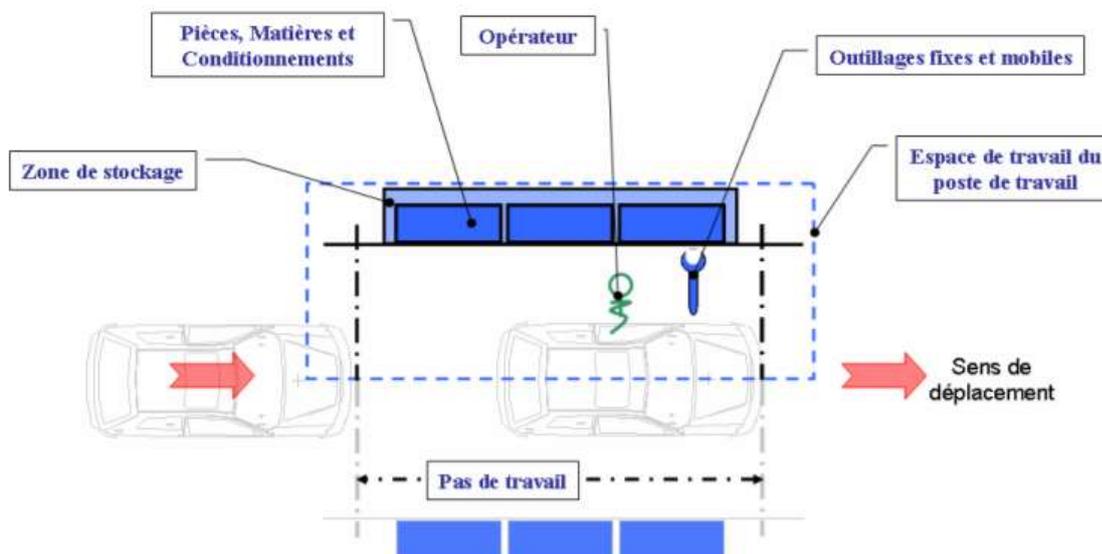


Figure 6 : Schéma d'un poste de travail positionné à gauche de la voiture sur une ligne de montage [23]

L'optimisation des postes de travail est l'un des objectifs primordiaux pour l'industrie. Cet enjeu peut être motivé par des problèmes de santé, d'ergonomie et de sécurité pour les opérateurs et/ou par la volonté d'améliorer les performances du poste (vitesse, cadence, précision, répétabilité, qualité, fiabilité ...) [24], [25]. Dans ce contexte de production, l'équilibrage des charges entre les différents postes de travail représente une contrainte qu'il faut prendre en compte. En effet, un mauvais équilibrage conduit à une mauvaise utilisation des ressources et compromet la rentabilité de la chaîne [22]. Il est donc important de bien élaborer ses gammes de montage.

2.4. Besoins industriels

Aujourd'hui, le défi technologique pour les industriels est d'avoir une ligne de production flexible au produit et au volume. Une ligne qui permet de fabriquer une grande diversité de produits avec des volumes de production différents tout en restant rentable. Cependant, le plus grand challenge est de

pouvoir intégrer de nouveaux produits qui n'existaient pas au moment de la conception et la mise en place de la ligne. Ainsi, la conception d'une ligne automatisée, flexible et reconfigurable s'inscrit dans la démarche « Usine du Futur » du constructeur automobile Stellantis.

A partir des études menées sur le terrain et les différentes réunions avec les industriels, il a été possible d'identifier l'ensemble des besoins industriels concernant l'automatisation de l'atelier montage automobile :

- Définir un indicateur pour mesurer le niveau d'automatisation des postes de travail et de l'atelier montage automobile
- Faire un état des lieux
- Définir une méthodologie pour évaluer et améliorer le niveau d'automatisation
- Comparer différents scénarios d'automatisation et choisir celui qui permet d'obtenir le meilleur compromis coût/qualité/ergonomie ...
- Prendre en compte les évolutions possibles des produits

3. Problématique et objectifs de la thèse

Pour faire face aux contraintes liées aux évolutions des produits, et aux exigences croissantes de la clientèle tout en restant compétitif sur le marché, les industriels automatisent de plus en plus leurs chaînes de production tout en analysant la portée de cette automatisation. Cette nouvelle direction permet également d'intégrer de nouvelles approches afin de remédier à des problèmes d'ergonomie et de qualité.

Pour l'atelier montage automobile, les automatisations existantes sont mises en place pour des opérations spécifiques qui sont concentrées sur des zones d'atelier dédiées et sécurisées sans interaction avec les opérateurs. Ces travaux de recherche ont pour but de proposer des évolutions des automatisations de l'atelier montage dans le cadre de l'industrie 4.0. Néanmoins, la diversité des modèles, des pièces ainsi que l'intégration de nouveaux véhicules (hybrides, électriques ...) sont des contraintes à prendre en considération pour atteindre une automatisation qui réponde aux critères de rentabilité, d'agilité et de flexibilité.

Chez Stellantis, la chronologie des opérations de montage est définie macroscopiquement par un synoptique générique qui structure l'architecture de l'atelier. Ceci permet de conserver le même ordre de montage des opérations structurantes vis-à-vis de la conception des véhicules et entre les différentes usines. Un autre axe de recherche consiste à améliorer ce synoptique générique en se basant sur les propositions d'automatisation qui vont être identifiées. Ainsi, le premier objectif sera de définir les principes et critères permettant d'identifier et de sélectionner les opérations à automatiser afin d'aboutir à une méthode d'aide à la décision. Par la suite, en appliquant cette méthodologie, des automatisations techniquement et économiquement faisables seront proposées.

Afin d'identifier les améliorations possibles et faire ainsi évoluer le synoptique cible, il sera nécessaire de répondre à la problématique de recherche suivante :

Comment identifier les zones d'assemblage à potentiel d'automatisation dans le cadre d'une production multi-modèles ?

A partir de cette question clé, un ensemble d'objectifs est dérivé. Ces objectifs permettent de guider et de structurer les travaux de recherche. Ils sont présentés sous forme de quatre questions qui traitent différents aspects de l'automatisation des systèmes de production.

- **Question 1 :** Comment qualifier le degré d'automatisation d'un poste de travail ? Voire d'un atelier de montage ?

Le travail de recherche a pour objectif de développer une méthodologie pour augmenter le niveau d'automatisation des chaînes de montage. Ainsi, la **Question 1** aborde la nécessité de définir une échelle d'évaluation et les paramètres clef de ce niveau. Cette échelle est utilisée, dans la suite des travaux, pour évaluer les postes de travail identifiés comme étant à potentiel d'automatisation.
- **Question 2 :** Quels sont les critères de regroupement d'opérations en vue d'équilibrer la charge opérateur et la charge moyens automatisés ?

A travers le regroupement, l'industriel cherche à équilibrer la charge des opérateurs et la charge des installations automatisées. Ainsi, la **Question 2** met l'accent sur les différents critères à prendre en compte pour pouvoir chercher des regroupements d'opérations.
- **Question 3 :** Quelle est l'approche la plus adaptée pour chercher des regroupements d'opérations pour les automatiser ?

L'objectif de l'industriel est, avant tout, de mettre en place des automatisations rentables. Etant donné que les opérations de montage sont très courtes en durée, la recherche de regroupements d'opérations reste la meilleure solution pour garantir le critère de rentabilité. La **Question 3** aborde cette problématique. L'objectif est de conduire les travaux de recherche vers le développement d'une approche qui permet de rechercher des regroupements d'opérations.
- **Question 4 :** Quels sont les critères de sélection et la méthode permettant d'identifier le scénario d'automatisation optimal ?

Une fois, les regroupements d'opérations effectués, plusieurs scénarios d'automatisation sont proposés. Ainsi, afin de déterminer celui qui respecte le plus la vision de l'industriel, plusieurs critères de sélection sont à définir et à quantifier. La **Question 4** a donc pour objectif de mettre en lumière cet aspect de décision multicritère.

La Figure 7 donne un aperçu des objectifs de la recherche. Elle présente les liens qui existent entre eux et les modèles développés pour répondre à chacune des quatre questions formulées. Premièrement, il faut analyser toutes les données d'entrée : l'architecture de l'usine, les gammes de production ou encore la conception des produits actuels et futurs. A partir de ces informations, il faut étudier les contraintes de précédence entre les opérations de montage, et les critères qui permettent de les regrouper. A l'issue de cette analyse, plusieurs scénarios avec un niveau d'automatisation sont proposés. La décision se fait sur la base d'une analyse multicritère pour déterminer le scénario « optimal ».

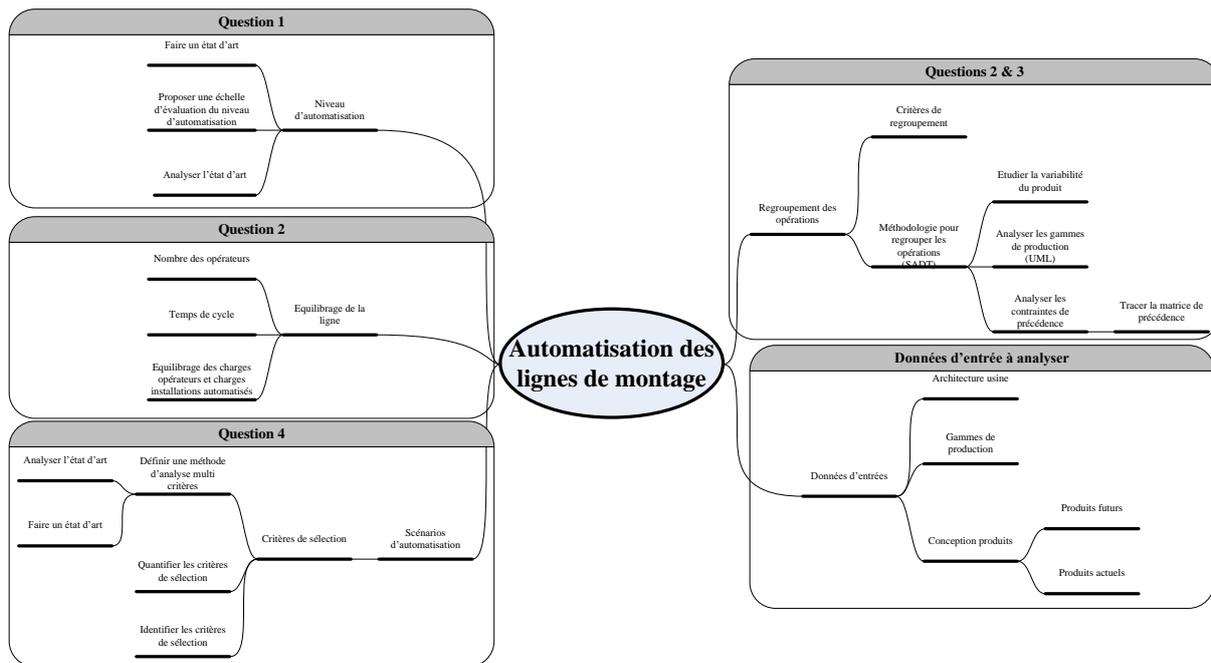


Figure 7 : Synthèse des objectifs des travaux recherche et des modèles développés

La structure de ce document suit également la logique des objectifs de recherche. Ce manuscrit comprend donc cinq chapitres :

Chapitre 1 détaille le contexte des travaux ainsi que les besoins industriels et scientifiques. La problématique globale de recherche est définie. A partir de cette problématique, quatre questions sont dérivées et présentées.

Chapitre 2 analyse l'état de l'art réalisé sur chacun des aspects abordés par les questions de recherche. Les travaux issus de la littérature sont discutés et leurs lacunes sont expliquées. Le besoin de nouveaux modèles et méthodes est souligné.

Chapitre 3 répond aux différentes questions en détaillant les modèles et méthodes développés. Ce chapitre propose ainsi une définition du niveau d'automatisation adéquate aux travaux de thèses (*Question 1*). Par la suite, il définit les différents critères permettant le regroupement d'opérations (*Question 2*). Ce chapitre présente la méthodologie développée pour augmenter le niveau d'automatisation des lignes de montage (*Question 3*) ainsi que les modèles de calcul pour le choix d'un scénario d'automatisation (*Question 4*).

Chapitre 4 présente trois cas d'études industriels. Les différents modèles et méthodes développés sont appliqués pour analyser différentes zones de la ligne montage automobile.

Chapitre 5 conclut le travail de recherche effectué. Il résume les différentes contributions et souligne leurs limites. Ceci permet de proposer de nouveaux axes de recherche.

Chapitre 2 : Etude bibliographique des travaux concernant le niveau d'automatisation et les méthodes d'aide à la décision

Résumé

Ce chapitre étudie les différents travaux de recherche autour de l'automatisation des systèmes de production. Il introduit le concept du niveau d'automatisation (LoA) en présentant plusieurs définitions issues de la littérature. Il met en évidence les différentes exigences qu'un indicateur LoA et qu'une méthodologie d'aide à la décision doivent satisfaire pour répondre aux questions de recherche préalablement présentées. Sur la base de ces exigences les définitions LoA et méthodologies issues de la littérature sont évaluées.

Comme indiqué dans l'introduction, au cours des dernières années, l'automatisation a été adoptée davantage par les fabricants. Ainsi, pour atteindre une performance industrielle et faire face à la concurrence, l'une des solutions pour chaque fabricant est de rationaliser l'automatisation. En effet, lorsqu'elle est conçue de manière appropriée, elle permet de réduire considérablement les coûts et résoudre de multiples problèmes liés à la qualité, la répétabilité ou encore l'ergonomie.

Toutes ces données confirment qu'il est nécessaire de déterminer le niveau d'automatisation convenable pour chaque fabricant. Ceci permet d'atteindre les objectifs de l'industriel tout en évitant des investissements dans des solutions inappropriées.

Ainsi afin de répondre aux questions préalablement posées dans le chapitre 1, il est tout d'abord nécessaire d'étudier les travaux en lien avec la problématique de la thèse. Ce chapitre a pour but de présenter et d'analyser la bibliographie.

Ce chapitre introduit la notion du niveau d'automatisation (LoA). Plusieurs définitions qui existent dans la littérature sont étudiées et analysées et les avantages et les limites de chaque définition sont identifiés. Ce chapitre décrit également les différentes formes de l'automatisation. Ses avantages et inconvénients sont soulignés et les différents critères à prendre en compte sont mis en évidence.

La dernière partie de ce chapitre est consacrée aux différentes méthodologies d'aide à la décision en terme d'automatisation présentes dans la littérature. Une analyse de chacune de ces méthodes est faite et les exigences que doit respecter une méthodologie adéquate au traitement du sujet de la thèse sont détaillés.

1. Niveau d'automatisation (LoA)

La recherche dans le domaine a montré l'importance de l'intégration de l'Homme et de la technologie dans le processus d'automatisation des chaînes de production. Ceci permet d'avoir des systèmes de fabrication durables et robustes. Les données fournies par des entreprises américaines indiquent qu'il est important d'inclure les aspects humains lors de la mise en œuvre d'une technologie de fabrication avancée [26], [27].

De nombreuses études montrent que la plupart des décisions d'automatisation sont prises par la direction générale et que cela a pour conséquence des résultats inférieurs à ceux attendus lors de l'investissement [28]. Souvent, la direction générale initie l'automatisation dans le but de réduire les coûts de fabrication, ainsi l'automatisation relève de la stratégie globale de l'entreprise. Cependant, des recherches [26], [28] ont montré que l'appui aux décisions en matière d'automatisation reste faible.

Il est donc nécessaire de développer des outils d'aide à la décision afin de d'identifier un niveau d'automatisation approprié pour des systèmes de production plus efficaces et robustes.

Actuellement, il n'existe pas de métrique du niveau d'automatisation. Ainsi, cette partie introduit ce concept en abordant les différentes approches présentes dans la littérature. L'objectif est d'aboutir à une proposition d'une échelle d'évaluation de cet indicateur pertinente pour ce sujet de thèse.

Pour chaque scénario d'automatisation, cette échelle permettra de quantifier le niveau d'automatisation du poste de travail étudié et ainsi évaluer la part du travail manuel et la part des installations automatisées.

Les définitions du concept de LoA sont nombreuses. Le mode d'évaluation n'est pas le même, des travaux proposent une évaluation quantitative tandis que d'autres s'orientent vers une approche qualitative.

La littérature autour de ce sujet a été analysée. Les travaux proposent de définir le LoA comme :

- Un degré d'évolution du système expert dans la prise de décision
- Un degré d'automatisation des opérations physiques et cognitives
- Un degré d'intelligence et d'autonomie
- Un ratio de fonctions automatisées
- La répartition des tâches entre l'Homme et la machine
- Un rapport de coût

Une bonne définition du niveau d'automatisation (LoA) adéquate pour le sujet de la thèse doit respecter les exigences suivantes. Elle doit être applicable pour les **systèmes de production existants** ou **futurs**. Un bon indicateur doit être **quantitatif**, pour avoir des données mesurables qui peuvent être facilement surveillées pour adopter le LoA selon les besoins. L'échelle doit **traiter le mode opératoire**, c'est-à-dire les opérations physiques que la machine ou l'Homme peut effectuer. Une bonne définition du LoA doit être **objective** et peut permettre une prise de décision selon une méthodologie plutôt qu'une intuition. L'indicateur doit permettre **une automatisation partielle**, et donc avoir des niveaux entre entièrement manuel et entièrement automatique. Et enfin, l'échelle doit donner une vision claire aux décideurs sur **la part des opérateurs et des machines**, ce qui permettra d'évaluer le potentiel d'automatisation des postes de travail.

1.1. LoA défini comme un degré d'évolution du système expert dans la prise de décision

L'une des plus anciennes définitions que l'on puisse trouver dans la littérature est celle proposée par Sheridan et Verplank [29] et reprise dans différents travaux [30], [31]. Les auteurs ont identifié six fonctions qu'un opérateur humain ou un ordinateur peuvent exécuter durant une opération : *Requests* (demande), *Gets* (récupère), *Selects* (sélectionne), *Approves* (approuve), *Starts* (commence) et *Tells* (informe). Le Tableau 1 donne une explication de la manière dont l'opérateur humain et l'ordinateur sont censés coopérer sous différents LoA pour chacune de ces commandes.

Tableau 1 : Description des commandes proposées par Sheridan et Verplank [29]

Commande	Description
Requests	Demande à l'autre partie
Gets	Va chercher ce qui est demandé
Selects	Choisit parmi les options celle qui convient à l'action envisagée
Approves	Accepte ou refuse une décision particulière
Starts	Initie la mise en œuvre
Tells	Informe de ce qui a été fait

Dans ce sens, ils définissent l'automatisation comme un remplacement total ou partiel d'une fonction précédemment exercée par l'opérateur humain. Cela implique, que l'automatisation n'est pas totale ou inexistante, mais qu'elle peut varier selon différents niveaux. Le Tableau 2 présente les 10 niveaux de LoA, définis par les auteurs.

A un niveau bas 2 (Tableau 2), plusieurs options sont proposées à l'Homme, mais le système n'a pas son mot à dire quant à la décision. Au niveau 4, l'ordinateur suggère une alternative de décision, mais l'être humain conserve le pouvoir d'exécuter cette alternative ou d'en choisir une autre. À un niveau supérieur 6, le système ne laisse à l'Homme qu'un temps limité pour exercer son droit de veto avant de prendre une décision.

Tableau 2 : Définition de LoA proposée par Sheridan et Verplank [29]

LoA	Description
Niveau 1	Contrôle entièrement manuel, l'ordinateur n'offre aucune assistance
Niveau 2	L'ordinateur offre un ensemble complet d'alternatives. Plusieurs options sont proposées à l'Homme, et c'est lui qui décide
Niveau 3	L'ordinateur réduit le nombre des alternatives, et c'est toujours l'Homme qui décide
Niveau 4	L'ordinateur suggère une seule option, l'Homme peut décider de la suivre ou non
Niveau 5	L'ordinateur exécute l'option si l'Homme l'approuve. L'approbation de l'Homme est nécessaire
Niveau 6	L'ordinateur laisse un temps limité à l'Homme pour décider avant exécution de l'action
Niveau 7	L'ordinateur exécute l'action automatiquement et informe l'Homme
Niveau 8	L'ordinateur informe l'Homme si ce dernier demande l'information
Niveau 9	L'ordinateur informe s'il juge cela nécessaire
Niveau 10	Contrôle total de l'ordinateur. Il décide de tout et agit avec autonomie

Toujours dans la même catégorie, en 1995, Endsley [32] a montré que les systèmes experts sont utilisés pour compléter la prise de décision humaine. En effet, dans cette approche, l'Homme y est pilote. Le Tableau 3 présente les cinq niveaux d'automatisation (ou de contrôle) qu'Endsley propose.

Tableau 3 : Définition de LoA proposée par Endsley [32]

LoA	Description
Niveau 1	Manuellement sans assistance du système
Niveau 2	Par l'opérateur en s'appuyant sur les recommandations fournies par le système
Niveau 3	Par le système, avec le consentement de l'Homme
Niveau 4	Par le système, à mettre en œuvre automatiquement sauf en cas de veto de l'Homme
Niveau 5	Automatiquement sans interaction avec l'Homme

Dans cette définition, il y a moins de niveaux entre le 100% Manuel et le 100% Automatique comparé à la précédente. Dans son approche Endsley élimine ou amplifie l'effort du système expert sur l'Homme.

1.2. LoA défini comme un degré d'automatisation des opérations physiques et cognitives

En 2008, Frohm, Lindström et Winroth [33] ont défini le niveau d'automatisation comme étant l'allocation des opérations physiques et cognitives entre l'Homme et la technologie. En effet, pour eux, le LoA est présenté sous forme de deux degrés : un pour les opérations physiques, et l'autre pour les opérations cognitives. Le Tableau 4 présente les sept niveaux LoA proposés par les auteurs.

Tableau 4 : Définition du LoA proposée par Frohm, Lindström et Winroth [33]

LoA	Physiques	Cognitives
Niveau 1	Totalement manuelle	Complètement manuelle : l'Homme crée sa propre compréhension de la situation et développe son plan d'action sur la base de son expérience et de ses connaissances antérieures.
Niveau 2	Outil à main statique (<i>static hand tool</i>)	Propositions pour réaliser l'opération
Niveau 3	Outil à main flexible (<i>flexible hand tool</i>)	Guides/Formations pour réaliser l'opération
Niveau 4	Outil à main automatisé (<i>automatic hand tool</i>)	Demande de validation
Niveau 5	Machine statique (<i>static machine</i>)	Supervision
Niveau 6	Machine flexible (<i>flexible machine</i>)	Intervention et Correction
Niveau 7	Totalement automatisée	Totalement automatisée

Dans cette définition, les auteurs ont fait la différence entre les opérations physiques et cognitives. Cette échelle devrait être appliquée poste par poste. Le degré de description semble être précis. Pourtant, distinguer l'automatisation mécanique et l'automatisation de l'information est plus appropriée pour améliorer les processus existants que pour concevoir de nouveaux systèmes pour lesquels l'échelle d'information est difficile à décrire. D'un autre côté, cette approche considère la flexibilité comme un niveau et non comme un critère primordial pour le choix de la technologie. De plus, la définition des niveaux est ambiguë. Par exemple, une machine statique (LoA = 5) peut être considérée comme totalement automatisée (LoA = 7).

Un autre cas de confusion consiste à distinguer un niveau où l'opération est totalement manuelle (LoA = 1) et un niveau où l'opération nécessite l'utilisation d'un outil manuel statique (LoA = 2). Cela semble inutile, du moins pour le traitement de la problématique de la thèse. En effet, l'utilisation d'un

outil manuel (tel qu'une visseuse ou un tournevis) ne change pas la décision concernant l'automatisation. Pour les travaux de thèse, le niveau devrait être « manuel ».

1.3. LoA défini comme un degré d'intelligence et d'autonomie

En 1989, Riley a défini un modèle général d'interaction Homme-machine. Son modèle présente des facteurs qui définissent 7 niveaux d'intelligence (Tableau 5) et 12 niveaux d'autonomie (Tableau 6) [34]. Chaque combinaison d'un niveau d'intelligence et d'un niveau d'autonomie est appelée *Etat d'automatisation* et chaque état correspond à une forme unique prédéfinie [35].

Tableau 5 : Niveaux d'intelligence proposés par Riley [36]

Niveau d'intelligence	Description
Niveau 1	Données brutes sans aucun traitement
Niveau 2	Le système traite les informations ou agit selon des procédures prédéfinies
Niveau 3	Réponse contextuelle ; le système peut changer de comportement pour répondre à son environnement
Niveau 4	Le système peut contenir un modèle statique des préférences d'un opérateur particulier
Niveau 5	Le système peut déduire de manière dynamique l'intention de l'opérateur en fonction du contexte et du comportement de l'opérateur
Niveau 6	Le système peut également utiliser des informations sur l'état physique de l'opérateur
Niveau 7	Le système peut anticiper les actions de l'opérateur

Tableau 6 : Niveaux d'autonomie proposés par Riley [36]

Niveau d'autonomie	Description
Niveau 1	Opérations manuelles
Niveau 2	Traitement des informations disponibles
Niveau 3	Le système ne peut effectuer aucune action par lui-même, sauf conseiller l'opérateur
Niveau 4	Recommandations : La machine n'a pas le pouvoir d'agir et se limite à la communication avec l'opérateur
Niveau 5	Recommandations avec interaction : La machine n'a pas le pouvoir d'agir et se limite à la communication avec l'opérateur
Niveau 6	Recommandations adaptatives : La machine n'a pas le pouvoir d'agir et se limite à la communication avec l'opérateur
Niveau 7	La machine est serviteur et a la possibilité de réaliser des actions
Niveau 8	La machine est assistant et peut effectuer des actions mais nécessite l'approbation de l'opérateur
Niveau 9	La machine est associée et peut effectuer des actions de manière autonome sans autorisation explicite de l'opérateur, mais l'opérateur peut toujours le remplacer
Niveau 10	La machine est partenaire et dispose des mêmes droits que l'opérateur
Niveau 11	La machine est superviseur et peut remplacer l'opérateur qui n'a pas d'autorité
Niveau 12	Opération entièrement autonome

Dans les six premiers niveaux d'autonomie (Tableau 6), la machine n'a aucune autorité pour agir. Elle est limitée à la communication avec l'opérateur. Les six derniers niveaux donnent à la machine la possibilité d'agir. Les distinctions entre ces niveaux d'autonomie sont établies en fonction du traitement de l'information de la machine et de l'autorité pour manipuler les écrans de l'opérateur. Par

exemple, une machine *Associée* est autonome et capable de réaliser des actions sans l'autorisation explicite de l'opérateur, mais celui-ci peut toujours l'annuler. Une machine *Partenaire* a le même pouvoir de dérogation que l'opérateur, et une machine *Superviseur* peut remplacer l'opérateur, mais l'opérateur ne peut pas l'ignorer [35]. Cette définition est très détaillée. Toutefois, pour les automatisations mécaniques, les 6 premiers niveaux peuvent être considérés entièrement manuels.

1.4. LoA défini comme un ratio de fonctions automatisées

Gorlact et Wessel [37] considèrent que le LoA représente la partie des fonctions automatisées d'un système par rapport à la totalité des fonctions du système. Chaque niveau LoA est associé à un coût. Dans le secteur de la fabrication, le coût total par unité par rapport au niveau d'automatisation peut être représenté graphiquement, comme indiqué dans la Figure 8.

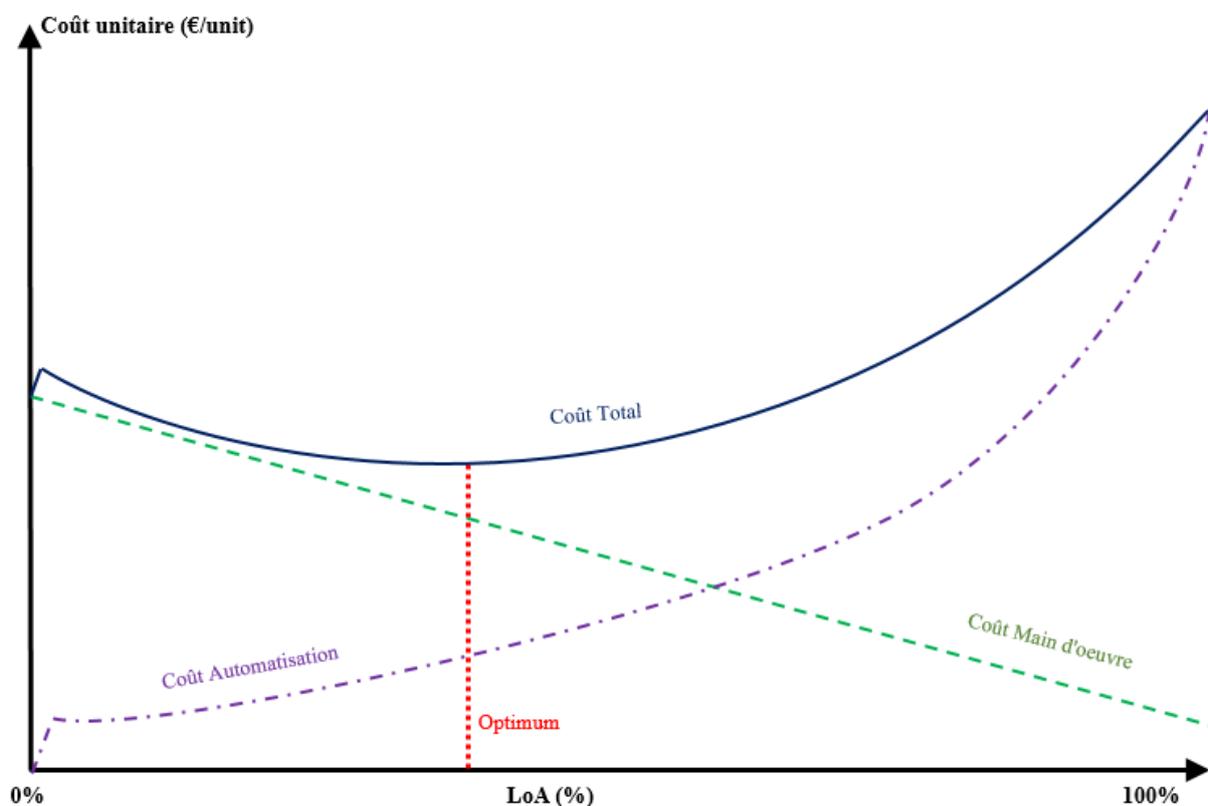


Figure 8 : Représentation des différents coûts en fonction du LoA dans le secteur de fabrication [37]

L'analyse de la Figure 8, permet de constater que le coût de la main d'œuvre directe diminue proportionnellement à l'augmentation du niveau d'automatisation. Les opérations économiquement justifiables sont automatisées en premier lieu. Ceci justifie que le coût de l'automatisation augmente presque linéairement.

Par la suite, les dépenses augmentent de manière disproportionnée en raison de la complexité croissante du système. Ainsi, l'atteinte d'une automatisation complète fait augmenter son coût d'une façon exponentielle, alors que les coûts de la main d'œuvre ne diminuent que de façon linéaire. Ceci engendre un coût total plus élevé.

Pour le calcul des coûts, Gorlach et Wessel [37] ont pris en compte :

- La main d'œuvre : Le salaire de tout le personnel impliqué dans la réalisation et la planification du processus d'assemblage, ainsi que les coûts sociaux qui dépendent essentiellement de la qualification des travailleurs
- Le matériel d'exploitation : Les coûts de toutes les installations nécessaires pour le montage et le transport
- La matière première et les consommables

1.5. LoA défini comme la répartition des tâches entre l'Homme et la machine

En 2006, dans ses travaux, Frohm [38] a choisi de définir le niveau d'automatisation (LoA) comme étant le degré d'allocation des tâches entre l'Homme et la machine. Ce degré peut être exprimé sous forme d'indice entre 1 (tâche entièrement manuelle) et 9 (tâche entièrement automatisée).

Dans leurs travaux, Lindström et Winroth [39] ont mentionné que l'Homme et la machine peuvent être complémentaires. Les avantages de chacun d'eux doivent être bien exploités lors de l'allocation des tâches. Par exemple, les machines sont reconnues pour leur efficacité et leur productivité, tandis que l'Homme a l'avantage d'être flexible. Ainsi, pour profiter pleinement des capacités de l'Homme et de la machine, leur degré d'interaction doit être bien conçu. Cette interaction doit être qualifiée par le LoA, allant d'opérations entièrement manuelles à une automatisation complète [40].

De leur côté, Sheridan et Parasuraman [41] utilisent le terme *Human-centered automation* pour indiquer que l'automatisation doit être conçue pour fonctionner en collaboration avec les humains qui la contrôlent ou qui interagissent avec elle. Pour plus de concrétisation de la collaboration entre l'Homme et les machines dans la définition du LoA, Satchell [42] a défini l'automatisation comme une approche de partage des tâches entre l'Homme et la technologie. De son côté, Sheridan [42] a proposé d'attribuer à l'Homme des tâches adaptées et d'automatiser celles qui conviennent le plus à la machine. Le risque avec cette approche est la dégradation des compétences des opérateurs [43]. En effet, lorsque l'Homme reste impliqué dans le processus d'automatisation (LoA intermédiaire) cela peut donner de meilleurs résultats qu'avec un LoA très élevé.

1.6. LoA défini comme un rapport de coûts

Le niveau d'automatisation T_{auto} peut être calculé en fonction des coûts d'exploitation d'équipements C_{eqh} (€/h) et des coûts de la main d'œuvre C_{moh} (€/h) [44], comme le montre l'équation (1).

$$T_{auto} = \frac{C_{eqh}}{C_{eqh} + C_{moh}} \quad (1)$$

La valeur du ratio T_{auto} (Taux d'automatisation) varie entre 0 et 1. Lorsque ce ratio est nul, on en déduit que la production est entièrement manuelle ; le coût d'exploitation des équipements étant négligeable devant le coût de la main d'œuvre. Lorsque ce ratio est égal à 1, c'est le coût de la main d'œuvre qui est négligeable devant le coût d'exploitation des équipements, la production est donc totalement automatisée.

Cette approche a l'intérêt de décrire le LoA d'une façon quantitative. Cependant, elle ne donne pas une réelle vision du taux d'automatisation d'un atelier. La définition du coût n'est pas assez

représentative. Par exemple, si on considère un atelier de 8 postes, avec 2 postes automatisés à un coût élevé. Le ratio T_{auto} sera proche de 1, sans pour autant que le taux d'automatisation soit élevé. Cette limite est d'autant plus significative dans des pays où les coûts d'investissement et d'exploitation sont nettement plus importants que les coûts de la main d'œuvre. Ainsi, cette approche ne reflète pas le niveau d'automatisation réel d'une ligne de production.

1.7. Synthèse de l'état de l'art

Le Tableau 7 présente l'évaluation des définitions LoA issues de la littérature. Cette évaluation concerne les différentes exigences identifiées dans la section 1.

Tableau 7 : Evaluation des définitions LoA issues de la littérature

Définitions LoA	Exigences						
	Doit analyser les systèmes existants	Doit analyser les systèmes futurs	Doit être quantifié	Doit traiter le mode opératoire	Doit être objectif	Doit permettre une automatisation partielle	Doit inclure la part opérateurs et machines
Degré d'évolution du système expert [29], [30], [31]	X					X	
Degré d'automatisation des opérations physiques et cognitives [33]	X			X	X	X	
Degré d'intelligence et d'autonomie [35]	X			X		X	
Degré d'automatisation [37]	X	X					
Répartition des tâches entre l'Homme et la machine [38], [39]	X			X	X		
Stratégie d'entreprise [26], [28]	X						
Rapport de coût [44]	X	X	X	X		X	

En analysant les différents travaux de la littérature, il ressort que la majorité des approches proposées traitent le processus complet et manquent de précision quant à la description du niveau d'automatisation de chaque poste de travail. Il est à noter également qu'aucune des définitions étudiées n'étudie la part des opérateurs et celle des machines.

Il est donc nécessaire de développer une nouvelle définition du LoA qui est utilisée pour décrire le potentiel d'automatisation de chacun des postes de montage étudiés dans la suite de ce travail. Cette définition permet de proposer et d'évaluer plusieurs scénarios possibles d'automatisation.

2. Avantages et inconvénients de l'automatisation

Les industriels ont choisi la voie de l'automatisation pour augmenter leur productivité, pour réduire les coûts de la main d'œuvre ou pour faire face aux différents problèmes liés à l'ergonomie et à la santé au travail ou encore à la qualité. Néanmoins, une ligne d'assemblage hautement automatisée n'est pas

toujours la meilleure solution. Sur la base d'une étude bibliographique, le Tableau 8 présente les avantages et les inconvénients des processus automatisés et des processus manuels.

Tableau 8 : Avantages et inconvénients des processus automatisés et manuels

	Avantages	Inconvénients
Processus automatisés	Augmenter la productivité et atténuer les effets de pénurie de main d'œuvre [36], [45], [46]	Augmenter les coûts de production : un niveau élevé d'automatisation peut engendrer des coûts supplémentaires, sans négliger les coûts de la maintenance, de réglage, de reconfiguration et de paramétrage qui doivent être pris en considération [33], [37], [38], [44]
	Réduire le coût de production [45], [47]	
	Augmenter le niveau d' ergonomie et de sécurité [36], [45], [46]	
	Augmenter le niveau de qualité des produits [36], [33], [44], [45]	
	Réduire le délai de livraison [45], [47]	Augmenter la complexité des moyens de production [37], [38], [46], [48]
	Améliorer la compétitivité sur le marché [42], [46]	
	Réaliser des opérations complexes [33], [45], [48]	Diminuer la flexibilité des moyens de production [33], [37], [46], [49], [50], [51]
	Augmenter la répétabilité [33], [52]	
Processus manuels	Augmenter la flexibilité des moyens de production : L'Homme peut s'adapter facilement aux différents changements [44], [45], [48], [52], [51], [53]	Réduire la répétabilité des opérations [48], [54]
	Réaliser des tâches complexes que la machine ne peut pas faire [45], [48]	Réduire le niveau de qualité [48]
	Apprendre à travers les différentes expériences et développer de nouvelles solutions [45]	Etre limité sur le plan ergonomique : l'Homme ne doit pas effectuer les tâches pénibles [38], [55]

L'automatisation permet de rester compétitif sur le marché, de réduire le délai de livraison, le temps de production et les coûts de la main d'œuvre et donc augmenter la productivité. Elle permet aussi de renforcer la répétabilité des opérations et donc réduire les défauts de qualité. Sur le plan ergonomique et sécurité, elle facilite les conditions de travail à l'opérateur en se chargeant des opérations pénibles et complexes. Néanmoins, un haut niveau d'automatisation a plusieurs inconvénients notamment sur les moyens de production, puisque ces derniers peuvent devenir complexes et peu flexibles. Leur maintenabilité diminue, ce qui augmente le risque d'avoir des pannes et donc, réduire le rendement de la ligne.

Cependant, un processus de production manuel permet une plus grande flexibilité puisque l'Homme peut s'adapter aux changements et à la fluctuation de la demande. L'Homme peut aussi effectuer les tâches complexes, contrairement aux machines. Néanmoins, cela nécessite un très haut niveau de formation. Sur le plan ergonomique, l'Homme est limité et donc ne peut effectuer les opérations pénibles. Concernant la qualité, l'Homme est peu répétable et cela peut augmenter le taux de défaillances.

Ainsi, si les qualités d'un robot sont combinées à la flexibilité de l'Homme dans des situations inattendues et des tâches de manutention difficiles, un poste de travail collaboratif est obtenu [55]. Cette coopération Homme-machine permet d'avoir un système de production performant.

3. L'Homme et l'automatisation

La réalisation des opérations nécessite des ressources. L'Homme et/ou le robot peuvent accomplir des tâches individuellement ou en collaborant suivant les caractéristiques techniques du poste de travail. Cette partie présente la relation entre l'Homme et la machine, en mettant en avant leur interaction, et en introduisant la notion de cobotique et d'automatisation hybride.

3.1. Processus semi-automatisé

Ces systèmes requièrent la présence d'un Homme et d'une machine pour pouvoir effectuer les différentes opérations d'assemblage. Cette partie définit l'interaction, et introduit le concept de la cobotique.

3.1.1. Définition de l'interaction

En psychologie, Marc et Picard [56] définissent l'interaction comme étant une action mutuelle, en réciprocité, de plusieurs éléments. C'est un échange d'informations, d'émotions, ou d'énergie entre deux agents au sein d'un système. Ainsi, suivant cette définition, l'Homme et la machine peuvent échanger des informations et de l'énergie [57]. Ceci ne peut se faire que si l'Homme peut percevoir, agir sur la machine et inversement.

En 2007, Goodrich et Schultz [58] montrent que la communication entre l'Homme et le robot peut prendre plusieurs formes qui sont largement influencées par le fait qu'ils soient proches l'un de l'autre ou non. Ainsi, la communication et, par conséquent, les interactions peuvent être séparées en deux catégories générales:

- **Interaction à distance** : L'Homme et le robot sont séparés géographiquement ou même temporellement (par exemple, les *Mars Rovers* sont séparés de la Terre à la fois dans l'espace et dans le temps).
- **Interaction à proximité** : l'Homme et le robot sont co-localisés (par exemple, les robots de service peuvent se trouver dans la même pièce que l'Homme).

Bien que différentes classifications des modes suivis par les humains et les robots travaillant ensemble ont été proposées et définies dans la littérature [58], [59], [60]. La classification développée par Matheson est analysée et présentée dans la Figure 9.

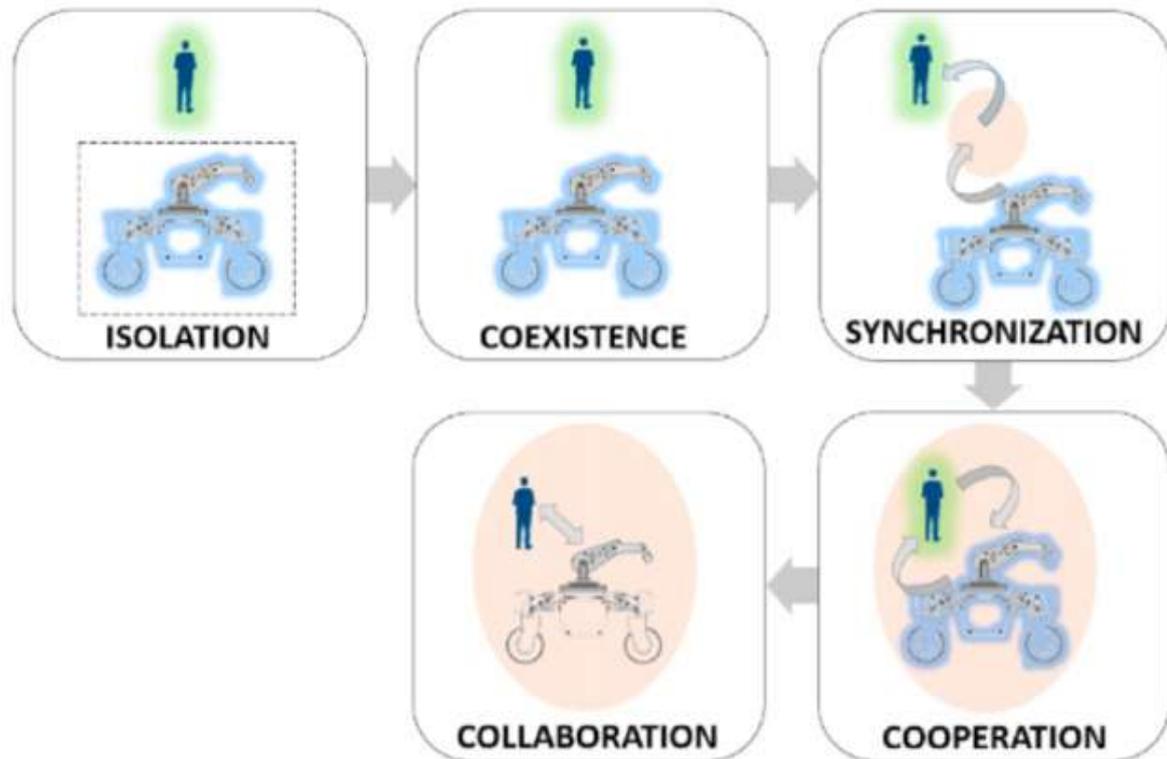


Figure 9 : Modes de collaboration entre l'Homme et le robot. Les ombres vertes symbolisent les tâches exécutées par l'Homme et les bleues celles exécutées par le robot. La zone beige représente l'espace de travail [61]

Les différents modes envisagés de collaboration entre l'Homme et le robot présentés dans la Figure 9 sont décrits ci-dessous :

- **Isolation** : Dans le but de protéger l'opérateur, les robots industriels sont mis dans une cellule isolée. Bien que ce mode de fonctionnement soit sécurisant, il dégrade la reconfigurabilité du système et ralentit ainsi sa capacité à modifier les paramètres du processus.
- **Coexistence** : Les limitations du mode Isolation sont dépassées en supprimant les barrières. Ceci constitue la seule différenciation entre les deux modes. Pour assurer la protection des opérateurs, les capacités du robot à détecter leur présence dans sa zone de travail sont renforcées.
- **Synchronisation** : Pour éviter les inconvénients des deux premiers modes, l'opérateur et le robot fonctionnent de manière synchronisée.
- **Coopération** : Ce mode permet à l'opérateur et au robot de travailler dans la même zone en même temps. Néanmoins, ils se concentrent sur tâches distinctes.
- **Collaboration** : C'est le mode le plus recherché par les industriels [61] puisque les deux composants du système collaborent pour exécuter les mêmes tâches en même temps. Le robot assiste l'opérateur, par exemple, lors de la prise ou l'assemblage des pièces.

L'interaction Homme-robot est un domaine d'étude dédié à la compréhension, à la conception et à l'évaluation de systèmes robotiques destinés à être utilisés par ou avec des humains [58]. Pour les interactions à proximité, les robots ont besoin de systèmes et de capteurs sophistiqués pour traiter l'information et pouvoir interagir avec l'Homme [62], sans négliger sa sécurité, il faut que l'Homme soit apte à échanger avec la machine, tout en garantissant sa propre sécurité. Ce type de robots est appelé *Cobots*.

3.1.2. Définition de la cobotique

Le terme cobotique est apparu en 1998 grâce à Michael Pershkin, et repris avec Edward Colgate en 1999. Ces deux professeurs en mécanique ont combiné deux mots *Robotique* et *Collaboration* [63]. Pour eux, les cobots s'inscrivent dans une interaction Homme-machine tactile, posturale et audiovisuelle pour chaque opération. Grâce à cette interaction, les capacités de l'Homme sont développées et amplifiées. Ce terme a été vulgarisé en 2010, il est aujourd'hui question de la robotique collaborative.

La Figure 10 montre l'évolution de la technologie entre 1960 et aujourd'hui. Ceci a conduit à la robotique collaborative.

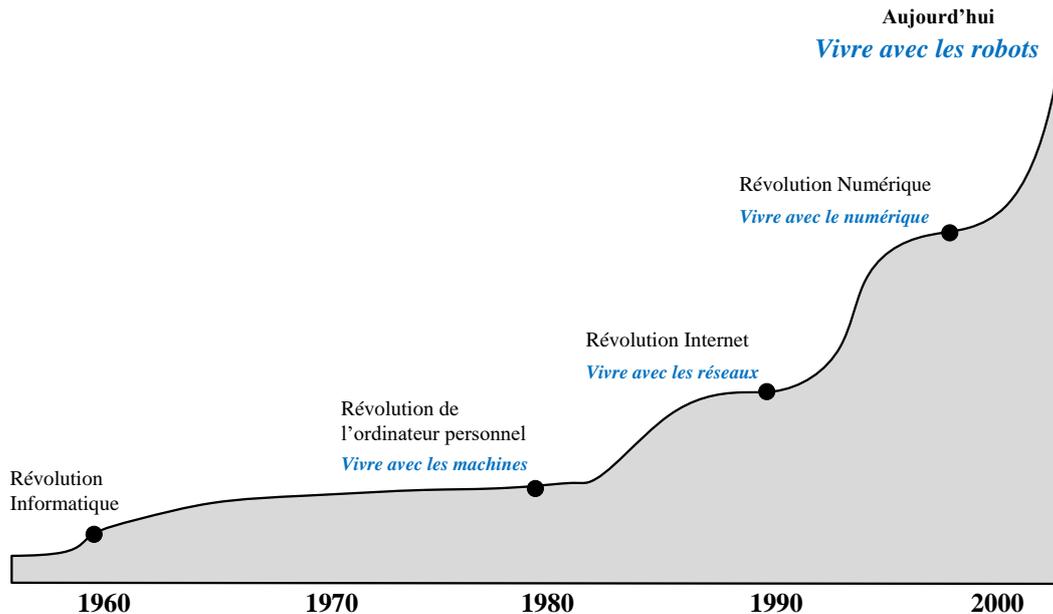


Figure 10 : Evolution de la technologie entre 1960 et aujourd'hui [63]

L'introduction des robots collaboratifs pourrait générer de nombreux avantages pour les industriels (Tableau 8), en particulier dans l'assemblage mécanique et électrique. Au cours de ce type d'opérations, l'Homme a besoin de l'aide de robots pour accélérer le processus ou simplement pour porter de lourdes charges [64]. Ce type de robots peut être utilisé dans des opérations de manutention, de contrôle, ou encore des opérations d'usinage. Pour ce faire, de nouvelles caractéristiques de sécurité doivent être mises en place afin de garantir une collaboration sécurisée et conforme entre l'Homme et le robot.

3.2. Automatisation hybride

Ces systèmes de production hybrides [65] donnent la possibilité d'avoir un processus de production avec des zones ayant un niveau d'automatisation différent. Ces zones peuvent être hautement automatisées, manuelles, et si nécessaire semi-automatisées. Dans le système d'assemblage hybride, les opérations qui nécessitent des modifications significatives sont attribuées à l'Homme, par contre les robots se chargent des opérations qui ne nécessitent pas un investissement supplémentaire important pour s'adapter aux modifications du produit [66].

En analysant les différentes caractéristiques des systèmes présentés ci-dessus, il est évident qu'établir une méthodologie est nécessaire pour pouvoir choisir une solution d'automatisation appropriée qui

répond aux exigences et à la vision de l'entreprise. Différentes méthodes d'aide à la décision concernant le niveau d'automatisation sont présentées dans ce chapitre. Cependant, en analysant les avantages et inconvénients de l'automatisation et du processus manuel, il est évident que plusieurs critères rentrent en jeu avant d'opter pour une quelconque solution.

4. Critères d'automatisation

Cette partie présente les différents critères et données d'entrée à prendre en compte avant d'automatiser une ligne de production. Par la suite, une pondération doit être faite pour chaque critère suivant les besoins et la culture de chaque entreprise. Ainsi, pour une entreprise, c'est le critère coût qui est prépondérant, par contre, pour une autre c'est le critère qualité qui l'est, peu importe le coût d'investissement.

Le Tableau 9 et le

Tableau 10 présentent respectivement les différents critères et données d'entrée identifiés au travers des discussions avec les industriels de Stellantis et d'autres au travers des travaux cités dans la littérature [37], [38], [65], [67].

Tableau 9 : Critères d'automatisation à étudier avant d'automatiser une ligne de production

Catégories	Critères	Description
Coût	Investissement	Coût d'investissement des matériaux et équipements d'exploitation
	Retour sur investissement	Indicateur qui prend en compte les sommes investies et l'argent reçu
	Main d'œuvre	Salaire des opérateurs présents sur la ligne
	Fonctionnement	Coûts dépensés régulièrement qui permettent de faire fonctionner la ligne (énergie, équipements, loyer, impôts ...)
	Mise en route	Coûts dépensés pour l'installation et la mise en service de la ligne (changement de série, maintenance ...)
	Rendement opérationnel	Indicateur de performance qui permet de connaître le rendement de la ligne (capacité à sortir de bons produits)
Qualité	Nombre de défauts	Nombre de produits défectueux
	Taux de qualité	Indicateur de performance qui permet de connaître le nombre des produits non défectueux par rapport à la production totale
	Maturité de l'automatisation	L'état de maturité des technologies
Robustesse des moyens de production	Répétabilité	Aptitude à reproduire une même action
	Maintenabilité	Aptitude à être maintenu ou rétabli
	Fiabilité	Probabilité de bon fonctionnement du système
	Disponibilité	Aptitude du système à accomplir une fonction
Flexibilité	Flexibilité du volume de production	Aptitude à être rentable même si les volumes de production changent
	Flexibilité des moyens de production	Aptitude à réaliser les opérations pour n'importe quel produit de la ligne
Conditions des opérateurs	Sécurité	Absence du danger pour les opérateurs
	Ergonomie	Niveau de pénibilité des opérations

Tableau 10 : Données d'entrée à prendre en compte avant d'automatiser une ligne de production

Catégories	Donnée d'entrée	Description
Productivité	Temps de cycle	Temps qu'il faut pour fabriquer une production
	Cadence	Nombre de produits fabriqués en unité de temps
	Durée de vie	Durée de fabrication d'un produit avant de le remplacer par un nouveau
Environnement - Usine	Architecture de l'usine	Contraintes liées à l'architecture de la ligne (longueur de ligne, surface, méthode d'approvisionnement ...)
	Compétences des opérateurs	Compétences des opérateurs qui sont sur la ligne
	Compétences en maintenance	Compétences des opérateurs de la maintenance
Produit	Taille	Dimensions du produit
	Poids	Poids du produit
	Nombre de composants	Différents composants du produit
	Forme	Forme du produit
	Tolérance	Précision à bien réaliser la tâche
	Matière	Matière qui compose le produit
	Effort	Effort appliqué lors de l'assemblage
	Nature de l'opération	Nature d'opération d'assemblage (vissage, rivetage ...)
Sensibilité	Probabilité d'endommager le produit lors de l'assemblage	

Parmi tous les critères traités au sein du groupe Stellantis, certains sont très importants. Ainsi, pour le sujet de la thèse, les critères retenus sont les suivants : le coût, les conditions de travail des opérateurs, la maturité des technologies ainsi que la flexibilité à la variabilité et au volume.

5. Etat de l'art sur les différentes méthodes d'aide à la décision pour augmenter le niveau d'automatisation

La recherche traitant du niveau d'automatisation est peu abondante. Il n'existe pas une méthode pour aider les industriels sur la prise de décision. En effet, la littérature se concentre sur le choix des technologies et leur développement.

Concernant la méthodologie adéquate pour le traitement du sujet de thèse, plusieurs exigences doivent être respectées. La méthodologie doit être **analytique** ; elle doit permettre d'étudier finement toutes les opérations, ainsi que les ressources qui y sont attachées. L'objectif étant de récolter toutes les informations liées au processus d'assemblage avant de proposer une solution. La méthodologie doit également permettre **d'étudier plusieurs scénarios d'automatisation**, et par le biais de plusieurs critères avec pondérations différentes, elle doit proposer un scénario d'automatisation optimal. La méthode doit **donner des règles de calcul** de chacun des critères contrairement à la majorité des méthodes déjà analysées dans la littérature. Le plus important, la méthode doit **permettre une analyse de regroupements d'opérations et d'équilibrage de la ligne**.

La décision dépend de plusieurs critères évoqués après étude des avantages et inconvénients des automatisations. Ainsi, cette partie présente les différentes méthodes d'aide à la décision trouvées dans la littérature. Il s'agit de neuf méthodes qui ont été analysées, tout en présentant leurs avantages et

inconvenients. Le but étant d'étudier chacune d'elle pour proposer une méthodologie appropriée à l'objectif de cette thèse.

5.1. Méthode développée par Parasuraman, Sheridan et Wickens

Parasuraman, Sheridan et Wickens [30] ont proposé leur méthode sous forme d'organigramme qui contient plusieurs étapes. La première consiste à identifier le type de l'automatisation, ensuite identifier les différents niveaux d'automatisation possibles. Pour chaque niveau d'automatisation possible, il faut examiner ses conséquences sur la performance de l'Homme, ce qui constitue le premier critère d'évaluation. Cependant, la performance humaine n'est pas le seul facteur important. Les critères d'évaluation secondaire incluent la fiabilité de l'automatisation et les coûts des solutions proposées (Annexe 1).

Parasuraman, Sheridan et Wickens soulignent que lors du choix du niveau d'automatisation, il faut évaluer les conséquences sur la performance des opérateurs. En effet, l'automatisation peut avoir des impacts positifs et négatifs sur les opérateurs et leurs performances.

Les auteurs ont défini 4 domaines suivants :

- **Charge de travail mental** (*Mental Workload*) : Une automatisation de l'information peut modifier la charge de travail mental.
- **Conscience de la situation** (*Situation Awareness*) : Si l'automatisation permet d'exécuter de manière répétée les décisions sans impliquer l'Homme. Ce dernier aura tendance à être moins conscient des changements.
- **Suffisance** (*Complacency*) : Dans le cas où l'automatisation est assez fiable, par surconfiance, l'opérateur peut ne plus la surveiller, et donc ne pas faire attention aux erreurs que l'automatisation puisse commettre.
- **Dégradation des compétences** (*Skill Degradation*) : L'automatisation peut causer la dégradation des compétences de l'opérateur.

La méthode proposée ci-dessus prend comme critère prépondérant la performance de l'Homme, et donc ne donne pas une possibilité de choisir d'autres critères prépondérants. D'un autre côté, pour l'ensemble des critères (primaires et secondaires), la méthode ne présente aucune règle de calcul pour pouvoir les qualifier, ni de condition qui permet de déduire le scénario d'automatisation optimal. Et finalement, la liste des critères n'est pas complète ; il faut prendre en compte plusieurs paramètres autre que l'Homme et les coûts.

5.2. Méthode développée par Ross

Ross [36] a développé une méthode d'aide à la décision qui vise à identifier le niveau LoA optimal pour les opérations d'assemblage en se basant sur le critère économique. La méthodologie prend comme données d'entrée la conception du produit, l'architecture de l'usine, le type d'opération d'assemblage et les contraintes de précédence entre les opérations. Avec toutes ces données d'entrée, la méthode évalue les efforts techniques pour avoir une automatisation économiquement rentable.

L'évaluation est basée sur une liste de critères établis par Ross [68]. Le résultat obtenu correspond à une valeur d'effort. Pour évaluer la rentabilité de l'automatisation, il faut comparer la valeur d'effort à

une valeur seuil basée sur un retour d'expériences d'autres automatisations. Si la valeur effort est inférieure à la valeur seuil, une étude d'investissements est lancée pour identifier la rentabilité de l'automatisation. Sinon, l'automatisation n'est pas économiquement rentable (Annexe 2).

Cette méthode prend en compte plusieurs paramètres d'entrée. Elle permet d'analyser la conception du produit et l'architecture de l'usine, d'identifier la nature des opérations d'assemblage ainsi que les contraintes de précédence qui y sont associées, cela permet, bien évidemment, de comprendre le système d'assemblage et toutes ses contraintes. En ce qui concerne l'évaluation de l'automatisation, la méthode s'appuie sur le critère économique en présentant des règles de calcul et des conditions pour décider de la rentabilité de l'automatisation. Néanmoins, les limites de cette méthode résident dans le fait qu'elle ne prend pas en compte d'autres critères d'évaluation comme la qualité, l'ergonomie... Ajoutons à cela qu'en déroulant la méthodologie, les deux solutions possibles sont : le processus doit rester manuel, ou le processus doit être automatisé. Ainsi cette méthode ne prend pas en compte qu'il peut y avoir un niveau intermédiaire.

5.3. Méthode développée par Konold et Reger

Konold et Reger [36] ont développé une méthode qui permet d'identifier le LoA qu'il faut adopter. Il s'agit de 4 niveaux de systèmes d'assemblage : assemblage manuel avec transfert mécanique, assemblage manuel avec transfert automatique, assemblage hybride et assemblage automatisé. La décision se fait en analysant plusieurs paramètres comme le volume de production, le temps de cycle, le cycle de vie du produit, ou encore la durée d'exécution de l'assemblage du produit (Annexe 3).

La méthode proposée ci-dessus, aussi simple soit-elle, présente un seul résultat qui peut être sous forme de plusieurs niveaux d'automatisation. Cependant, elle analyse l'ensemble du processus, et donc n'étudie pas poste par poste (voire opération par opération). En ce qui concerne les paramètres d'entrée, Konold et Reger ne donnent pas de détails sur la façon avec laquelle ils ont établi les conditions d'acceptation ou de refus. Il est également nécessaire de souligner que ces paramètres sont insuffisants, et que la notion du coût est quasi inexistante.

5.4. Méthode développée par Boothroyd

Boothroyd [67] a étudié l'assemblage d'une prise électrique afin d'identifier le processus d'assemblage le plus adapté et le plus rentable. L'auteur a calculé le coût de chaque composant pour six processus d'assemblage différents : complètement manuel, automatisé avec des machines à transfert libre (*free-transfert machines*), automatisé avec des machines d'indexation (*indexing machines*), robotisé avec un robot à un bras (*one-arm robot*), robotisé avec un robot à deux bras (*two-arm robot*), robotisé avec un robot multipostes (*multi-station robot*).

Pour chaque scénario possible d'assemblage, Boothroyd a calculé le coût unitaire du produit. Il a estimé le temps de cycle de chaque poste, le coût de chaque machine/robot, le coût de main d'œuvre, le taux d'efficacité, le coût de contrôle qualité. En combinant l'ensemble de ces données, Boothroyd a réalisé une comparaison du coût global de production pour chacun des six scénarios possibles d'assemblage.

La méthode proposée ci-dessus présente plusieurs avantages, notamment le fait qu'elle permet d'analyser les composants du produit, mais aussi de partir sur plusieurs hypothèses et les évaluer d'une façon quantitative. Néanmoins, Boothroyd a utilisé des coûts standards pour les machines et robots, or ces coûts diffèrent en fonction de leurs caractéristiques techniques (plus de précision, plus de fiabilité...) chose qui pourrait fausser les résultats. Ajoutons à ceci que le seul critère que l'auteur a

utilisé est le critère de coût. Certes ce critère est prépondérant pour la majorité des entreprises, mais il n'est pas le seul, le choix peut être fait sur la base d'autres critères (qualité, ergonomie ...). Un autre aspect est à noter concernant le temps nécessaire pour réaliser l'étude. Cette méthode requiert de faire plusieurs calculs, donc un temps plus long et ne donne pas la possibilité de prendre une décision plus tôt.

5.5. Méthode développée par Almannai, Greenough et Kay

Almannai, Greenough et Kay [69] ont développé un outil d'aide à la décision en combinant la méthode « *Quality Function Deployment (QFD)* » et la méthode « *Failure Mode and Effects Analysis (FMEA)* » (Analyse des modes de défaillances et de leur effets). Les auteurs ont utilisé QFD pour pouvoir identifier les objectifs et le meilleur choix en terme d'automatisation. La solution qui en résulte est ensuite traitée par AMDEC qui prend en compte les risques qui y sont associées

La méthodologie comprend 3 étapes : la première consiste à identifier les critères relatifs aux objectifs de l'entreprise en utilisant la méthode QFD. Ensuite, en utilisant toujours la matrice QFD, identifier les alternatives d'automatisation grâce à une deuxième analyse multicritères. Finalement, la solution qui en résulte est soumise à l'AMDEC qui permet d'identifier les risques et les défaillances potentiels qui y sont associés (Annexe 4).

Cette méthode présente plusieurs avantages comme le fait de s'appuyer sur les objectifs et décisions de l'entreprise, ainsi que d'utiliser des critères d'évaluation pour confirmer le meilleur choix d'automatisation. Néanmoins, les auteurs n'ont donné ni une liste de critères, ni une méthode pour effectuer l'analyse multicritère. Ils n'ont pas non plus précisé la définition des alternatives d'automatisation.

5.6. Méthode développée par Kapp

Kapp [68] a développé une méthode pour faire évoluer les systèmes de fabrication afin qu'ils produisent de nouveaux produits. Cette méthode est appelée USA (*Understand, Simplify, Automate*) [70] et comporte les étapes suivantes :

- **Comprendre le processus existant** (*Understand*) : Cette étape a pour objectif de comprendre le processus actuel ; de lister les données d'entrée et sortie, de caractériser la fonction qui régit le système et d'identifier les opérations qui peuvent être regroupées.
- **Améliorer le processus** (*Simplify*) : Après la compréhension du processus, vient l'étape d'amélioration. Cela permet de poser plusieurs questions : est-ce que cette opération est nécessaire? Cette opération peut-elle être éliminée? Est-ce que la technologie utilisée pour cette opération est la plus appropriée? Comment peut-on améliorer cette opération ?
- **Automatiser le processus** (*Automate*) : Après l'amélioration du processus, vient la dernière étape : celle de l'automatisation.

Cette méthode présente plusieurs avantages, notamment sur la compréhension et l'optimisation du processus. Néanmoins, sur la partie automatisation, elle ne donne pas une vision claire sur la démarche à suivre pour choisir une automatisation rentable.

5.7. Méthodes développées par Lindstrom et Winroth, et par Fasth et Stahre

Lindström et Winroth [39] ont proposé une méthode appelée Dynamo, qui a été reprise et développée par Fasth et Stahre [71] pour donner lieu à une autre méthode appelée Dynamo ++. Ces méthodes se basent sur la définition du LoA présentée dans le Tableau 4 et consistent à comprendre le processus de fabrication en étudiant le flux de production, le fonctionnement et les contraintes de chaque poste et en identifiant les opérations et les sous opérations réalisées sur la ligne. L'analyse de l'ensemble de ces données permet d'affecter le LoA minimal et maximal possible à chaque opération. Une fois ces degrés LoA identifiés, les auteurs proposent de lister des critères pour évaluer chaque possibilité ; ces critères sont choisis en se basant sur la stratégie de l'entreprise.

Les méthodes présentées ci-dessus ont plusieurs avantages, notamment l'utilisation de la définition LoA qui différencie les opérations physiques des opérations cognitives. Les auteurs suggèrent de bien comprendre le fonctionnement et les contraintes d'un processus de production, chose qui est bénéfique avant de se lancer dans une démarche d'automatisation. Néanmoins, ces approches ne donnent pas une aide à la décision quant à l'attribution des niveaux LoA possible et le choix du LoA optimal. Ajoutons à ceci que les critères d'évaluation ne sont pas abordés.

5.8. Méthode développée par Gorlach et Wessel

En 2008, Gorlach et Wessel [37] ont effectué une étude sur les lignes d'assemblage de Volkswagen. En combinant plusieurs critères comme le coût, la productivité, la qualité et la flexibilité, les auteurs ont pu déterminer si l'automatisation de ces lignes est rentable ou non.

- **Critère Coût** : les auteurs ont identifié les différents coûts nécessaires pour réaliser l'étude. Il s'agit du coût de la main d'œuvre, du coût des équipements, du coût des consommables, et du coût des systèmes d'information.
- **Critère Qualité** : pour quantifier le niveau de qualité, les auteurs ont proposé de calculer différents indicateurs : taux de produits défectueux, nombre de retouches, taux de réclamation client (taux de produits défectueux livrés aux clients), note de l'audit (cet indicateur est calculé directement par l'entreprise).
- **Critère Productivité** : ce critère est évalué par le nombre de produits à fabriquer, le nombre de produits déjà fabriqués, le temps de cycle et le nombre d'opérateurs.
- **Critère Flexibilité** : ce critère concerne les moyens de production (flexibilité de la fabrication de différents modèles de produits), degré de complexité des opérations et les modèles de véhicules différents par rapport au modèle de base.

Sur chaque critère, les auteurs ont proposé une série de paramètres à évaluer. Ces critères sont quantitatifs sauf le dernier (flexibilité) ; les auteurs n'ont pas expliqué comment le quantifier.

Pour ce qui est du niveau d'automatisation, les auteurs n'ont pas proposé une méthode d'aide à la décision ni sur le choix des différents LoA, ni sur l'analyse multicritère à effectuer pour choisir le LoA qui répond aux critères choisis au préalable.

5.9. Méthode développée par Boothroyd et Dewhurst

En 1983, Boothroyd et Dewhurst [72] ont proposé une méthode qui consiste à étudier plusieurs paramètres pour pouvoir déduire la technique d'assemblage appropriée pour chaque poste.

- **Critères liés au produit** : il s'agit du nombre de pièces dont la conception a été changée durant les trois premières années, du nombre de modèles de produits différents à assembler sur la ligne, du nombre total de pièces à assembler et du nombre total de pièces qui concernent les différents modèles de la ligne.
- **Critères liés au système de production** : les auteurs ont identifié les critères suivants : le volume de production annuel par équipe, le potentiel d'investissement dans l'automatisation, le nombre d'équipe et le salaire annuel d'un opérateur.

En parallèle à ces paramètres, les auteurs ont proposé une série de techniques d'assemblage : assemblage automatisé qui utilise des machines à indexation, assemblage automatisé qui utilise des machines de transfert libre (*free-transfert machines*), assemblage automatisé avec chargement des pièces en manuel, assemblage automatisé avec deux bras, assemblage manuel et Assemblage manuel avec assistance mécanique. Sur la base de ces paramètres et différentes conditions proposées par les auteurs, la technique d'assemblage appropriée peut être déterminée (Annexe 5).

Cette méthode, contrairement aux autres présentées auparavant, prend comme paramètre d'entrée le potentiel d'investissements, chose qui est intéressante pour connaître la limite à ne pas dépasser. Elle prend en compte aussi le volume de production, en effet, s'il est faible l'automatisation ne sera pas rentable. Néanmoins, les auteurs n'ont pas expliqué comment ils ont pu établir les différentes conditions proposées. La liste des critères abordés n'est pas suffisante, et les contraintes de précedence entre les opérations ne sont pas évoquées.

5.10. Synthèse de l'état de l'art

Les différentes méthodes étudiées dans la littérature ont été évaluées moyennant les exigences présentées dans la section 5 Le Tableau 11 présente cette évaluation :

Tableau 11 : Evaluation des méthodologies issues de la littérature

Méthodes	Exigences				
	Doit être analytique	Doit étudier plusieurs scénarios	Doit fournir des règles de calcul	Doit permettre de regrouper des opérations	Doit analyser l'équilibrage de la ligne
Parasuraman, Sheridan et Wickens [30]		X			
Ross [36]	X	X	X		
Konold et Reger [36]	X	X			
Boothroyd [67]	X	X	X		
Almanai, Greenough et Kay [69]		X			
Kapp [68]	X				
DYNAMO [39], DYNAMO ++ [71]	X	X			
Gorlach et Wessel [37]	X	X			
Boothroyd et Dewhurst [72]	X	X	X		

Concernant les méthodologies, il est à noter qu'aucune des méthodes analysées dans la littérature ne satisfait complètement les exigences exprimées précédemment. D'autant plus qu'aucune méthode ne traite la problématique de regroupements d'opérations ni l'équilibrage de la ligne. Il est donc essentiel de présenter une méthodologie répondant aux exigences industrielles citées auparavant.

6. Conclusion

L'un des objectifs de la thèse est de proposer une méthode d'aide à la décision pour augmenter le niveau d'automatisation d'un système d'assemblage automobile.

Ce chapitre aborde et analyse les différents travaux de recherche qui traitent la problématique de la thèse. Il commence par présenter les diverses définitions du niveau d'automatisation proposées dans la littérature. Ces approches sont analysées tout en soulignant leurs avantages et limites. Cette première partie du chapitre évalue ces définitions moyennant plusieurs exigences qu'une échelle LoA doit respecter pour être en adéquation avec le traitement du sujet de thèse.

Dans la deuxième partie, une analyse est effectuée pour identifier les avantages et inconvénients de l'automatisation et l'humain. Les résultats sont organisés sous forme d'un tableau établi à partir de travaux issus de la littérature. La combinaison de l'automatisation et de l'humain dans un même processus est étudiée et montre de multiples avantages pratiques. Cependant, il est toujours nécessaire de guider, quand et où utiliser des systèmes complètement automatisés, entièrement manuels ou hybrides.

Adopter un certain niveau d'automatisation dépend du contexte et du cas étudié. Un exemple qui illustre cet effet est celui des systèmes hybrides. Bien qu'ils présentent plusieurs avantages, ils ne peuvent pas être aussi productifs qu'un système complètement automatisé. Ceci est dû à la vitesse peu élevée pour garantir la sécurité des opérateurs. Ainsi, l'automatisation hybride peut alors être inadaptée notamment en cas de très fortes cadences.

La décision sur le niveau d'automatisation est liée aux spécificités du cas étudié. Cela introduit la nécessité d'identifier les critères et données d'entrées qui peuvent orienter cette décision. Une liste exhaustive de tous les critères et données d'entrée à prendre en compte est alors présenté. Concernant le sujet de thèse, à partir de cette liste, les critères les plus importants pour l'industriel sont listés. Par la suite, ces critères peuvent aider à choisir le scénario d'automatisation qui répond le plus à la vision de l'industriel.

Ces premières idées autour de l'augmentation du niveau d'automatisation doivent être intégrés dans une approche objective. Avant de proposer une qui soit adéquate aux travaux de recherche, plusieurs exigences sont exprimées. Différentes méthodologies issues de la littérature sont présentées et analysées dans ce chapitre. Elles sont évaluées moyennant les exigences exprimées précédemment. Ce chapitre conclut qu'aucune des approches issues de la littérature ne répond parfaitement à la problématique de recherche et souligne ainsi la nécessité de développer une nouvelle méthodologie.

Ainsi, cette thèse permet d'apporter plusieurs contributions qui répondent aux questions de recherche présentées dans le chapitre 1 :

- **Contribution 1** : proposition d'une définition du niveau d'automatisation du poste de travail et de l'atelier montage qui répond aux exigences précédemment citées [73] (*Question 1*).
- **Contribution 2** : proposition, analyse et modélisation des contraintes et critères permettant le regroupement d'opérations et sa validation (*Question 2*).

- **Contribution 3** : proposition d'une méthodologie qui décrit les données d'entrée à prendre en compte et qui traite l'ensemble des critères identifiés. Le but étant de faire un choix d'un scénario d'automatisation optimal afin d'augmenter l'efficacité globale de l'atelier montage [74] (*Question 3 et 4*).
- **Contribution 4** : confirmation de la validité de la méthodologie à travers des applications industrielles.

Chapitre 3: Proposition d'une nouvelle méthodologie afin d'améliorer le niveau d'automatisation des lignes de montage automobile

Résumé

L'étude bibliographique effectuée souligne le besoin de définir une nouvelle approche pour combler les lacunes identifiées. Ainsi, ce chapitre propose une définition du LoA adéquate au sujet de la thèse et présente la méthodologie d'aide à la décision développée pour améliorer le niveau d'automatisation des lignes de montage automobile. Pour mettre ces approches en pratique, ce chapitre montre la nécessité de développer certains outils et modèles. Par la suite, il définit les règles de calcul des critères ainsi qu'une méthode d'analyse multicritère.

L'évaluation des approches existantes, comme discuté dans le chapitre précédent, révèle qu'aucune méthode n'est pleinement satisfaisante concernant l'aide à la décision autour du niveau d'automatisation. Il est donc nécessaire de développer une nouvelle méthodologie répondant aux exigences définies.

Dans un premier temps, ce chapitre présente une nouvelle définition du niveau d'automatisation. Cette définition répond aux exigences prédéfinies dans le chapitre 2. Les choix des critères utilisés sont expliqués et argumentés.

Ce chapitre propose également une nouvelle méthodologie basée sur l'étude bibliographique précédemment effectuée. Cette méthode vise à répondre aux exigences précédemment définies. Premièrement, les six grandes activités de la méthodologie sont présentées sous forme d'un schéma IDEF0. Ces activités sont alors détaillées et expliquées.

L'application de cette méthodologie nécessite le développement d'outils et modèles de calcul de plusieurs critères. Dans un premier temps, l'analyse des gammes de montage de Stellantis est présentée sous forme d'un diagramme de classes qui souligne les informations nécessaires avant de déployer la méthodologie. Cette analyse montre la nécessité de définir des critères de regroupements et de modéliser les contraintes d'assemblage.

La définition des règles de calcul de critères de choix ainsi que d'une méthode d'analyse multicritère sont nécessaires pour la mise en œuvre de la méthodologie. Ainsi, ce chapitre présente et adapte les différents travaux de recherche pour répondre à ces deux besoins.

1. Définition du LoA proposée pour le sujet de thèse

Afin d'améliorer les méthodes d'aide à la décision concernant l'automatisation de la ligne de montage, il est nécessaire de développer une nouvelle définition du LoA. Ainsi, la définition proposée dans cette thèse se fait au niveau du poste et non pas au niveau du processus entier. Ceci permet d'analyser toutes les opérations, de proposer plusieurs scénarios d'automatisation pour choisir le plus intéressant.

Le niveau d'automatisation doit être quantitatif et doit varier du complètement manuel au complètement automatisé avec des niveaux intermédiaires afin de représenter la répartition des opérations entre l'Homme et la machine. L'indicateur choisi pour quantifier le LoA est le temps, ce qui permet d'étudier la charge Homme et la charge moyens automatisés. Ainsi, le LoA proposé est défini comme étant un rapport de temps entre le temps des opérations automatisées T_{auto} (min) et le temps de cycle T_c (min) comme le montre l'équation (2).

$$LoA = \frac{T_{auto}}{T_c} \quad (2)$$

Si le LoA $\approx 0\%$, le poste est complètement manuel ; la seule ressource est l'Homme. Si le LoA $\approx 100\%$, le poste est complètement automatisé ; la seule ressource est la machine. Entre les deux niveaux, le poste est semi automatisé ; les deux ressources présentes sont l'Homme et la machine. Le Tableau 12 présente les 3 niveaux de LoA proposés.

Tableau 12 : Niveaux de LoA proposés pour la démarche de la thèse (Images de [75])

LoA	Description	Illustration
LoA $\approx 0\%$ <i>Complètement manuel</i>	Le poste est complètement manuel. La seule ressource est l'Homme. Ce dernier peut utiliser des outils pour réaliser les opérations (une visseuse par exemple).	
$0\% < LoA < 100\%$ <i>Semi-automatisé</i>	Le poste est semi-automatisé. La réalisation des opérations nécessite la collaboration entre deux ressources : l'Homme et la machine (manipulateur, cobot...)	
LoA $\approx 100\%$ <i>Complètement automatisable</i>	Le poste est complètement automatisé. La seule ressource est la machine.	

Ces niveaux LoA sont utilisés pour décrire le potentiel d'automatisation de chacun des postes de montage étudiés dans la suite de ce travail. Cette définition permet de proposer et d'évaluer plusieurs scénarios possibles d'automatisation. Le choix d'un scénario intéressant se fera sur la base d'une analyse qui prend en compte plusieurs critères synthétisés dans le chapitre 2.

2. Proposition d'une méthodologie pour améliorer le niveau d'automatisation d'une ligne d'assemblage

2.1. Présentation de la méthodologie

L'un des objectifs de la thèse est de développer une méthode d'aide à la décision pour améliorer le niveau d'automatisation pour un système d'assemblage automobile.

La méthode d'aide à la décision proposée est illustrée par une représentation IDEF0 reportée sur la Figure 11. Cette méthode consiste à appliquer six grandes étapes en s'appuyant sur plusieurs systèmes d'information propres à Stellantis, ainsi que les expériences du métier que le travail de thèse essaie de traduire en plusieurs contraintes et règles pour apporter de l'aide aux utilisateurs.

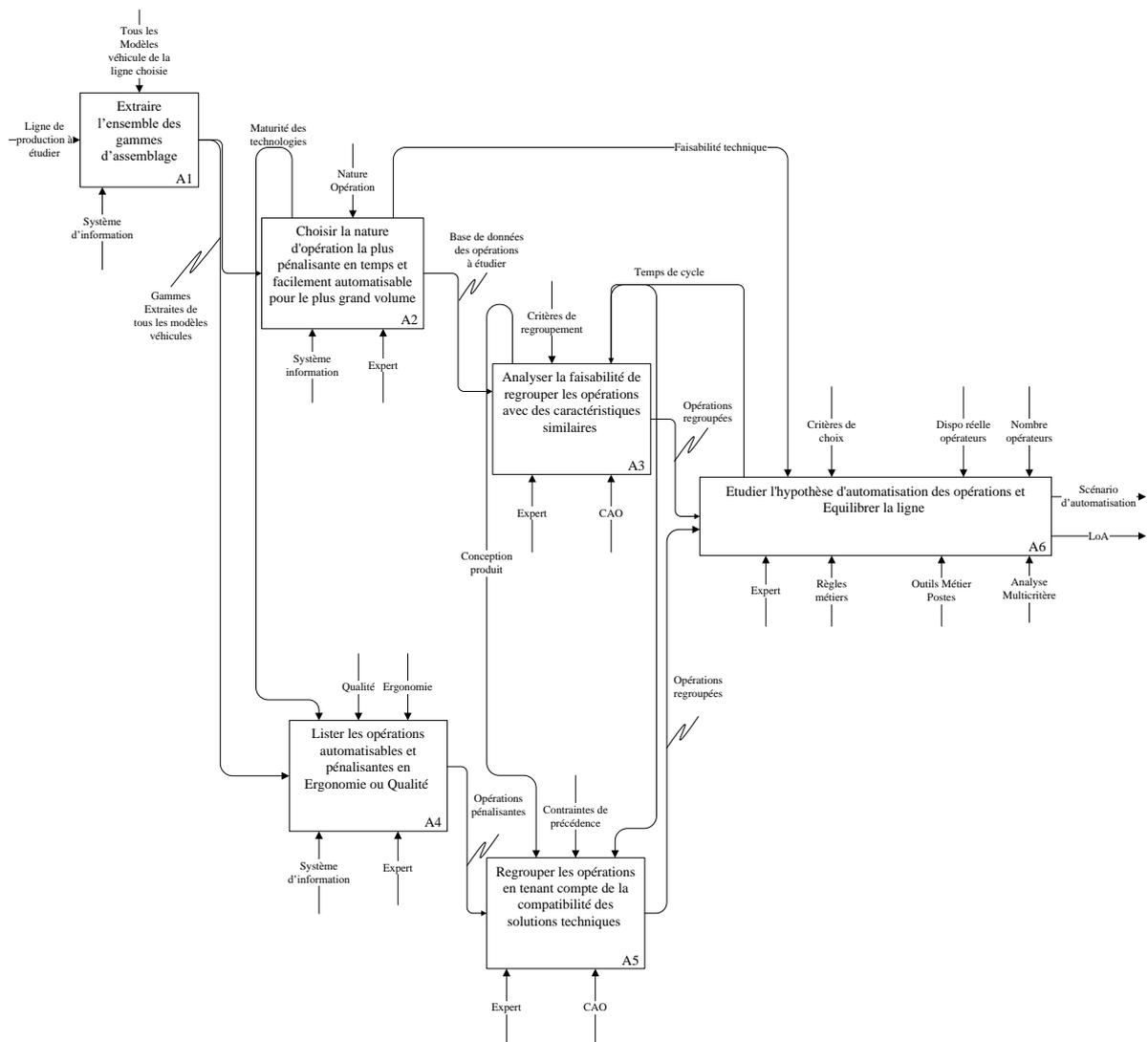


Figure 11 : Présentation de la méthodologie proposée d'aide à la décision pour améliorer le niveau d'automatisation

A1 : Cette étape consiste à extraire toutes les gammes de montage de tous les modèles véhicules d'une ligne de production. Ces gammes sont extraites depuis le système d'information de Stellantis appelé *Equinox*. Une fois les gammes extraites, il faut appliquer l'activité A2 si les opérations à analyser sont celles qui sont les plus pénalisantes en temps, ou l'activité A4 si le critère d'analyse est l'ergonomie ou la qualité.

A2 : Cette étape consiste à identifier la nature d'opération la plus pénalisante en temps. La nature d'opération est décrite par un code appelé code de regroupement (ou code RGPT). Pour ce faire, il faut appliquer les sous étapes illustrées dans la Figure 12.

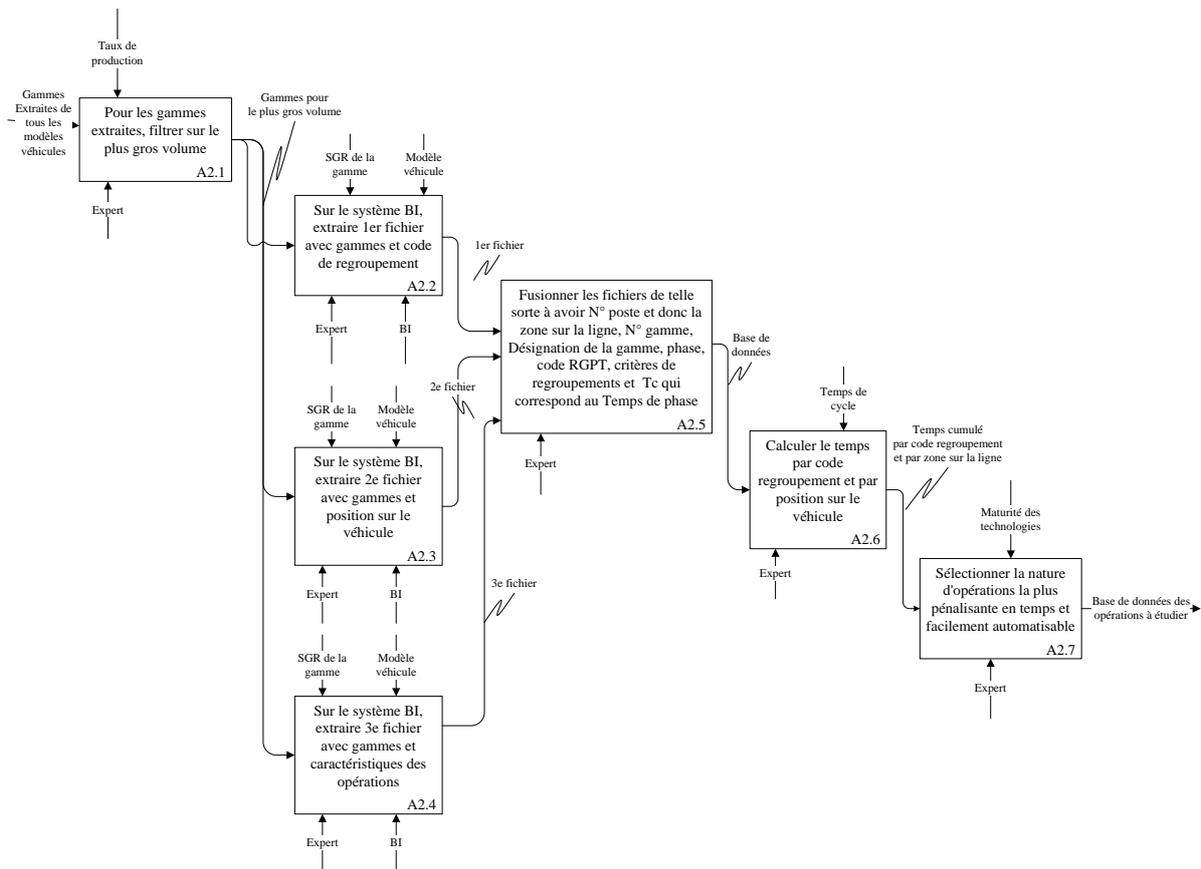


Figure 12 : Détails de A2 – Identification de la nature d'opération la plus pénalisante en temps

A2.1-A2.5 : Ces étapes formalisent la démarche à suivre pour synthétiser les données qui contiennent tous les éléments d'entrée. Elle consiste à faire toutes les extractions nécessaires des différents systèmes d'informations de Stellantis. Par la suite, il faut fusionner tous les fichiers de telle sorte à avoir une base de données des différentes opérations avec les numéros de poste associés, le temps, et les différents critères de regroupement.

A2.6 -A2.7 : Ces étapes permettent d'identifier la nature des opérations à étudier. Cela passe par le calcul du temps et l'analyse de la maturité d'automatisation de chaque type d'opérations.

A3 : Cette étape consiste à analyser le regroupement d'opérations avec des caractéristiques similaires. Pour ce faire, il faut appliquer quatre sous-étapes illustrées dans la Figure 13.

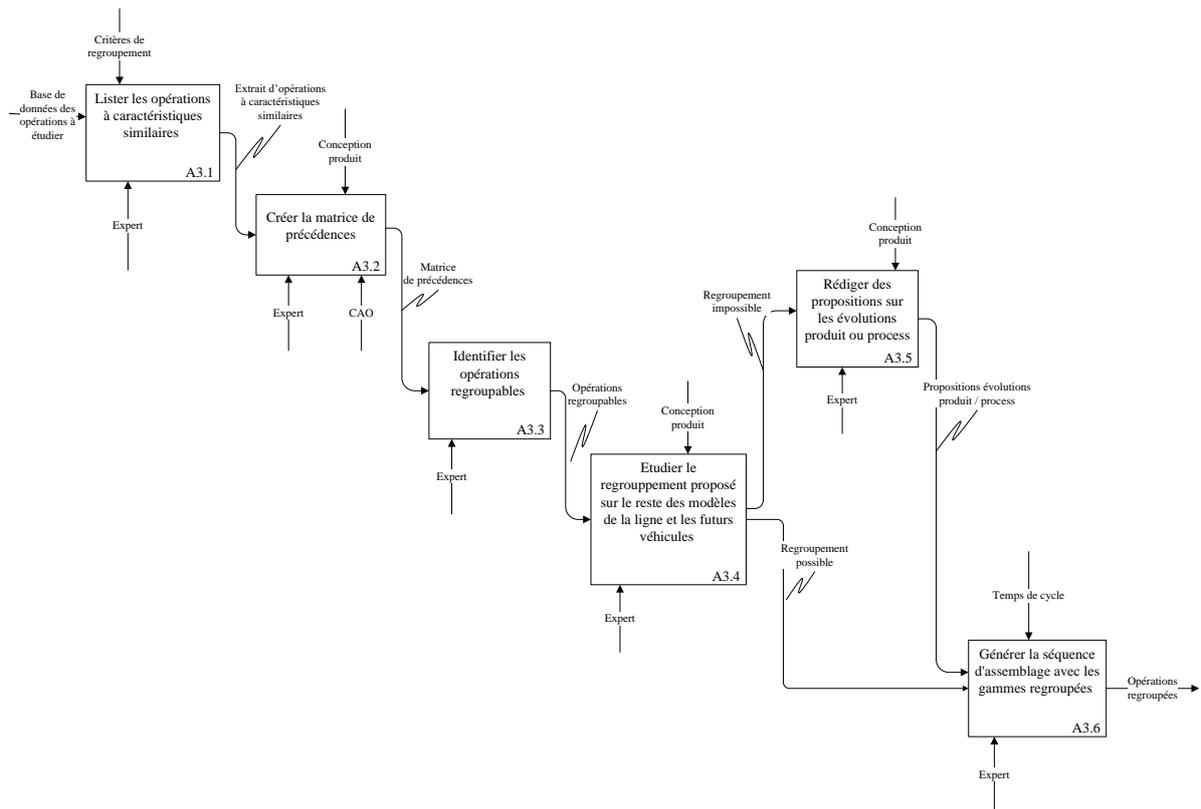


Figure 13 : Détails de A3 – Analyse de regroupements d’opérations

A3.1 : Le but est de répertorier toutes les opérations qui ont des caractéristiques similaires. Cette étape nécessite d’analyser le produit et d’indiquer, pour chaque opération, les critères de regroupement (qualitatifs et quantitatifs) établis à travers des discussions avec les industriels de Stellantis. Un exemple de ces critères et codes de regroupement est présenté dans le Tableau 13. Les ressources disponibles sont les modèles 3D des pièces, l’expérience et règles métiers.

Tableau 13 : Exemple de codes et critères de regroupement

Code RGPT	Intitulé du code	Critères de regroupement
CPI	Prendre Pièce	Poids, Surface, Position Localisation, Unicité ou Lot de pièces en vrac, Distance, Matière (malléable ...), une pièce d'aspect, conditions de préhension associée à la diversité, Accessibilité
PGL	Graisser / Lubrifier	Nature, Quantité et caractéristiques du lubrifiant, Surface: Taille et Forme, Accessibilité
QCC	Contrôler la conformité	Nature du contrôle : Humain (Visuel, Tactile), Instrumenté, Accessibilité
TVS	Visser, Serrer	Tête de la vis, Couple, Accessibilité

A3.2 : Le but de cette étape est d’étudier les contraintes de précedence des opérations en complétant une matrice de précedence.

A3.3 : Le but de cette étape est d’identifier les opérations qui peuvent être effectuées dans le même poste de travail et avec des caractéristiques similaires.

A3.4 : Cette étape consiste à analyser, non seulement les différents produits assemblés dans la ligne mais aussi les futurs et d'identifier si le regroupement d'opérations est techniquement réalisable pour chacun de ces produits.

A3.5 : Si le regroupement d'opérations s'avère impossible, des évolutions du produit et/ou process de fabrication peuvent être proposées.

A3.6 : La dernière sous-étape consiste à générer la séquence d'assemblage avec les opérations regroupées. Le critère ici est le temps de cycle.

A4 – A5 : Ces étapes ont pour objectif d'étudier les opérations critiques en ergonomie et/ou qualité.

A6 : La sixième et dernière étape de la méthodologie est l'étude de l'automatisation et de l'équilibrage de la ligne. Cette étape consiste à appliquer six sous-étapes illustrées dans la Figure 14.

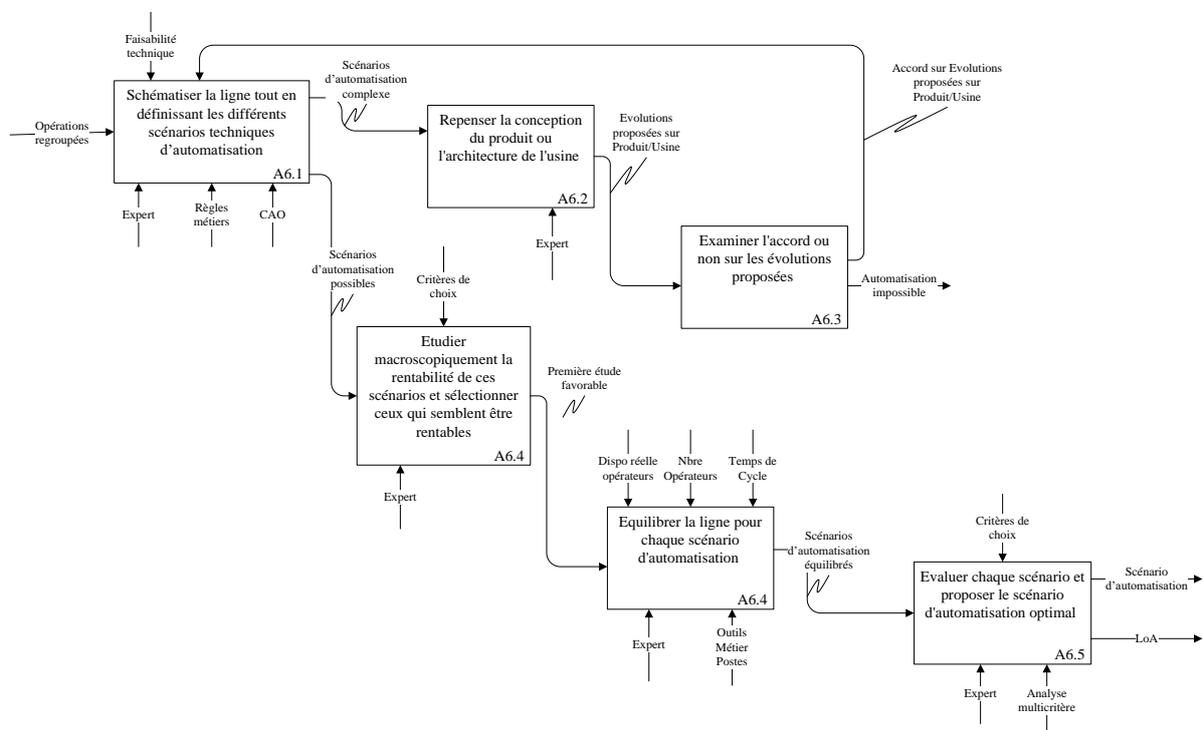


Figure 14 : Détails de A6 – Etude de l'automatisation et de l'équilibrage de la ligne

A6.1 : Cette étape consiste à déterminer plusieurs scénarios possibles d'automatisation en analysant la faisabilité technique de cette dernière. Et ce, en se basant sur la définition des pièces et sur l'expérience du métier montage.

A6.2 : Dans le cas d'une automatisation complexe, il est possible de repenser le design du produit et/ou l'architecture de l'usine.

A6.3 : Si la direction donne un avis favorable sur les évolutions proposées, il faut redéfinir les scénarios possibles d'automatisation. Dans le cas contraire, l'automatisation des opérations est impossible.

A6.4 : Cette étape consiste à équilibrer la ligne pour chaque scénario d'automatisation en se basant sur le nombre d'opérateurs, leur disponibilité réelle ou encore le temps de cycle. Et ce, par le biais de l'expérience, des règles métiers, et des outils dédiés au métier postes.

A6.5 : La dernière étape consiste à évaluer les scénarios d'automatisation et de proposer celui qui satisfait le plus la vision du métier montage. L'analyse est faite en se basant sur les critères retenus et cités dans le chapitre 2.

L'amélioration des postes de travail est l'un des objectifs primordiaux pour l'industrie. Cet enjeu peut être motivé par des problèmes de santé, d'ergonomie et de sécurité pour les opérateurs, ou par la volonté d'améliorer les performances du poste (vitesse, cadence, précision, répétabilité, qualité, fiabilité ...) [24]. Dans ce contexte de production, l'équilibrage (pas de sous charge, même temps de cycle) des charges entre les différents postes de travail représente une contrainte qu'il faut prendre en compte. En effet, un mauvais équilibrage conduit à une mauvaise utilisation des ressources et compromet la rentabilité de la chaîne [22]. Il est donc important de bien élaborer sa gamme de montage.

2.2. Elaboration des gammes de montage

D'après le dictionnaire des techniques de production mécanique, le montage (assemblage) est : « ... *L'action de réunir des pièces détachées pour constituer un sous ensemble, une structure, une machine, un équipement, un produit. Ce terme englobe aussi la manipulation, l'ajustage et l'inspection des pièces, des sous-assemblages ou du produit* » [76].

D'après le même dictionnaire, une gamme d'assemblage est définie comme étant : « *Un document décrivant la séquence chronologique des opérations nécessaires à l'assemblage d'un produit ou d'un sous-ensemble, c'est-à-dire le cheminement emprunté par le produit durant son assemblage* » [76].

Chez Stellantis, une gamme se caractérise par un domaine d'application (ECDV) qui caractérise le modèle du véhicule auquel est attachée cette gamme [77]. L'analyse de gammes de Stellantis a permis l'identification de 6 types de gammes décrites dans le Tableau 14.

Tableau 14 : Description des différents types de gammes chez Stellantis [77]

Types de Gamme	Description
Automatique	Gamme de montage décrivant tout ou une partie du cycle d'une installation automatique (sans intervention manuelle).
Dégradée	Gamme se substituant à une gamme Manuelle ou Automatique, utilisant un moyen asservi, une installation ou un manipulateur en cas de défaillance de cette dernière, afin d'obtenir un niveau de qualité identique.
Ephémère	Gamme réalisée provisoirement pour répondre à un besoin ponctuel (dérive temporaire d'un fournisseur, dérive temporaire de la fabrication, feuille d'essais ...)
Manuelle	Gamme de montage décrivant une action manuelle ou réalisée manuellement avec l'aide d'une installation ou d'un outillage.
Qualité	Gamme de contrôle unitaire, réalisée en ligne de montage ou en bout d'usine.
Retouche	Gamme réalisée pour pallier à une mauvaise exécution d'un process ou suite à la détection d'un produit non-conforme.

La bonne élaboration d'une gamme d'assemblage permet d'avoir une ligne de production performante. Cette performance est mesurée avec divers indicateurs tels que le temps de cycle ou le niveau

d'ergonomie, comme le montre la Figure 15. Elle est impactée par les contraintes liées au choix des techniques d'assemblage et aux ressources.



Figure 15 : Elaboration d'une gamme d'assemblage : Contraintes et Indicateurs de performance (Adaptée des travaux d'Andolfatto [78])

Pour pouvoir appliquer la méthodologie, l'élément d'entrée est la gamme d'assemblage. La Figure 16 est un diagramme de classes qui illustre la gamme d'assemblage actuelle chez Stellantis (rectangle en trait continu), et les informations manquantes et nécessaires à l'application de la méthodologie (rectangle en trait discontinu).

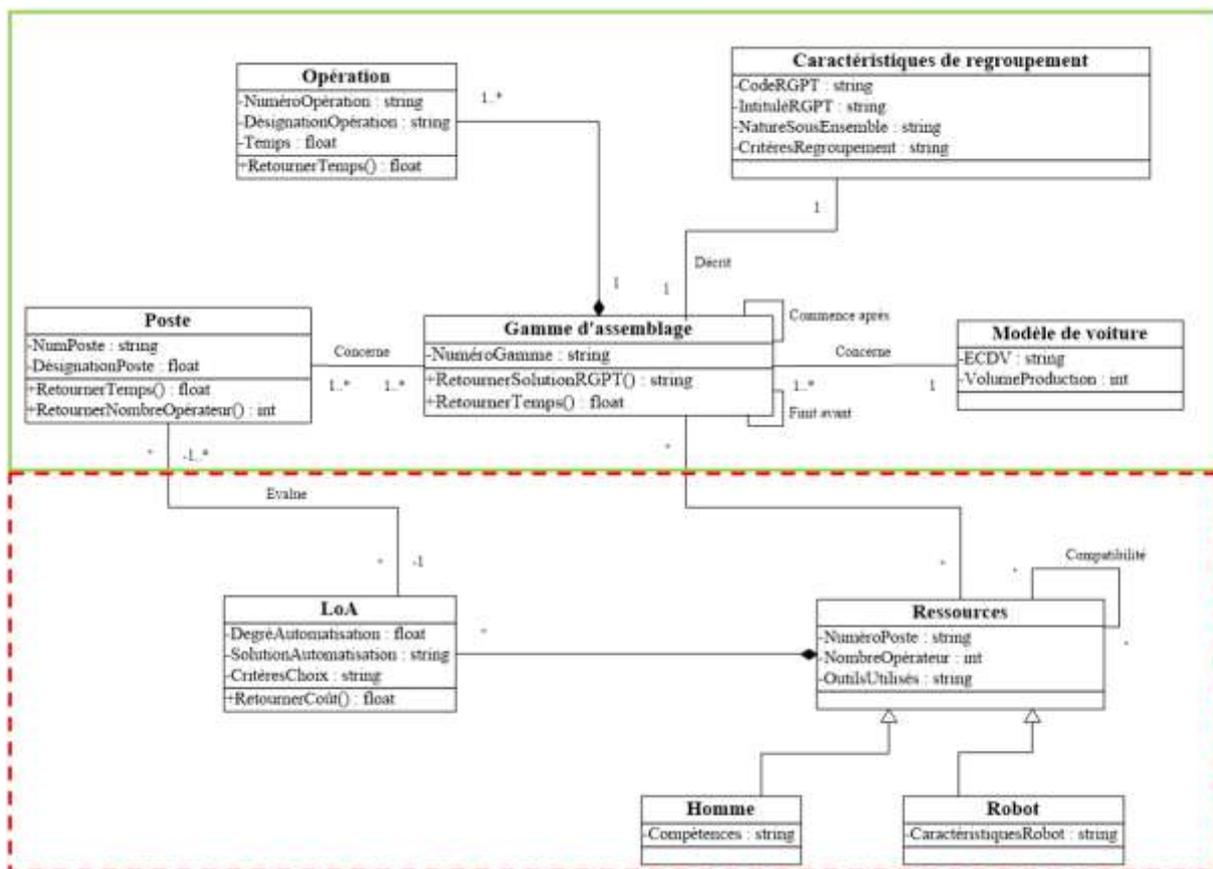


Figure 16 : Diagramme de classes présentant la gamme d'assemblage de Stellantis

La gamme d'assemblage chez Stellantis est constituée d'une ou plusieurs opérations. Cette gamme est décrite par un ensemble de caractéristiques dont le code et les critères de regroupement ou encore la nature du sous ensemble concerné par l'opération. Elle décrit un poste caractérisé par un numéro de poste, et elle concerne un modèle de voitures identifié par un numéro ECDV. Néanmoins, pour

pouvoir dérouler la méthodologie, plusieurs informations doivent être enrichies en parallèle de la gamme d'assemblage. Ces informations sont :

- Les degrés possibles LoA pour évaluer le potentiel d'automatisation des postes de travail
- Les ressources possibles pour effectuer les opérations
- La plage de positionnement pour connaître les contraintes de précédence des différentes opérations

2.3. Modélisation des contraintes de précédence

Pour les applications industrielles, un programme sous VBA est développé pour la gestion des contraintes de précédence et la recherche des regroupements d'opérations. Les différentes étapes du programme sont présentées dans cette section.

Le programme prend comme élément d'entrée la base de données ; résultat de l'application de l'activité A3.1 de la méthodologie. La Figure 17 montre macroscopiquement ses différentes étapes.

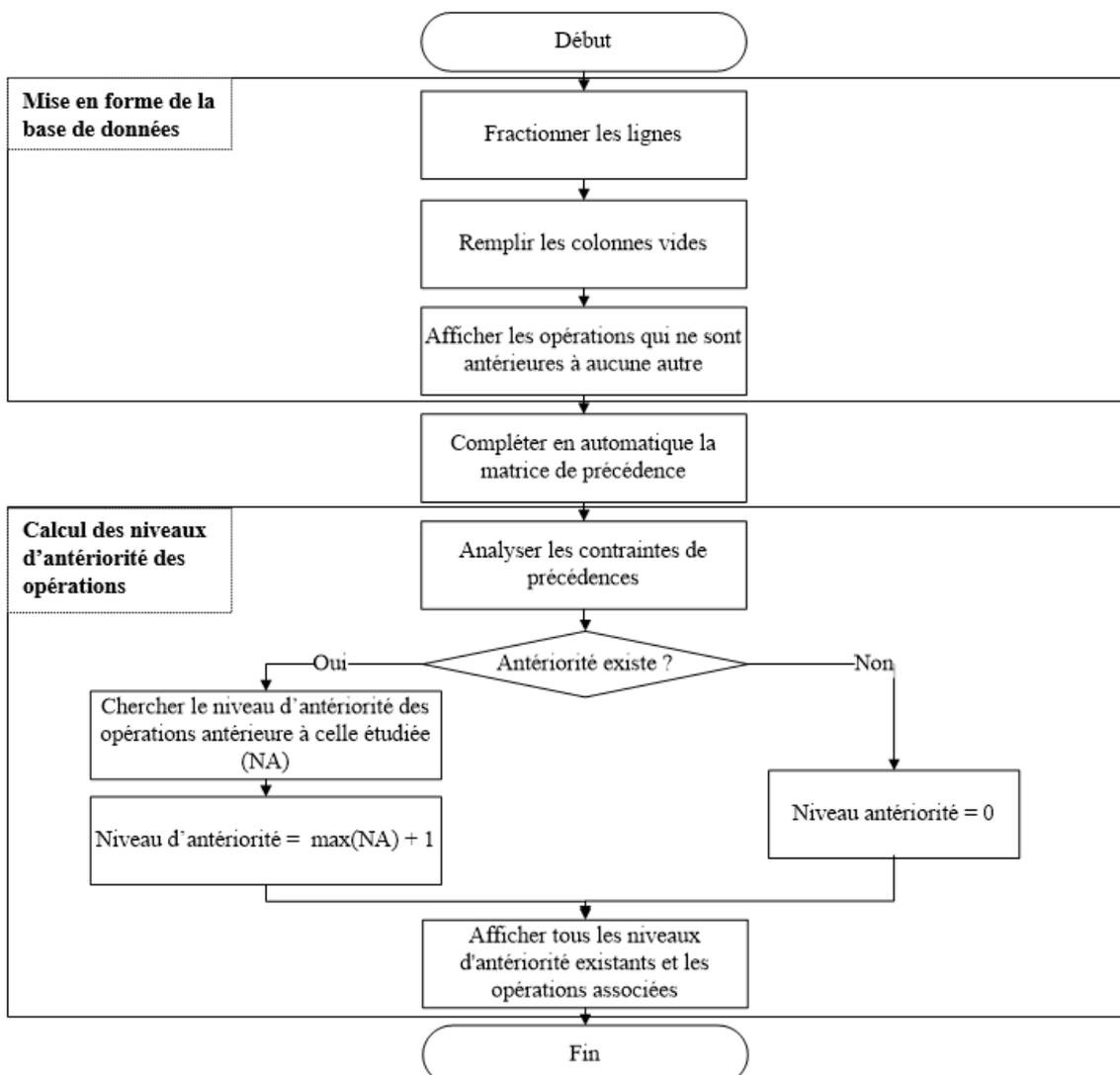


Figure 17 : Différentes étapes du programme développé pour modéliser et traiter les contraintes de précédence

Premièrement, il faut renseigner les contraintes de précédence dans la base de données. Pour chaque opération, il faut indiquer celle(s) qui lui est (sont) antérieure(s). Le programme met en forme cette nouvelle base de données en fractionnant les lignes où se trouvent plusieurs antériorités et en affichant les opérations qui ne sont antérieurs à aucune autre. Par la suite, le programme définit la matrice de précédence et calcule le niveau d'antériorité (NA) de chaque opération comme suit :

- Définir que $NA = 1$ pour toute opération qui n'a aucune contrainte d'antériorité
- Rechercher les opérations qui ont comme prédécesseurs des opérations avec $NA = 1$, leur niveau d'antériorité est donc $NA = NA + 1 = 2$
- Suivre la même démarche jusqu'à traiter l'ensemble des opérations. Dans le cas où une opération a n prédécesseurs, $NA = \max(NA_1, NA_2 \dots NA_n)$

L'exemple suivant illustre une application du programme développé :

Considérons 4 opérations O1, O2, O3, O4. Le tableau ci-dessous présente les contraintes d'antériorités qui existent entre elles.

Numéro d'opération	Antériorité
O1	
O2	O1
O3	
O4	O2, O3

La lecture du tableau montre que :

- O1 et O3 n'ont pas de prédécesseurs
- O1 doit être faite avant O2
- O2 et O3 doivent être faites avant O4

Comme décrit ci-dessus, le programme va mettre en forme la base de données. Le tableau suivant montre le résultat après application du programme :

Numéro d'opération	Antériorité
O1	
O2	O1
O3	
O4	O2
O4	O3

La matrice de précédence définie par le programme est la suivante :

	O1	O2	O3	O4
O1				
O2	X			
O3				
O4		X		X

O1 doit être faite avant O2

Le tableau suivant montre résultats du calcul du niveau d'antériorité :

Numéro d'opération	Antériorité	Niveau d'antériorité	Max (niveau antériorité)
O1		0	0
O2	O1	0+1 = 1	1
O3		0	0
O4	O2	1+1 = 2	Max(2,1) = 2
O4	O3	0+1 = 1	

Le tableau ci-dessous est le résultat de l'application de la dernière étape du programme :

NA = 0	NA = 1	NA = 2
O1		
O3	O2	O4

L'objectif du programme est d'identifier les opérations qu'il est possible de regrouper. Ceci dit, les opérations qui ont le même niveau d'antériorité. Pour cet exemple, les résultats montre qu'il est possible de regrouper O1 et O3.

L'étude des gammes et des critères de regroupements permet de proposer plusieurs scénarios d'automatisation. Pour faire le choix d'un scénario satisfaisant les exigences du métier montage, il est primordial de quantifier les critères de sélection. La section suivante a donc pour objectif de présenter les différentes règles de calcul développées pour quantifier ces critères.

3. Quantification des critères de sélection

Cette section présente les modèles et méthodes utilisés et développés pour quantifier les différents critères de sélection présentés dans le chapitre 2. Il s'agit du coût, de l'ergonomie, de la flexibilité et de la maturité de l'automatisation.

3.1. Evaluation du coût

L'industrie automobile est confrontée au défi de produire des véhicules de haute qualité dans un délai raisonnable et à des coûts modérés [79], . Par conséquent, l'estimation des coûts de fonctionnement d'une installation est un facteur clé de l'efficacité économique de la production automobile [81].

L'objectif de cette partie est de fournir des règles de calcul des coûts d'assemblage. Le but étant d'étudier la rentabilité des différents scénarios d'automatisation. La relation entre les coûts et la prise de décision en matière d'automatisation a été soulignée dans presque tous les travaux de la littérature [30], [37]–[39], [44], [67]. Grand nombre de ces travaux considère que le coût est le critère le plus important et prépondérant pour la prise de décision.

Il a été souligné que l'estimation des coûts peut être utilisée efficacement pour fournir aux décideurs les informations nécessaires pour faire des choix judicieux [81] [67], [72], [82] [83] [84] en matière d'allocation des ressources, de sorte que des décisions cruciales économiquement appropriées puissent être prises.

La littérature [85]–[88] permet d'identifier deux grandes approches qui ont pour but l'estimation des différents coûts de production :

- **Techniques basées sur l’analogie** : Ces techniques reposent sur des méthodes d’estimation qualitative. Elles sont basées sur la définition et l’analyse du degré de similitude entre le nouveau produit et un autre, qui a été déjà produit par l’entreprise. Néanmoins, ces techniques présentent plusieurs problèmes comme la difficulté de mesurer les degrés de similarité, et la complexité d’incorporer dans ces degrés l’effet du progrès technologique et les facteurs contextuels. Ces techniques sont principalement adoptées dans la première phase du processus de développement d’un produit, car elles permettent d’obtenir une estimation approximative des coûts futurs impliqués.
- **Techniques basées sur des modèles analytiques** : Ces techniques reposent sur des méthodes d’estimation quantitative basée sur l’analyse détaillée du processus de fabrication et des caractéristiques du produit. Le coût est calculé de manière très analytique. Le calcul prend en compte la valeur des ressources utilisées à chaque étape du processus de production (matières premières, composants, main-d’œuvre, équipement, etc.). Pour cette raison, l’approche technique ne peut être utilisée que lorsque toutes les caractéristiques du processus de production et du produit sont bien définies.

L’estimation du coût adéquate pour le sujet de la thèse doit être quantitative pour permettre d’étudier plusieurs scénarios d’automatisation, et de les évaluer en fonction de la rentabilité du projet. La méthodologie développée analyse plusieurs éléments d’entrée (produit, architecture usine, main d’œuvre, temps de cycle...). Il est donc judicieux d’opter pour des techniques d’estimation qui prennent en compte tous ces éléments. Le choix est donc porté sur celles basées sur des **modèles analytiques**.

Afin de fournir plus d’éléments sur l’estimation du coût, il est primordial d’identifier les différents facteurs à prendre en compte.

Les travaux étudiés [80] [89] [90] montrent clairement qu’il n’existe pas de consensus quant à la classification des facteurs du coût. Ainsi, pour les travaux de thèses, ces facteurs ont été classés en trois catégories : machines, main d’œuvre, et usine. Le Tableau 15 détaille ces facteurs.

Tableau 15 : Facteurs à prendre en compte pour le calcul du coût

Facteurs	Détails
Machines	Ce facteur englobe toutes les ressources nécessaires pour le bon fonctionnement des machines (maintenance, énergie, configuration, réglages ...) [80] [84] [90] [91] [92], [93]
Main d’œuvre	Ce facteur résume les ressources nécessaires relatifs à l’ensemble des opérateurs qui participent directement ou indirectement à la production [37] [44] [80] [89] [94] [95]
Usine	Les coûts relatifs à l’architecture de l’usine comme la surface [80] [89]

Ainsi, le coût total d’une solution d’automatisation est la somme des coûts relatifs à chacun des facteurs cités précédemment. Le modèle développé a pour but de calculer les coûts en fonction du niveau d’automatisation (LoA).

La Figure 18 présente la structuration du coût retenue pour le traitement du sujet de la thèse. Les facteurs sont décomposés en 8 sous facteurs identifiés après analyse des travaux présents dans la littérature. Ces derniers sont les principaux éléments qui permettent de bien quantifier le coût d’assemblage.

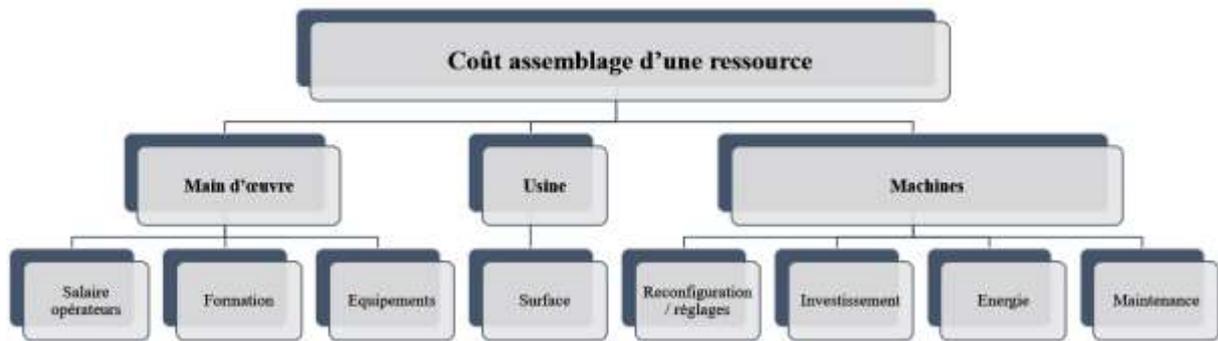


Figure 18 : Décomposition des facteurs du coût

- **Coûts Main d'œuvre**

Les coûts présentés dans cette partie caractérisent les coûts spécifiques au travail manuel. Ils sont présentés par le facteur Main d'œuvre (C_{MO}).

Cette catégorie comprend le salaire des opérateurs ($C_{opé}$), les coûts de formation (C_F) et le coût des équipements (C_{Eq}). Ainsi, le coût de la main d'œuvre est calculé en fonction de ces composants, comme le montre l'équation (1) :

$$C_{MO} = C_{opé} + C_F + C_{Eq} \quad (1)$$

- **Salaire des opérateurs**

Le salaire des opérateurs pour une ressource i est calculé en fonction de trois paramètres : le nombre des opérateurs, leur charge de travail et le salaire annuel d'un opérateur [37], [89], [93], [94], [95] comme le montre l'équation (2) :

$$C_{opé} = \sum_{i=1}^{i=Nb_{opé}} CA_{opé_i} \times \zeta_i \quad (2)$$

Avec :

$CA_{opé_i}$: Salaire annuel de l'opérateur i (€/an)

$Nb_{opé}$: Nombre des opérateurs nécessaires pour effectuer les tâches liées à la ressource

ζ_i : Charge de l'opérateur i nécessaire pour effectuer les tâches liées à la ressource

Le charge d'un opérateur i est calculée moyennant l'équation (3) :

$$\zeta_i = \frac{T_i}{T_c} \quad (3)$$

Avec :

T_i : Temps nécessaire pour que l'opérateur i exécute les tâches liées à la ressource (en min)

T_c : Temps de cycle (en min)

- **Coûts de formations**

Cette catégorie comprend les coûts des formations [65] qui peuvent être nécessaires pour que les opérateurs soient complètement productifs et efficaces. Ces coûts peuvent être très importants, c'est ainsi que le modèle développé propose de les prendre en compte.

L'équation qui permet de calculer les coûts de formations des opérateurs qui effectuent les tâches liées à la ressource est la suivante :

$$C_F = \sum_{i=1}^{i=Nb_{opé}} C_{FA_i} \times \zeta_i \quad (4)$$

Avec :

C_{FA_i} : Coût annuel de formations pour l'opérateur i (en €/an)

- **Coûts des équipements**

Cette catégorie comprend tous les outils et installations dont un opérateur a besoin afin d'être productif et capable d'exécuter les tâches liées à la ressource. Dans le cadre de $LoA = 0$, les outils et équipements manuels sont des outils qui ne nécessitent que la force physique du travailleur (visseuse, manipulateur, préhenseur ...).

La formule qui permet de calculer ces coûts est représentée par l'équation (5) :

$$C_{Eq} = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{C_{Eq_i} \times Nb_{Eq_i}}{D_i} \quad (5)$$

Avec :

n : Nombre total des équipements nécessaires à la réalisation des tâches liées à une ressource

C_{Eq_i} : Coût de l'équipement i

Nb_{Eq_i} : Nombre de l'équipement de type i

D_i : Durée de vie de l'équipement i

- **Coûts Usine**

Les coûts présentés dans cette partie caractérisent les coûts inhérents quelle que soit la solution retenue (manuelle ou automatisée). Ils sont présentés par le facteur usine (C_U). Il comprend la surface occupée ($C_{surface_occupée}$).

$$C_U = C_{surface_occupée} \quad (6)$$

- **Coût de la Surface occupée**

Ce composant de coût représente le coût de la surface que la ressource occupe dans l'usine de production. Les travaux de recherche analysés considèrent ce coût comme l'un des frais généraux [89]. Peu d'entre eux détaillent l'équation qui permet le calcul de ce coût.

Son [97] a défini une formule qui permet d'estimer le coût de la surface occupée. Le calcul se fait en multipliant la surface qu'occupe la ressource par le coût de la surface au sol par mètre carré comme le montre l'équation (7) :

$$C_{surface_occupée} = S_{occupée} \times C_{m^2} \quad (7)$$

Avec :

$S_{occupée}$: Surface occupée par la ressource i

C_{m^2} : Coût annuel de la surface au sol par m²

- **Coûts Machine**

Cette catégorie comprend le coût de mise en route relatif aux réglages et reconfiguration des machines (C_R), les investissements (*Invest*), l'énergie consommée (*NRJ*) et le coût de la maintenance (C_{Mt}). Ainsi, le coût machine est calculé en fonction de ces composants, comme le montre l'équation (8) :

$$C_{Ma} = C_R + Invest + NRJ + C_{Mt} \quad (8)$$

- **Coût de mise en route**

Son [97] considère le coût de mise en route comme étant le coût de préparation des machines pour chaque cycle. Ce coût a été estimé dans divers travaux dans la littérature [44], [82], [98].

L'équation de calcul du coût de mise en route proposée prend en compte plusieurs paramètres comme le temps de mise en route, le coût horaire des arrêts de production, le nombre et le salaire des opérateurs mobilisés pour effectuer les préparations et réglages nécessaires ou encore le nombre de réglages effectués et le nombre de jours ouvrés dans l'année. L'équation (9) présente la méthode de calcul de ce coût :

$$C_R = T_R \times (C_{ArrProd} + Nb_{Opér} \times C_{Opér}) \times Nb_R \times JO \quad (9)$$

Avec :

T_R : Temps nécessaire pour faire les réglages et les préparations (en min)

$C_{ArrProd}$: Coût arrêt de production (en €/min)

$Nb_{OpÉR}$: Nombre des opérateurs qui effectuent les réglages et les préparations

$C_{OpÉR}$: Salaire des opérateurs qui effectuent les réglages et les préparations (en €/an)

Nb_R : Nombre des réglages effectués dans la journée

JO : Nombre des jours ouvrés dans l'année

- Investissements

Pour les opérations automatisées, les coûts d'investissement sont généralement importants. Le modèle développé considère que le coût d'investissement d'une ressource comprend les frais d'achat, de transport et d'installation, ainsi que la durée de vie estimée des machines et de la ressource. Pour le calcul de ce coût, le modèle proposé par Gorchach et Wessel [37] s'avère être utile.

Ainsi l'équation (10) montre la formule développée pour calculer le coût d'investissement :

$$Invest = \frac{C_{g_investissement}}{\min(D_{machines}, D_{ressource})} \quad (10)$$

Avec :

$C_{g_investissement}$: Coût global d'investissements (achat, transport, intégration ...)

$D_{machines}$: Durée de vie des machines

$D_{ressource}$: Durée de vie de la ressource

- Coût de l'énergie consommée

Pour les usines fortement automatisées, le coût de l'énergie consommée peut avoir un impact très important sur la rentabilité.

Le coût de l'énergie est généralement calculé en multipliant la puissance des machines par le temps de leur fonctionnement. Comme le modèle développé propose des estimations de coûts à l'année, le temps de fonctionnement des machines est converti en un temps de fonctionnement annuel. Ainsi l'équation qui est la plus adéquate au contexte de la thèse est la suivante :

$$NRJ = P_{consommée} \times C_{kW} \times T_f \times JO \quad (11)$$

Avec :

$P_{consommée}$: Puissance consommée par les machines (en kW/h)

C_{kW} : Coût du kilowatt (en €/kW)

T_f : Temps de fonctionnement journalier des machines (en h)

- **Coût de la Maintenance**

L'équation développée pour le calcul des coûts de la maintenance est basée sur la formule proposée par Bornschlegl [65], [80]. L'auteur considère que le coût de la maintenance comprend deux éléments : le coût des pièces de rechange et le coût de la main d'œuvre. Ce dernier est calculé en multipliant le salaire des opérateurs de maintenance par le temps de réparation et par un paramètre qui identifie la probabilité d'avoir une défaillance.

Le modèle développé dans le cadre de la thèse prend les travaux de Bornschlegl et les adaptations effectuées par Salmi [65] comme base. Le paramètre « temps de réparation » est remplacé par le paramètre $MTTR$ (temps moyen de réparation). Le paramètre λ (taux de défaillance) est utilisé pour exprimer la probabilité d'avoir une panne. Ensuite, la notion du $MTBF$ est introduite pour identifier le temps moyen entre les pannes. Le temps de fonctionnement des machines divisés par ce paramètre permet d'estimer le nombre des pannes.

Ainsi la formule proposée pour calculer les coûts de maintenance est représentée par l'équation (12) :

$$C_{Mt} = MTTR \times NB_{opém} \times C_{opém} \times \lambda \times \frac{Tf}{MTBF} \times JO + Ca_{PR} \quad (12)$$

Avec :

$MTTR$: Temps moyen de réparation (en h)

$NB_{opém}$: Nombre des opérateurs de maintenance nécessaire pour réparer une panne

$C_{opém}$: Salaire annuel d'un opérateur maintenance (en €/an)

λ : Taux de défaillance (en h⁻¹)

$MTBF$: Temps moyen entre pannes (en h)

Ca_{PR} : Coût annuel des pièces de rechange (en €/an)

3.2. Evaluation de l'ergonomie

La conception et le maintien d'un environnement de travail adéquat est l'un des objectifs de l'ergonomie. Les entreprises veulent toutes que leurs lieux de travail soient des promoteurs de productivité et de qualité. Pour cela, il faut une relation correcte entre les facteurs environnementaux (éclairage, bruit, température), les efforts développés, les postures de travail, la répétitivité et les outils utilisés [99].

Le périmètre des travaux de thèse est l'atelier montage automobile. Ainsi, les opérations à étudier sont des opérations d'assemblage qui sollicitent toutes les parties du corps. Le choix doit donc porter sur une méthode qui analyse l'ensemble de ses parties. La méthode doit être quantitative pour permettre une évaluation objective.

Dans cette section, les différentes méthodes d'évaluation de l'ergonomie d'un poste de travail sont présentées. Leurs avantages et inconvénients sont étudiés. L'objectif est de choisir une méthode qui convient au traitement du sujet de la thèse.

3.2.1. Méthode RULA

RULA [100] (*Rapid Upper Limb Assessment*) est une méthode développée pour être utilisée dans les enquêtes ergonomiques sur les lieux de travail où des troubles des membres sont signalés. Comme son nom l'indique, cette méthode fournit une évaluation rapide. Les membres supérieurs (épaules, poignets...), des postures du cou, du tronc, des jambes et de la fonction musculaire, ainsi que les charges externes subies par le corps sont étudiés.

La méthode utilise des diagrammes de postures corporelles et trois tableaux de notation [101] pour fournir une évaluation du risque. Cette dernière s'effectue par le biais d'un score qui est calculé suite à une analyse de deux parties du corps.

La partie A est axée sur le poignet, le coude et l'épaule. La partie B évalue les jambes, le tronc et la nuque [102]. L'utilisation des tableaux présentés dans l'Annexe 6 permet d'obtenir un score pour chaque partie, auquel y sont ajoutés deux autres scores : l'activité musculaire et l'effort. En additionnant ces différentes valeurs, un score intermédiaire pour chaque partie est calculé. La valeur finale est obtenue en croisant les scores intermédiaires (C et D).

La Figure 19 explique le schéma d'obtention du score final.

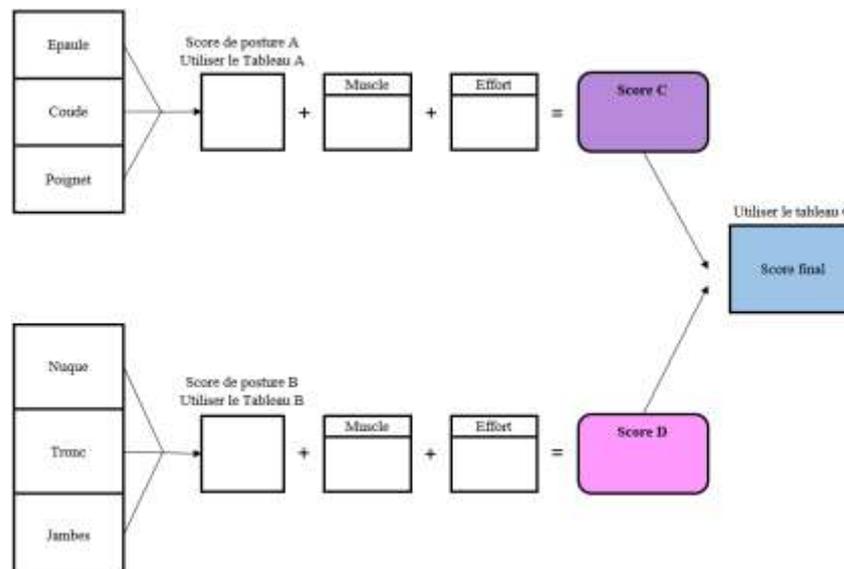


Figure 19 : Schéma d'obtention du score final en appliquant la méthode RULA

Ainsi, pour chaque valeur obtenue, les niveaux de risque et interventions sont décrits [100]. L'interprétation des valeurs est la suivante :

- **Score final = 1 ou 2** : Le niveau de risque est négligeable. Aucune intervention n'est nécessaire.
- **Score final = 3 ou 4** : Le niveau de risque est faible. Il se peut qu'une intervention soit nécessaire.
- **Score final = 5 ou 6** : Le niveau de risque est élevé. Une intervention à brève échéance est nécessaire.
- **Score final = 7** : Le niveau de risque est très élevé. Une intervention urgente est nécessaire.

La méthode RULA présente plusieurs avantages. C'est une méthode quantitative qui permet une analyse rapide de toutes les parties du corps. La méthode évalue le risque et propose le niveau d'intervention à faire. Elle prend en compte la force musculaire, la charge ainsi que les efforts fournis

durant l'exécution d'une tâche. Toutefois, la méthode est limitée par le fait qu'elle ne prend pas en compte la durée des tâches.

3.2.2. Méthode NIOSH

La méthode NIOSH [103] est un outil qui permet de conseiller les entreprises sur les limites de poids acceptables concernant les opérations de manutention. Avec ces indications, les opérateurs vont éviter les problèmes du dos liés à des soulèvements ou à des abaissements.

Plusieurs paramètres sont pris en compte pour identifier le poids limite recommandé (*RWL*) [104] [105]. Parmi ces paramètres, on retrouve la hauteur de la charge, la torsion du tronc, la distance de la charge à l'avant du corps, le déplacement vertical ainsi que la durée et la fréquence de la tâche.

Waters [104] a présenté une formule qui permet, en fonction de tous ces paramètres, de calculer le poids limite recommandé. Ce dernier est utilisé pour calculer un indice de levage (*LI*) en divisant le poids levé (*LW*) par le poids limite recommandé (*RWL*) comme le montre l'équation (3) :

$$LI = \frac{LW}{RWL} \quad (3)$$

Ainsi pour chaque valeur *LI*, le niveau de risque est évalué. L'interprétation des valeurs de l'indice *LI* est la suivante :

- $LI < 1$: le risque est négligeable.
- $1 < LI < 3$: le risque existe. La situation doit être améliorée.
- $LI > 3$: le risque est inacceptable.

La méthode NIOSH présente plusieurs avantages. Elle est quantitative. Elle permet de calculer un indice pour décrire le niveau de risque. Contrairement à la méthode RULA, elle prend en compte la durée de la tâche. Toutefois, cette méthode est très limitée. Elle ne s'intéresse qu'aux opérations de soulèvements et abaissements. Ainsi, elle néglige les risques de troubles musculo-squelettiques (TMS) qui ne sont liés à d'autres types de tâches.

3.2.3. Méthode MAC

La méthode MAC (*The Manual handling Assessment Charts*) [106] est un outil destiné à identifier la manutention manuelle à haut risque. La méthode permet donc d'évaluer les facteurs de risque les plus courants dans les opérations de levage, de transport et de manutention en groupe.

La feuille de score (Annexe 7) [105] permet d'étudier une dizaine de facteurs de risques. Pour chaque type d'opération, ces facteurs sont évalués moyennant la grille illustrée par la Figure 20. Ensuite, un score total est calculé.

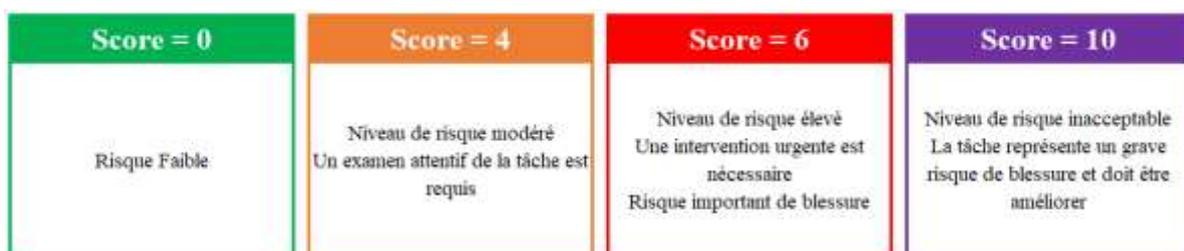


Figure 20 : Evaluation des tâches par la méthode MAC [106]

La méthode MAC présente quelques avantages. Elle est quantitative puisqu'elle permet de calculer un score pour identifier les tâches à haut risque. Elle est facile à utiliser. Elle nécessite une analyse bien détaillée des différentes tâches. Toutefois, elle est très limitée par le fait qu'elle est destinée à n'étudier que les opérations de levage, de transport et de manutention en groupe. Négligeant ainsi d'autres types d'opérations qui peuvent être très risquées.

3.2.4. Méthode de Keyserling

La checklist de Keyserling [107] a pour but de détecter la présence de facteurs de risques ergonomiques associés aux postures inconfortables des membres supérieurs.

En effet, les postures inconfortables sont définies [108] comme étant des postures qui, lorsqu'elles sont utilisées de manière répétitive ou prolongée, entraînent un risque accru de fatigue, de douleur ou de blessures.

Avec la checklist de Keyserling, la détection des facteurs de risque passe par 18 questions [107]. La figure [105] Annexe 8 présente un exemple de ces questions. Ces facteurs de risque sont associés à plusieurs paramètres comme l'effort fourni, la répétitivité de la tâche, les postures adoptées ou encore les outils manuels utilisés.

Dans un premier temps, les réponses aux questions de la checklist de Keyserling [107] concernent la présence ou l'absence du facteur de risque. Elles concernent également la durée d'exposition au facteur de risque. Dans ce cas, les réponses peuvent être :

- 0 : Facteurs non présents
- X : Durée d'exposition modérée
- XX : Durée d'exposition importante (plus d'un tiers du temps)

Après, la comptabilisation du nombre de X et XX est faite. Le score final obtenu permet d'identifier le poste de travail qui présente un risque important.

La checklist de Keyserling est simple, et peut être utilisée par des personnes qui ne sont pas forcément experts en ergonomie. C'est une méthode semi-quantitative dont le score ne permet que d'orienter les décideurs vers l'identification des postes de travail qui nécessitent des améliorations. La méthode n'a pour objectif que d'étudier les membres supérieurs.

3.2.5. Méthode Strain Index

La méthode Strain Index [109] a pour objectif de déterminer la probabilité de développer un trouble musculo-squelettique à l'avant-bras, au coude, au poignet et à la main. Pour ce faire, la méthode évalue six paramètres [110] : l'intensité de l'effort, sa durée, le nombre d'effort par minute, la posture de la main/poignet, la vitesse du travail et la durée de la tâche par jour.

Ainsi pour chaque tâche et chaque main, les six paramètres sont évalués moyennant les coefficients [111] présentés par l'Annexe 9. La valeur finale Strain Index est calculée en multipliant les six scores obtenus après évaluation des six paramètres.

Suivant le score Strain Index obtenu, le risque de développer des TMS est estimé. L'interprétation du résultat est la suivante :

- **Score < 3** : Aucun risque de développer des TMS.
- **3 < Score < 5** : Risque incertain.

- **5 < Score < 7** : Risque élevé. Il faut développer des outils de contrôle si le poste de travail a déjà présenté des cas de TMS.
- **Score > 7** : Risque très élevé. Des mesures de prévention et de contrôle doivent fortement être mises en place

Cette méthode est quantitative. Elle analyse et évalue plusieurs paramètres. Toutefois, l'évaluation de ces paramètres est subjective. Elle se base uniquement sur l'avis du travailleur ou expert qui va appliquer la méthode. La méthode est également limitée par le fait qu'elle n'étudie que les risques liés à la partie supérieure du corps (mains, poignet, coude et avant-bras).

3.2.6. Méthode OWAS

La méthode OWAS [112] a pour but d'identifier la fréquence et le temps passé dans des postures. Elle permet d'évaluer la situation et recommander ainsi des actions correctives.

L'application de la méthode OWAS suit les étapes suivantes [105] :

- Enregistrer une vidéo du poste de travail à étudier
- Analyser la vidéo et déterminer des postures pour le dos, les bras et les jambes. Ainsi que, le poids des charges et les efforts réalisés
- Déterminer le niveau d'action requis en se basant sur l'analyse effectuée :

Niveau 1 : Aucune correction n'est requise. Les conditions sont favorables

Niveau 2 : Améliorations requises dans l'avenir. Les conditions sont peu favorables

Niveau 3 : Améliorations requises aussitôt que possible. Les conditions sont défavorables

Niveau 4 : Améliorations requises dans l'urgence. Les conditions sont extrêmement défavorables

La méthode OWAS permet d'étudier attentivement les conditions de travail des opérateurs. Toutefois, c'est une méthode qualitative qui a pour but de prévenir des risques TMS et d'identifier les postes de travail à améliorer.

Une difficulté est à noter concernant l'application de la méthode. La vidéo doit couvrir tout le corps, ainsi on perd de la précision pour bien déterminer les postures des bras et dos.

3.2.7. Méthode OCRA

La méthode OCRA [113] décrit et évalue les principaux facteurs de risque caractérisant divers paramètres comme la fréquence et la répétitivité des mouvements, l'effort fourni, les types de postures et de mouvements ou encore les périodes de récupération.

Le risque est évalué en utilisant l'indice OCRA [114]. Cet indice est calculé en divisant le nombre d'actions techniques effectuées pendant le travail (*ATA*) par le nombre d'actions techniques de référence (*RTA*) comme le montre l'équation (4) :

$$OCRA = \frac{ATA}{RTA} \quad (4)$$

La méthode propose également les règles de calcul des deux paramètres *ATA* et *RTA* [113]. La valeur de l'indice *OCRA* détermine le niveau de risque. La Figure 21 présente les différentes interprétations des valeurs *OCRA*.

Zone	Valeur Indice OCRA	Classement du risque
Vert foncé	< 1,5	Optimal
Vert vif	1,6 – 2,2	Acceptable
Jaune	2,3 – 3,5	Borderline ou très bas
Rouge clair	3,6 – 4,5	Bas
Rouge vif	4,6 – 9,0	Moyen
Rouge foncé	> 9,0	Elevé

Figure 21 : Synthèse des valeurs OCRA et classement du risque

La méthode OCRA est quantitative. Elle permet de calculer un score pour identifier le niveau de risque qu'une tâche répétitive présente. Toutefois, elle est limitée par le fait qu'elle n'analyse que les membres supérieurs. Le calcul des deux paramètres *ATA* et *RTA* est très complexe. Il nécessite plusieurs heures voire plusieurs jours d'analyse.

3.2.1. Synthèse des méthodes d'évaluation de l'ergonomie

L'ergonomie est un critère très important pour le choix d'un scénario d'automatisation. Une étude bibliographique sur les différentes méthodes d'évaluation de ce critère a été faite. Les avantages et limites de chacune d'elles ont été soulignés. Et les parties du corps qu'elles analysent ont été identifiés. L'Annexe 10 présente une analyse de l'ensemble des méthodes de quantification de l'ergonomie.

En effet, la méthode qui répond au mieux aux besoins de la thèse est la méthode RULA.

3.3. Evaluation de la flexibilité

Certains systèmes sont dits flexibles parce qu'ils produisent une variété de pièces. Dans la plupart de ces exemples, le mode de fonctionnement est soit de type ligne de transfert, soit basé sur la production de lots de pièces similaires. Pour aider à clarifier la situation, sept types de flexibilité ont été étudiés [115]. Ainsi, pour Stellantis, deux sont intéressants: flexibilité au volume et flexibilité à la variabilité.

La quantification de ces critères adoptée pour les travaux de thèse (Tableau 16) a été définie en se basant sur les travaux de D'souza [116].

Tableau 16 : Quantification des paramètres du critère flexibilité

Paramètres du critère Flexibilité			Entièrement d'accord	Partiellement d'accord	Ni		Entièrement en désaccord
					d'accord, ni en désaccord	Partiellement en désaccord	
Volume	Vol 1	Volume où le système sera rentable est élevé	5	4	3	2	1
	Vol 2	Temps requis pour augmenter ou diminuer le volume de production est élevé	5	4	3	2	1
	Vol 3	Coût requis pour augmenter ou diminuer le volume de production est élevé	5	4	3	2	1
Variabilité	Var 1	On ne peut pas réaliser un grand nombre de différents produits	5	4	3	2	1
	Var 2	Temps requis pour introduire de nouveaux produits est élevé	5	4	3	2	1
	Var 3	Coûts requis pour introduire de nouveaux produits est élevé	5	4	3	2	1

Chaque paramètre est quantifié par un score, et par un poids. Le poids de chaque paramètre doit être calculé à travers une analyse multicritère.

Ainsi le critère flexibilité est calculé selon l'équation (5) :

$$Flexibilité = P_{Vol} \times \frac{\sum_{i=1}^3 ScoreVol_i}{3} + P_{Vri} \times \frac{\sum_{i=1}^3 ScoreVri_i}{3} \quad (5)$$

Avec :

P_{Vol} : Poids du paramètre Volume

$ScoreVol_i$: Score du paramètre Volume

P_{Vri} : Poids du paramètre Variabilité

$ScoreVri_i$: Score du paramètre Variabilité

3.4. Evaluation de la maturité de l'automatisation

Les Niveaux de Maturité Technologique (TRL) [117] sont utilisés pour quantifier l'état de maturité technologique d'un élément destiné à être utilisé pour une mission. Dans le cadre des travaux de recherche, il s'agit de la maturité de l'usage de la technologie.

Plus le TRL est élevé, plus la technologie est mature. Le Tableau 17 présente la quantification de la maturité d'une technologie.

Tableau 17 : Quantification de la maturité d'automatisation

Niveau	Détails
1	Observation du principe de base
2	Formulation du concept technologique
3	Preuve expérimentale du concept
4	Validation des fonctions clés du concept en laboratoire
5	Validation de la technologie en environnement représentatif
6	Démonstration dans un environnement réel estimé
7	Démonstration dans un environnement opérationnel
8	Qualification du système complet dans un environnement opérationnel
9	Validation du système dans un environnement réel

Pour le sujet de thèse, la maturité de n technologies est calculée selon l'équation (6). Plus ce TRL est proche de 1, plus la solution est mature.

$$TRL = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} TRL_i}{9} \quad (6)$$

A ce stade, les critères d'évaluation des scénarios d'automatisation sont identifiés. Les règles de calcul sont déterminées. Pour faire le choix d'un scénario d'automatisation, il faut intégrer et étudier simultanément l'ensemble des critères.

Aucune solution ne peut maximiser ou minimiser tous les critères. Il est donc question de chercher une solution satisfaisante en fonction du contexte des travaux de recherche. Ainsi, il est primordial de déterminer une méthode d'analyse multicritère pour pouvoir identifier cette solution.

4. Méthodes d'analyse multicritère

Un des objectifs de l'analyse multicritère est de remédier aux problèmes de divergence de points de vue [118]. Cette section analyse les différentes méthodes d'analyse multicritère trouvées dans la littérature. L'objectif est de choisir celle adaptée à la problématique de recherche.

Roy [119] a caractérisé un problème de décision par diverses notions :

- **Alternative** : les différentes solutions possibles à un problème.
- **Critère** : l'élément qui permet de comparer les alternatives. Il peut être quantitatif ou qualitatif.
- **Poids d'un critère** : l'élément qui permet de représenter l'importance d'un critère par rapport aux autres.
- **Evaluation** : la valeur affectée aux alternatives qui permettent de faire un choix

Après avoir présenté cette caractérisation, Roy [119] recense et définit quatre types de problèmes de décision :

- **Problèmes de rangement** : utiliser des classes d'équivalence afin de ranger les alternatives de la meilleure à la moins bonne.
- **Problèmes de tri** : assigner chaque alternative à plusieurs catégories plutôt qu'à une seule.
- **Problèmes de choix** : utiliser une méthode de sélection afin de proposer au décideur la meilleure alternative.
- **Problèmes de description** : utiliser des critères qualitatifs pour caractériser les différentes alternatives.

La méthodologie développée doit proposer à l'industriel une aide à la décision pour l'automatisation des lignes d'assemblage. Dans ce contexte, la méthodologie doit évaluer plusieurs scénarios d'automatisation pour proposer le meilleur. Ainsi, le problème auquel sont confrontés les travaux de thèse est un problème de rangement. En effet, il s'agit de classer les scénarios possibles d'automatisation du meilleur au moins bon.

On distingue deux grandes familles de méthodes qui traitent ce type de problèmes. Des méthodes d'agrégation totale qui cherchent à réduire n critères en un seul critère unique et des méthodes d'agrégation partielle qui cherchent à comparer les solutions tout en respectant l'incomparabilité entre elles.

4.1. Méthodes d'agrégation totale

Il existe quatre méthodes connues qui permettent une agrégation totale des critères : la somme pondérée [120], le produit pondéré [121], Macbeth [122] et AHP [123].

Ainsi, cette section a pour objectif de présenter et analyser ces différentes méthodes.

4.1.1. Méthodes de la somme pondérée et du produit pondéré

Les méthodes de la somme pondérée [120] et du produit pondéré [121] consistent à affecter un poids à chaque critère et à évaluer la performance de chaque alternative par rapport à un critère. L'objectif étant de combiner toutes les fonctions multi-objectifs en une seule fonction.

Ces méthodes sont simples et faciles d'utilisation. Après analyse et étude de chacune d'elles, il s'est avéré qu'elles présentent plusieurs limites :

- **Interprétation des valeurs des critères** : elle n'est pas claire du fait qu'il faut prendre en compte deux paramètres : l'importance des critères et leur normalisation
- **Évaluation des critères** : une évaluation positive sur un critère peut compenser une évaluation négative sur un autre
- **Sensibilité du résultat** : une transformation d'échelle des critères a une influence sur le résultat obtenu

4.1.2. Méthode Macbeth

La méthode Macbeth (*Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique*) [122] nécessite seulement des jugements qualitatifs afin de mesurer l'attractivité de chaque alternative par rapport à une autre.

La méthode est basée sur un programme sous forme d'une approche interactive et de questionnement du décideur pour évaluer l'attractivité. Ce programme a pour but également de vérifier la robustesse des données tout en créant une échelle de poids.

La méthode Macbeth présente une limite liée à la nature des critères de choix. Le décideur émet des jugements qualitatifs, chose qui peut impacter le résultat obtenu.

4.1.3. Méthode AHP

La méthode AHP (*Analytic Hierarchy Process*) [123] consiste à hiérarchiser les alternatives possibles ainsi que leurs critères. Cette approche permet de mettre en évidence les critères qui impactent la décision finale.

La méthode AHP est quantitative et prend en compte des critères qualitatifs et quantitatifs [124]. Sa force réside dans le fait qu'elle organise le problème d'une manière structurée. Chose qui permet de le traiter d'une façon logique en passant par différents niveaux jusqu'à déboucher sur une comparaison binaire des critères. La cohérence de ces comparaisons est évaluée par un indice de cohérence. Le traitement du problème par la méthode AHP peut s'avérer long et compliqué si le nombre de critères et/ou alternatives est élevé.

4.2. Méthodes d'agrégation partielle

Les méthodes les plus connues qui se basent sur l'agrégation partielle des critères sont les méthodes ELECTRE [118] [119] et Prométhée [125].

Ainsi, cette section a pour objectif de présenter et analyser ces différentes méthodes.

4.2.1. Méthode ELECTRE

Les méthodes ELECTRE (*ELimination Et Choix Traduisant la REalité*) [118] [119] est une famille de méthodes qui permet d'effectuer des comparaisons binaires entre les différentes alternatives possibles. Selon les versions, ces méthodes permettent de traiter des problématiques de tri, de classement ou de choix tout en prenant en considération l'incomparabilité d'alternatives.

Toutefois ces méthodes présentent plusieurs limites notamment le grand nombre des paramètres à traiter et l'obligation d'effectuer des analyses de robustesse et de sensibilité.

4.2.2. Méthode Prométhée

Les méthodes Prométhée (*Preference Ranking Organisation METHod for Enrichment Evaluations*) [125] sont des méthodes de surclassement qui ont été inspirées par les travaux de Roy sur les méthodes ELECTRE.

Ces méthodes visent à calculer une intensité de préférence pour comparer les alternatives. Cette intensité est calculée moyennant l'équation (7) :

$$P_i(a_1, a_2) = p(f_i(a_1) - f_i(a_2)) \quad (7)$$

Avec :

a_1, a_2 : Respectivement, alternative 1 et alternative 2

$P_i(a_1, a_2)$: Intensité de préférence

$f_i(a_1)$: Respectivement, valeur de l'alternative a_1 par rapport au critère i

$f_i(a_2)$: Valeur de l'alternative a_2 par rapport au critère i

$P_i(a_1, a_2) = 0 \rightarrow$ Aucune préférence de a_1 sur a_2

$P_i(a_1, a_2) = 1 \rightarrow$ Préférence forte de a_1 sur a_2

Les méthodes Prométhée présentent plusieurs limites :

- **Temps de traitement** : Si le problème présente plusieurs critères et alternatives, le temps de traitement peut vite être très important
- **Interprétation des critères** : Il est difficile de garder une vue d'ensemble sur le problème quand beaucoup de critères sont impliqués
- **Inversion de rang** : Les alternatives peuvent être inversées lorsqu'une nouvelle est introduite

4.3. Synthèse des méthodes d'analyse multicritère

Les sections 4.1. et 4.2. détaillent les méthodes d'analyse multicritère trouvées dans la littérature. La synthèse de cette étude bibliographique est représentée par le Tableau 18.

Tableau 18 : Comparatif des méthodes d'analyse multicritère

Type	Méthode	Avantages	Limites
Agrégation complète	Somme pondérée	Simples à utiliser	Interprétation difficile des valeurs des critères Problème de compensation entre les critères Sensibilité du résultat
	Produit pondéré		
	Macbeth	Vérification de la robustesse des données	Nature des critères de choix Fiabilité du résultat Echelles non bornées
	AHP	Hierarchisation des critères et alternatives Validation de la cohérence des critères	Temps de traitement long en fonction du nombre de critères et alternatives à traiter
Agrégation partielle	ELECTRE	Prise en compte de l'incomparabilité entre les critères	Traitement d'un grand nombre de paramètres Obligation d'effectuer une analyse de robustesse et de sensibilité
	Prométhée	Prise en compte de l'incomparabilité entre les critères Calcul de l'intensité de préférence d'un critère sur un autre	Temps de traitement Interprétation des critères Inversion des rangs

Le choix d'un scénario d'automatisation doit se faire en analysant l'ensemble des solutions possibles en fonction des critères cités dans la section 3. Chaque scénario doit être comparé à un autre en fonction du coût, de l'ergonomie, de la flexibilité ainsi que de la maturité technologique.

Au cours du processus de prise de décision, les critères doivent être classés par ordre de priorité pour déterminer le poids de chacun d'eux et ainsi connaître le/les critère(s) qui influe(ent) le plus le résultat. Cette pondération permet de mettre en avant les axes d'améliorations à privilégier pour avoir une automatisation rentable.

Ainsi, la méthode d'analyse multicritère adaptée aux travaux de recherche doit permettre de traiter d'une manière structurée et logique l'ensemble des paramètres. Elle doit permettre de comparer les critères entre eux pour ensuite attribuer un poids à chacun d'eux. Le choix est donc porté sur la méthode AHP.

5. Conclusion

Les méthodes d'aide à la décision sur le niveau d'automatisation sont peu abondantes. Ces méthodes reposent sur peu de critères et n'éclaircissent pas les méthodes de calcul ou d'estimation de ces critères.

Ce chapitre propose une nouvelle définition du LoA. Cette définition prend le temps comme critère de calcul. Ce choix est expliqué par la nécessité d'avoir un indicateur qui permet d'estimer la part des opérateurs et la part des installations automatisées. Ceci donne une vision claire sur le potentiel d'automatisation de la ligne de production.

Ce chapitre présente également la méthodologie développée qui comporte six grandes activités. Cette méthodologie respecte l'ensemble des exigences définies précédemment. En effet, elle est analytique puisqu'elle permet d'étudier finement toutes des données relatives aux gammes de montage, à l'architecture de l'usine ou encore à la conception de produits. La méthode permet une analyse des regroupements d'opérations et d'équilibrage de la ligne. Elle permet également d'étudier et d'évaluer plusieurs scénarios d'automatisation en se basant sur des modèles et règles de quantification des critères de choix (coût, ergonomie, flexibilité et maturité des technologies).

Pour mettre ces approches développées en pratique, une analyse des gammes de montage chez Stellantis est présentée. Il en résulte que plusieurs informations manquent, notamment, les contraintes de précedence entre les différentes opérations. Pour remédier à ce manque et faciliter la recherche de regroupements d'opérations, un programme VBA est développé. Ce chapitre détaille les étapes de ce programme. Pour une meilleure compréhension, un exemple d'application est présenté.

La dernière activité de la méthodologie nécessite la définition des règles de calcul des critères de choix et l'identification d'une méthode d'analyse multicritère pour pouvoir choisir le scénario d'automatisation qui satisfait les exigences de l'industriel. Pour répondre à ce besoin, ce chapitre présente un ensemble de modèles de calcul des critères. Différentes méthodes d'analyse multicritère sont étudiées. Le choix de la méthode AHP est argumentée.

La méthodologie est applicable par toute personne ayant des connaissances relatives aux gammes d'assemblage. Il est à noter que les résultats obtenus en utilisant cette méthode sont sensibles au choix des critères de regroupements.

La méthodologie est manuelle. Ainsi, pour pouvoir traiter un grand nombre de gammes de production, il serait judicieux d'automatiser certaines étapes comme la construction des bases de données, la formalisation des contraintes de précedence ou encore l'évaluation des scénarios d'automatisation.

Pour montrer le déploiement de la méthodologie et des modèles développés, le chapitre 4 présente trois cas d'études industriels. L'objectif est de vérifier l'applicabilité de l'ensemble de l'approche décisionnelle et souligner ainsi ses limites et les différents points d'amélioration.

Chapitre 4 : Déploiement de la méthodologie et modèles développés sur trois cas d'étude industriels

Résumé

Cette quatrième partie du manuscrit met en application les étapes et les outils de la méthodologie. Elle présente trois cas d'étude industriels. La première application industrielle a pour objectif de valider la méthodologie. La deuxième étude de cas montre la mise en œuvre de la première partie de la méthodologie qui consiste à chercher des regroupements d'opérations. Quant à la dernière application, elle a pour but d'illustrer le déroulement de la deuxième partie de la méthodologie qui vise à étudier les opérations critiques en ergonomie et/ou qualité.

Dans un premier temps, ce chapitre présente et explique le contexte des études menées. Il rappelle et souligne les besoins du métier montage en terme d'amélioration de la performance industrielle, de gain de temps de montage manuel ou encore d'amélioration du niveau d'ergonomie.

La première étude de cas concerne la ligne Habillage Moteur (HAM). Un schéma de la ligne ainsi que les différents postes de travail qui la constituent sont présentés. Le choix de réaliser cette étude de cas est conduit par la nécessité de vérifier la méthodologie. En effet, cette étude est déjà réalisée par Stellantis. L'objectif est donc de la traiter en appliquant la méthodologie et par la suite, d'analyser et comparer les résultats obtenus.

La deuxième étude de cas concerne la ligne de montage principale. Un schéma de cette ligne est présenté pour illustrer et mieux comprendre les différents brins qui constituent cette ligne. Cette application industrielle traite la première partie de la méthodologie qui consiste à rechercher des regroupements d'opérations. Les résultats de cette étude montrent la complexité de la problématique relative principalement à la conception actuelle et future des produits.

La troisième étude de cas concerne le montage du toit ouvrant panoramique. Cette étude de cas industriel met en application la deuxième partie de la méthodologie qui s'appuie sur des opérations ergonomiquement pénibles. L'objectif étant d'améliorer les postes de travail par le biais de l'automatisation. Le traitement d'une opération ergonomiquement critique est présenté. La dernière activité de la méthodologie (A6) est mise en avant. L'estimation des critères de choix est effectuée. La méthode AHP est appliquée.

1. Contexte des études

L'optimisation des processus industriels est motivée par la concurrence et par l'envie d'avoir une meilleure performance économique. Ainsi, pour atteindre cet objectif d'efficacité, le groupe Stellantis a engagé une amélioration continue de productivité de ses usines.

Dans ce contexte, l'industriel cherche à réduire ses coûts de production en automatisant ses lignes de montage. Toutefois, l'équilibrage des charges (opérateurs ou installations automatisées) ainsi que la diversité croissante de produits restent des contraintes majeures.

Pour faire face à ces contraintes, le métier montage cherche davantage à mettre en place des automatisations rentables et transversalisables sur les différentes usines du groupe. Ceci passe par la recherche de regroupements d'opérations.

Dans ce contexte, l'industriel a déjà traité l'analyse d'un regroupement d'opérations sur la ligne Habillage Moteur (HAM). Cette application industrielle fait l'objet de la première étude de cas présentée dans ce chapitre. L'objectif est donc de comparer les résultats obtenus en appliquant la méthodologie et ceux précédemment obtenus par l'industriel.

La deuxième étude de cas porte sur une nouvelle analyse de regroupements d'opérations. Elle met l'accent sur les différentes contraintes qui freinent la mise en place des automatisations.

D'un autre côté, de nombreuses études internes sont menées afin d'améliorer les postes de travail. L'objectif étant d'améliorer les conditions de travail des opérateurs et de réduire la pénibilité des opérations sur les lignes de montage.

La troisième étude de cas s'inscrit dans ce contexte. Elle met en avant la deuxième partie de la méthodologie (Activités A4, A5 et A6).

2. Etude de cas industriel n°1 : Validation de la méthodologie

Cette section présente l'application de la méthodologie sur un cas déjà traité par le métier montage. Dans un premier temps, cette section présente le périmètre de l'étude. Par la suite, elle explique et détaille le déroulement de la méthodologie. Pour finir, elle analyse les résultats obtenus.

2.1. Périmètre de l'étude

L'analyse faite porte sur la ligne Habillage Moteur (HAM). Cette ligne fait partie du flux secondaire. Elle a pour objectif de compléter la préparation des groupes motopropulseur (GMP). La ligne HAM est constituée de plusieurs postes successifs (Figure 22). Les moteurs issus des usines mécaniques sont déposés en début de la ligne sur des platines acheminées par des convoyeurs mécanisés et assemblés avec les boîtes de vitesses. Les lignes HAM connaissent une très grande diversité en terme de moteurs et boîtes de vitesse.

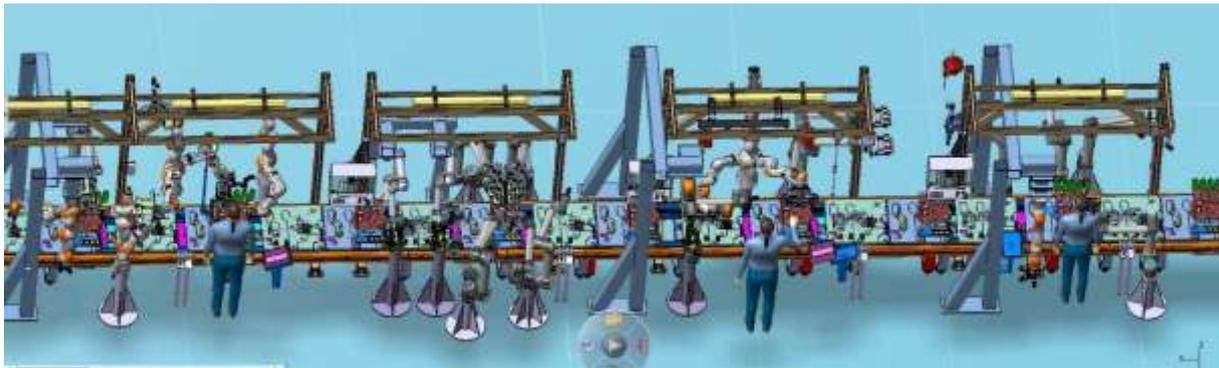


Figure 22 : Représentation d'une ligne HAM [126]

Sur les différents postes de la ligne, les opérateurs habillent le moteur de manière continue au défilé, avec des pièces spécifiques au véhicule avant de le livrer en ligne principale. Cet habillage se fait suivant une gamme d'assemblage qui indique chronologiquement les opérations à effectuer à chaque poste en fonction du type de GMP concerné.

Dans un objectif de gain économique et de rentabilité, l'étude vise à automatiser les vissages présents sur la ligne HAM. Ceci passe par la recherche des regroupements d'opérations. Le choix de ce type d'opérations est piloté par la maturité technologique.

La section suivante détaille le traitement de ce sujet en appliquant la méthodologie développée.

2.2. Application de la méthodologie

2.2.1. A1-A2 : Extraction des gammes et création de la base de données

Ces étapes consistent à extraire toutes les gammes de production (Figure 23). L'objectif est d'avoir l'ensemble des gammes de production avec le numéro de poste ainsi que le code RGPT.

Poste	Num gamme	Désignation	Désignation poste	Code RGPT
2PM0A61D	M**A1Z0EH	"CHARGER MOTEUR SUR MINI-LIGNE"	"STR - DEPOSE MOTEUR + KIT 1 - H1200"	TPP
2PM0A61D	M**A1Z0EM	"LECTURE CONFO TRACA MOTEUR."	"STR - DEPOSE MOTEUR + KIT 1 - H1200"	QCC
2PM0A61D	M**83C0US	"MEP DOSSIER MONTAGE SUR MINI LIGNE"	"STR - DEPOSE MOTEUR + KIT 1 - H1200"	TPP
2PM0A61D	M**CZC0DB	"ORIENTER VOLANT MOT POUR ACC AT6-8"	"STR - DEPOSE MOTEUR + KIT 1 - H1200"	TPP
2PM0A61D	M**CZC0EN	"ENTER VOLANT MOTEUR DW POUR BVA AM"	"STR - DEPOSE MOTEUR + KIT 1 - H1200"	TPP
2PM0A61D	M**B121SH	"RETRAIT SACHET SUR PIQUAGE COLLECTEUR"	"STR - DEPOSE MOTEUR + KIT 1 - H1200"	TPP
2PM0A61D	M**Z9J1Z8	"DEGAGER FSC MOT ET DETECTEUR EAU."	"STR - DEPOSE MOTEUR + KIT 1 - H1200"	TPP
2PM0A61G	M**C2Z0CB	"PICKING BOITE VITESSE MINI LIGNE HAM"	"STR - PICKING BV - H1200"	TPP
2PM0A61G	M**A1Z0EI	"MEP FORME MINI-LIGNE HAM."	"STR - PICKING BV - H1200"	TPP
2PM0A61G	M**CZB0HZ	"REPARER BV MANUELLE AVANT ACCOSTAG"	"STR - PICKING BV - H1200"	TPP
2PM0A61G	M**83F0GS	"MEP CROCHET DEPORTE SUR BVA"	"STR - PICKING BV - H1200"	TPP
2PM0A63G	M**CZB0FW	"VISSER 2 GOUJONS SUR DV BV BE_MC_ML."	"STR - ACCOSTAGE BV H1400"	TVS
2PM0A63G	M**CZB0H7	"EPN+VISSER 2 GOUJON/MOT EB2/EP6 BVM"	"STR - ACCOSTAGE BV H1400"	QCC

Figure 23 : Exemple de gammes extraites avec code RGPT

2.2.1. A3 : Etude des regroupements d'opérations

La première étape consiste à construire une base de données en se basant sur les gammes extraites. Cette base (Figure 24) contient, pour chaque opération de vissage, le numéro de poste, le temps (en min), le nombre de vis/écrous, et les critères de regroupement. Dans ce cas, les critères de regroupement sont le couple, le type de tête, la douille et l'accessibilité. Pour des raisons de confidentialité, le temps n'est pas communiqué.

2.2.2. A6 : Equilibrage de la ligne et automatisation

Pour étudier l'équilibrage de la ligne, les différents postes de travail de la ligne HAM sont schématisés, ainsi que l'emplacement de chaque opération (Figure 25). Les postes qui ont la même couleur correspondent aux vissages qui ont les mêmes caractéristiques.

La ligne HAM est linéaire. Pour que la configuration soit claire, elle est représentée en deux parties.

2PM0A61D	2PM0A61G	2PM0A63G	2PM0A64G	2PM0A65D	2PM0A68G	2PM0A66G	2PM0A68G	2PM0A69G	2PM0A70G	2PM0B72G	2PM0B75G
STR - DEPOSE MOTEUR + KIT 1 - H1200	STR - PICKING BV - H1200	"STR - ACCOSTAGE BV H1400"	SERRAGE BV - H1400	SUPPORT COMPRESSE UR SUPPORT ALTERNATE UR	PALIER TRANSMISSI ON	CHAPE BIELLETTE - H1400	CONVERT+ FAA + IMPACTEUR H1400	SERRAGE CONVERTISE UR -H1400	DEMARREUR	STR - VISS FILTRE + RACCORD RAS	"CABLE POSITIF - H0700"
2PM0B77G	2PM0B78G	2PM0B79G	2PM0B80G	2PM0B82G	2PM0B84G	2PM0C86G	2PM0C87G	2PM0C88G	2PM0C91G	2PM0C92G	2PM0C94D
ALTERNATE UR	MEP PRECATA - H0700	MEP + FIX PRECATA - H0700	SUPPORT CIRCUIT UREE + CAPTEUR OXYGENE	ARRET GAINÉ + COMELEC	COMPRESSE UR	CABLE NEG	SMIG	GALET TENDEUR DYNAMIQUE	ECRAN THERMIQUE - H0700	DOSEUR	PQG ADA - CTRL HAM - H0700

Figure 25 : Configuration initiale de la ligne HAM

En respectant les contraintes de chronologie des opérations, et afin de réaliser les regroupements voulus :

- Il est possible de conserver le poste du support compresseur et support alternateur et le rendre automatisé pour faire les différents vissages (1^{er} regroupement).
- Il faut créer un poste automatisé entre le poste de l'écran thermique et le poste du doseur pour faire les vissages du câble négatif et du galet tendeur dynamique (2^{ème} regroupement).
- Il faut créer un poste automatisé en fin de ligne avant le poste PQG (contrôle qualité) pour faire les vissages du palier transmission, de l'alternateur, et du SMIG (3^{ème} regroupement).

La Figure 26 représente la configuration de la ligne de production en se basant sur les résultats obtenus après application de la méthodologie.

2PM0A61D	2PM0A61G	2PM0A63G	2PM0A64G	Poste automatisé n° 1	2PM0A66G	2PM0A68G	2PM0A69G	2PM0A70G	2PM0B72G	
STR - DEPOSE MOTEUR + KIT 1 - H1200	STR - PICKING BV - H1200	"STR - ACCOSTAGE BV H1400"	SERRAGE BV - H1400		CHAPE BIELLETTE - H1400	CONVERT+ FAA + IMPACTEUR - H1400	SERRAGE CONVERTIS EUR -H1400	DEMARREUR	STR - VISS FILTRE + RACCORD RAS	
2PM0B75G	2PM0B78G	2PM0B79G	2PM0B80G	2PM0B82G	2PM0B84G	2PM0C91G	Poste automatisé n° 2	2PM0C92G	Poste automatisé n° 3	2PM0C94D
"CABLE POSITIF - H0700"	MEP PRECATA - H0700	MEP + FIX PRECATA - H0700	SUPPORT CIRCUIT UREE + CAPTEUR OXYGENE	ARRET GAINÉ + COMELEC	COMPRESSE UR	ECRAN THERMIQUE - H0700		DOSEUR		PQG ADA - CTRL HAM - H0700

Figure 26 : Configuration de la ligne de production basée sur les résultats obtenus en appliquant la méthodologie

2.3. Analyse et comparaison des résultats obtenus par la méthodologie et par le métier montage

La Figure 27 présente la configuration de la ligne de production suite à l'étude réalisée par le métier montage. Le résultat obtenu consiste à regrouper et automatiser les opérations de vissage du SMIG et du palier de transmission.

2PM0A61D	2PM0A61G	2PM0A63G	2PM0A64G	2PM0A65D	2PM0A65G	2PM0A66G	2PM0A68G	2PM0A69G	2PM0A70G	2PM0B72G	2PM0B75G
STR - DEPOSE MOTEUR + KIT 1 - H1200	STR - PICKINGO BV H1200	*STR - ACCOSTAGE BV H1400*	SERRAGE BV - H1400	SUPPORT COMPRESSE UR SUPPORT ALTERNATE UR	PALIER TRANSMISSI ON	CHAPE BIELLETTA - H1400	CONVERT+ FAA + IMPACTEUR H1400	SERRAGE CONVERTISE UR - H1400	DEMARREU R	STR - VISS FILTRE + RACCORD RAS	*CABLE POSITIF - H0700*
2PM0B77G	2PM0B78G	2PM0B79G	2PM0B80G	2PM0B82G	2PM0B84G	2PM0C36G	2PM0C91G	2PM0C92G		2PM0C94D	
ALTERNATE UR	MEP PRECATA - H0700	MEP + FIX PRECATA - H0700	SUPPORT CIRCUIT UREE + CAPTEUR OXYGENE	ARRET GAINE + COMOLEC	COMPRESSE UR	CABLE NEG	ECRAN THERMIQUE - H0700	DOSEUR	Poste automatisé	PQG ADA - CTRL HAM - H0700	

Figure 27 : Configuration de la ligne de production basée sur les résultats obtenus par l'industriel

Le Tableau 20 résume les regroupements d'opérations obtenus à travers l'application de la méthodologie et ceux obtenus à travers l'étude menée par le métier montage.

Tableau 20 : Comparaison des résultats obtenus par la méthodologie et par le métier montage

Résultats obtenus par la méthodologie	Résultats obtenus par le métier montage
Reg1 : Regroupement des vissages du support alternateur et support compresseur	Regroupement des vissages palier de transmission et du SMIG
Reg2 : Regroupement du vissage du câble négatif et du galet tendeur dynamique	
Reg3 : Regroupement des vissages du palier de transmission, de l'alternateur et du SMIG	

Compte tenu de l'architecture de l'usine et du principe du Stop and Go, le regroupement d'opérations obtenu par le métier montage est effectué en fin de ligne, ce qui explique la non présence du Reg1 et Reg2. Ce choix est conduit par la maturité des technologies. En effet, les opérations de vissage ne peuvent pas être faites d'une manière continue, au défilé. Ce qui impose d'avoir des automatisations en fin de ligne.

L'analyse de Reg3 et du regroupement obtenu par le métier montage montre que la seule différence à noter est que, en plus des vissages du palier de transmission et du SMIG, la méthodologie propose le vissage de l'alternateur. Ce dernier n'a pas été pris en compte par l'industriel puisqu'il nécessite un couple de vissage différent des deux autres pièces.

La méthodologie a pris en compte une plage de couple de vissage pour étudier les regroupements d'opérations. Or, à l'usine de Sochaux, la VEA (Visseuse Electrique Asservie) ne peut pas réaliser des vissages ayant un couple compris entre 25 et 60 Nm. C'est pour cette raison que le métier montage s'est contenté d'étudier des vissages soumis au même couple.

L'étude menée montre que la méthodologie permet d'analyser l'ensemble des données d'entrée (gammas d'assemblage, conception produit ...). A travers des critères de regroupement bien définis, elle permet d'émettre des propositions de regroupements d'opérations.

Le programme VBA développé permet de visualiser les contraintes de précédence. Il facilite ainsi la recherche des regroupements. Néanmoins, il ne traite pas les critères de regroupements, et donc ne permet pas de distinguer réellement les opérations qui ont les mêmes caractéristiques. Cette limite impose que les résultats soient traités par un expert pour identifier ces opérations.

Cette méthode permet de structurer le processus de prise de décision. Différentes étapes peuvent être automatisées comme l'extraction des données et l'analyse multicritères, conduisant ainsi à un gain significatif du temps d'analyse. Par exemple, pour la recherche du regroupement d'opérations dans la

ligne HAM, l'industriel a dû analyser 35 opérations de vissage pour en déduire celles qu'il peut regrouper dans le même poste. Cependant, en adoptant le programme développé, il est possible d'analyser rapidement les contraintes de précédence et d'afficher les différentes opérations qui ont le même niveau d'antériorité et donc, celles qu'il est possible de regrouper.

3. Etude de cas industriel n°2 : Analyse des regroupements d'opérations

Cette section présente l'application de la méthodologie sur la ligne principale de l'usine de Rennes dont la configuration est proche de la vision cible d'architecture de ligne.

3.1. Périmètre de l'étude

Le contexte de cette étude est le même que celui de l'étude précédente. Ceci-dit, l'objectif est toujours de chercher des regroupements d'opérations afin d'améliorer l'efficacité et la performance des lignes de production. Le gain de DST reste primordial pour atteindre cet objectif.

Avant d'entamer l'application de la méthodologie, il faut identifier le type d'opérations à traiter. Les critères retenus sont : type d'opération dans chaque zone sur la ligne de production, le temps ainsi que la maturité des technologies pour mettre en œuvre l'automatisation. Le Tableau 21 présente les différentes données de cette analyse.

Tableau 21 : Extrait des différents types d'opérations analysées

Zone_RGPT	Intitulé RGPT	Composants	Temps (en min)	Niveau maturité Automatisation
PP1_TPP	Placer pièce.	Garniture, Porte, Adhésifs, Joints, Faisceaux ...	Non Communiqué	4
HC1_TPP	Placer pièce.	Ceinture, Tuyaux, Adhésifs, Pastilles, Airbag, Joints ...		4
HC2_TPP	Placer pièce.	Adhésifs, Gache porte, Câbles, Attache sangle, Poignets ...		4
MV3_TVS	Visser, Serrer.	Pare choc, Enjoliveurs, Projecteurs ...		8
MV2_TVS	Visser, Serrer.	Absorbeur, Supports, Goulotte de remplissage ...		8
MV3_TPP	Placer pièce.	Pare boue, Pare choc, Console, Grille ...		4

Avec :

- **PP** : Préparation Portes
- **HC** : Habillage Caisse
- **MV** : Montage Véhicule

La Figure 28 présente la configuration du flux principal. Il s'agit de deux brins de ligne pour l'habillage caisse et quatre brins de ligne pour le montage véhicule. A la fin de MV4, le véhicule part en bout d'usine où tous les réglages et contrôles finaux sont effectués.

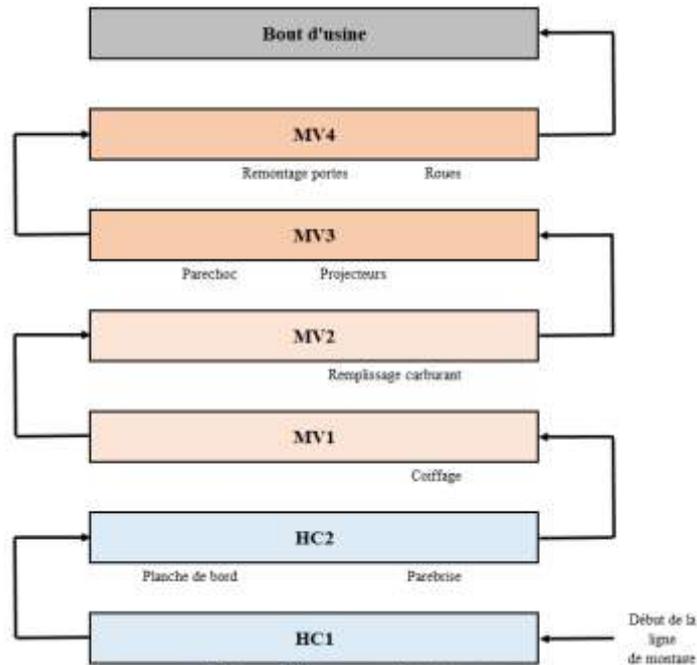


Figure 28 : Configuration du flux principal

Les opérations de placement de pièces dans les trois premières zones décrites dans le Tableau 21 concernent majoritairement des pièces qui sont souples, ou qui nécessitent la dextérité des opérateurs. C'est pour cette raison que le niveau de maturité est faible. Ainsi le choix est porté sur les opérations de vissage présentes sur les deux brins de ligne MV2 et MV3.

3.2. Application de la méthodologie

3.2.1. A1-A2-A3 : Extraction des gammes et création de la base de données

La première étape est d'extraire toutes les gammes et de renseigner l'ensemble des critères de regroupements (Figure 29).

N° Poste	Nom de la gamme	Description de la gamme	Travail	Position	Pinces	Temps	Doigts	Couple	Accessibilité
2MV2A955	6M*HA18109	FIX 1 ECRON INF - PROTECTEUR COURROIE		Devant	ECROU H D 10	11	10	4	Out
2MV2A1480	6M*HA14009	MTGE PRGTEC SUP FILTRE GO DW18F		Avant	V'S H EMB MEX100 L20	21	10	0	Out
2MV2A980	6M*HA98199	MONTRE COIL ENTREE AIR SUR MOTEUR EP		Avant	V'S REUTILISATION DY	21	10	0	Non
2MV2A1110	6M*HA98110	MONTRE RACCORD ENTRE TURBO DV'S		Devant	V'S H RCL ENDOC LS M	21	10	0	Non
2MV2A970	6M*HA98118	MONTRE COIL ENTREE AIR SUR MOTEUR		Avant	V'S H RCL ENDOC LS M	21	10	0	Non
2MV2A145	6M*HA98120	SERRAGE V'S DE MAINTIEN DEFLECTEUR XUH		Avant	V'S K HR EMB MEX100	21	10	0	Out
2MV2A955	6M*HA98120	PREPARER CALCULATEUR INJECTION CMM		Devant	ECROU K H EMB NETT M	21	10	0	Out
2MV2A980	6M*HA98120	VISSER ENSEMBLE CADRE SUPPORT BATTERIE		Avant	V'S H RCN MEX100 L20	21	10	0	Non
2MV2A110	6M*HA98120	MONTRE SUPPORT CADRE SUPPORT BATTERIE		Avant	V'S H RPH MEX100 L2	21	10	0	Out
2MV2A110	6M*HA98120	VISSER CALCULATEUR MOT SUPPORT BATTERIE		Avant	ECROU K H EMB NETT M	21	10	0	Out
2MV2A980	6M*HA98120	SERRER CAPTEUR FAP/BERCEAU		Devant	ECROU H D 10	21	10	0	Out
2MV2A110	6M*HB1121	VISSER 2 PLOTS SUR TRAVERSE SUPERIEURE		Avant	ECROU H EMB MEX100 A	21	10	0	Out
2MV2A110	6M*HB1121	VISSER 2 PLOTS SUR TRAVERSE SUPERIEURE		Avant	ECROU H EMB MEX100 A	21	10	0	Out
2MV2A955	6M*HB1121	MTGE TUYAUX EAU CHARGEUR BATTERIE G	Non coté	Devant	ECROU K H RCL PRETN	21	10	4	Non
2MV2A955	6M*HB1121	MTGE TUYAUX BT SOUS PLANCHER G	Non coté	Devant	ECROU K H RCL PRETN	21	10	4	Non
2MV2A955	6M*HB1121	SERRER ECRAN SILENCIEUX AIR DIESEL DW		Devant	ECROU H EMB MEX100 T	21	10	4	Out
2MV2A955	6M*HB1121	VISSER 4 FIXATIONS ECRANS TUNNEL		Devant	V'S HR EMB21 MEX121	21	13	4	Out
2MV2A955	6M*HB1121	VISSER 4 FIXATIONS ECRANS TUNNEL		Devant	ECROU H EMB MEX100 T	21	10	4	Out
2MV2A955	6M*HB1121	SERRER SUSPENTE ECHAPPEMENT BERCEAU G		Devant	ECROU H D 10	21	10	0	Out
2MV2A955	6M*HB1121	SERRER ECHOUX ECRANS THERMIQUE RESERVEOIR		Devant	ECROU H EMB MEX100 T	21	10	4	Non
2MV2A955	6M*HB1121	SERRER SUSPENTE ECHAPPEMENT BERCEAU D		Devant	ECROU H D 10	21	10	0	Out
2MV2A955	6M*HB1121	SERRER SUSPENTE INTER ECHAPP DANS TUNNEL		Devant	V'S H RPH MEX100 L2	21	10	0	Out
2MV2A955	6M*HB1121	SERRER SUSPENTE INTER ECHAPP DANS TUNNEL		Devant	V'S H RPH MEX100 L2	21	10	0	Out
2MV2A955	6M*HB1121	SERRER SUSPENTE INTER ECHAPP DANS TUNNEL		Devant	V'S H RPH MEX100 L2	21	10	0	Out
2MV2A955	6M*HB1121	SERRER SUSPENTE INTER ECHAPP DANS TUNNEL		Devant	V'S H RPH MEX100 L2	21	10	0	Out
2MV2A955	6M*HB1121	VISSER ECRAN TUNNEL SANS SUSPENTE INTERM		Devant	V'S H RPH MEX100 L2	21	10	0	Out
2MV2A955	6M*HB1121	VISSER ECRAN TUNNEL SANS SUSPENTE INTERM		Devant	V'S H RPH MEX100 L2	21	10	0	Out
2MV2A955	6M*HB1121	VISSER ECRAN TUNNEL SANS SUSPENTE INTERM		Devant	V'S H RPH MEX100 L2	21	10	0	Out

Figure 29 : Extrait de la base de données opérations, temps, critères de regroupement

3.3. A3 : Etude des regroupements

En appliquant les étapes de l'activité A3, il est possible d'identifier les opérations qu'il faut étudier en priorité. Il s'agit des opérations de vissage accessibles à l'avant et à l'arrière du véhicule, ayant une tête Hexagonale et une douille 10mm, et qui sont soumises à un couple de 4 Nm.

Les contraintes relatives à la chronologie des opérations sont étudiées. Une matrice de précedence est tracée (Annexe 13). En utilisant le programme VBA développé, un regroupement d'opérations de vissage est identifié (Annexe 14).

Le regroupement obtenu pour les opérations de vissage ayant une vis de tête H, de douille 10mm et soumis à un couple de 4 NM concerne les pièces suivantes : Absorbeur inférieur parechoc avant, Support central parechoc arrière, Grille d'auvent, Goulotte de remplissage et Projecteurs.

La Figure 30 présente la configuration actuelle des brins de ligne MV2 et MV3. Elle met en évidence les pièces concernées par le regroupement ainsi que les contraintes de précedence qui y sont liées :

- L'armature doit être montée avant les projecteurs.
- Le collecteur doit être monté avant la grille d'auvent
- La goulotte doit être montée avant le remplissage

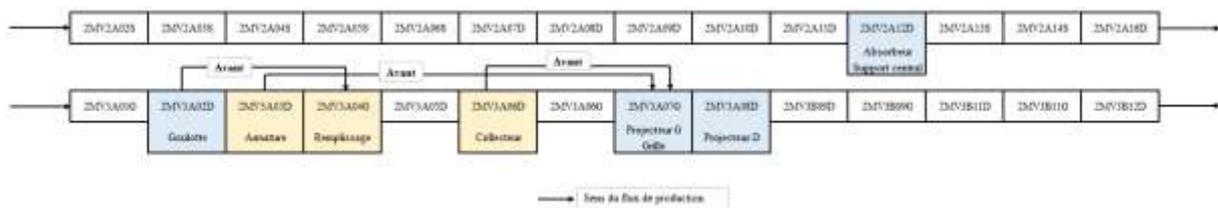


Figure 30 : Configuration actuelle des brins de ligne MV2 et MV3

Après discussions avec les industriels de Stellantis, il s'est avéré que la goulotte de remplissage ne peut pas être regroupée avec les dites-pièces. En effet, pour réaliser le regroupement proposé, il faut déplacer la station de remplissage, ceci impactera fortement la rentabilité de l'automatisation.

Les opérations de vissage de la grille d'auvent ne peuvent pas être regroupées. Ceci s'explique par le changement de la définition du produit. Le vissage sera remplacé par un clippage.

Le Tableau 22 résume le regroupement d'opérations définitif. Il s'agit des opérations de vissage de 3 composants : absorbeur inférieur du pare choc et projecteurs à l'avant du véhicule, ainsi que le support central du pare choc arrière. Pour bien réaliser le regroupement de vissage, il a été nécessaire de valider le pré maintien des pièces sur terrain. Ce dernier critère n'a pas été pris en compte précédemment dans la méthodologie pour la simplifier et éviter de mettre en place plusieurs contraintes qui vont rendre la recherche des regroupements difficiles.

Tableau 22 : Regroupements d'opérations identifiés en appliquant l'activité A3

Zone	Composants	Nombre vis/écrou automatisables	Commentaires
MV2	Absorbeur inférieur Pare choc avant	6 vis (3 de chaque côté)	Pré maintien validé Longueur de vis = 25 mm
	Support central Pare choc arrière	5 écrous	Utilisation d'un gabarit pour assurer le pré maintien
MV3	Projecteurs	6 vis (3 de chaque côté)	Pré maintien validé Longueur de vis = 30 mm

En étudiant d'autres modèles de véhicules, il est apparu que le regroupement trouvé est applicable. Néanmoins, la définition du produit diffère. Par exemple, pour les futurs véhicules, le vissage du support central pare choc arrière ne nécessite que 3 écrous au lieu de 5. Ceci impacte l'étude de la rentabilité. Ajoutons à ceci, l'utilisation du gabarit pour pré maintenir le support central parechoc arrière et la densité des opérateurs sur cette zone qui rendent l'automatisation complexe.

Dans une démarche de transversalisation et de recherche d'un contexte plus favorable à l'automatisation, l'activité A3.4 a été appliquée. Elle consiste à analyser le regroupement d'opérations sur d'autres sites de production et/ou proposer des évolutions produit ou process. Ainsi, le regroupement d'opérations a été étudié sur l'usine de Poissy. Les produits n'ont pas du tout la même définition. Néanmoins, en analysant les gammes de cette usine, un regroupement d'opérations s'est avéré applicable en améliorant la conception de la poutre avant (Figure 31).

Modèle véhicule	Pièce	N° Gamme	N° Poste	Vis/écrou	Nb vis/écrou	Tête	Douille	Couple	Longueur
D34	Absorbeur inf PC D	5M*DK3D0GA	1MV2B25G	Vis	2	H	13	20	20
	Absorbeur inf PC G	5M*DK3D0GB		Vis	2	H	13	20	20
	Poutre AV côté D	5M*DR1A1XM	1MV2A07G	Vis	3	H	13	20	25
	Poutre AV côté G	5M*DR1A1XM		Vis	3	H	13	20	25

Modèle véhicule	Pièce	N° Gamme	N° Poste	Vis/écrou	Nb vis/écrou	Tête	Douille	Couple	Longueur
P2QO	Absorbeur inf PC D	5M*QR1A2TE	1MV2B25G	Vis	2	H	13	20	20
	Absorbeur inf PC G	5M*QR1A2TE		Vis	2	H	13	20	20
	Poutre AV côté D	5M*DR1A1XM	1MV2A07G	Vis	3	H	13	20	25
	Poutre AV côté G	5M*DR1A1XM		Vis	3	H	13	20	25

Figure 31 : Regroupement d'opérations proposé pour le site de Poissy

3.4. Analyse des résultats

La méthodologie a été appliquée sur les brins de ligne MV2 et MV3 de l'usine de Rennes. Plusieurs regroupements d'opérations ont été proposés.

Toutefois, les propositions n'ont pas été retenues pour les causes suivantes : changement de définitions des futurs produits, la rentabilité de l'automatisation ou encore sa complexité due à la densité des opérateurs sur la zone.

4. Etude de cas industriel n°3 : Opérations critiques en ergonomie

L'un des objectifs de la méthodologie est d'analyser les opérations critiques en ergonomie. Une étude industrielle traitant cet axe a été réalisée. Cette section explique le périmètre de l'étude. Par la suite,

elle présente les différentes propositions techniques d'automatisation. Ces dernières sont évaluées afin de permettre de choisir une qui satisfait le plus les exigences du métier montage.

4.1. Périmètre de l'étude

Des réunions avec l'ergonome de l'usine de Rennes ont été initiées afin de lister les différentes opérations qui nécessitent une amélioration. Cette sélection est faite en se basant sur la méthode METEO (Méthode d'Évaluation du Travail Et de l'Organisation) appliquée par le métier montage. Cette méthode, propre à l'industriel, permet d'identifier les postes de travail ergonomiquement pénibles en évaluant l'organisation et les aspects physiques (énergétiques et biomécaniques) qui y sont associés. Cet outil restant interne à Stellantis, le sujet de thèse a été traité, en parallèle, avec la méthode RULA pour être communicable.

26 gammes d'assemblage sont étudiées. La durée ainsi que la faisabilité technique de l'automatisation sont analysées afin de déceler les opérations qui feront l'objet de l'étude.

Le Tableau 23 présente un exemple d'opérations analysées. Il liste les facteurs qui font que les opérations sont pénibles en analysant la faisabilité technique de l'automatisation. La durée des opérations a été également étudiée. Pour des raisons de confidentialité, la durée n'est pas présentée dans le Tableau 23.

Tableau 23 : Exemple d'opérations critiques en ergonomie

N° Poste	N° Gamme	Désignation de la Gamme	Causes racines	Faisabilité pour automatiser ?
2HC1B06A	6M*HZ9L3LE	Approvisionnement du faisceau principal + Mise en place sur tablier	Poids des faisceaux > 10 kg Difficulté d'orientation des faisceaux	Non
2HC1B06A	6M*HZ9L3LU	Clipper la goulotte du faisceau	Effort pour clipper la goulotte au bon endroit	Non
2HC1D11D	6M*HK7D0MU	Prise et dépose du TOP	Défaut Manipulateur Environnement défavorable (Passage entre les kits) Bras en l'air Retrait de l'outil de centrage	Oui

En se basant sur l'analyse faite, le choix est porté sur les opérations de la prise et la dépose du toit ouvrant panoramique (TOP). En appliquant l'activité A5 de la méthodologie, il s'est avéré qu'il est possible de regrouper les opérations de prise et de dépose avec celles du vissage du TOP.

4.2. Recherche de solutions

Cette section présente les différentes solutions conçues pour automatiser les opérations de prise, dépose et vissage du TOP. Mais avant, son processus d'assemblage et ses caractéristiques techniques sont détaillés.

4.2.1. Description du montage du TOP

L'usine de Rennes connaît deux diversités de TOP de taille différente mais ayant le même nombre d'écrous. La Figure 32 montre le schéma de fixation du TOP.

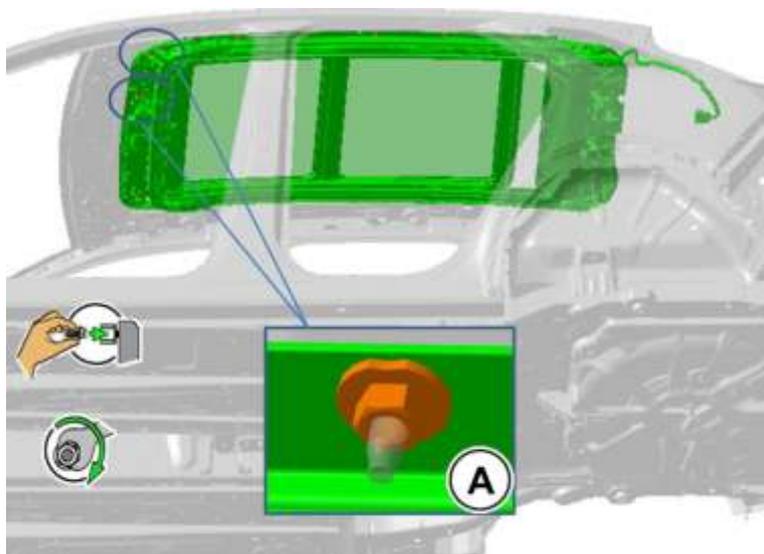


Figure 32 : Schéma de fixation du TOP extrait d'une gamme de montage de Stellantis

Les différentes opérations de montage du toit ouvrant panoramique sont complètement manuelles. Les opérateurs prennent le TOP de la zone de stockage à l'aide d'un préhenseur. Ils le déposent sur un manipulateur qui les aide à l'introduire dans le véhicule par le biais du parebrise, et ensuite, ils font le vissage de 18 écrous pour fixer le TOP dans le véhicule (Tableau 24).

Tableau 24 : Description du montage du TOP

N° Opération	Désignation de l'opération
O1	Prendre le TOP avec le préhenseur
O2	Se déplacer et déposer le TOP sur manipulateur
O3	Dégager préhenseur
O4	Se déplacer, introduire le TOP et serrer 1 écrou
O5	Serrer 1 écrou
O6	Sortir le manipulateur du véhicule et le dégager
O7	Serrer 2 écrous partie AVD de la caisse
O8	Serrer 2 écrous partie AVG de la caisse
O9	Serrer 4 écrous partie côté droit de la caisse
O10	Serrer 4 écrous partie côté droit de la caisse
O11	Serrer 2 écrous partie ARD de la caisse
O12	Serrer 2 écrous partie ARG de la caisse

La Figure 33 schématise le processus du montage du TOP, la configuration de la ligne ainsi que les déplacements et positions des opérateurs.

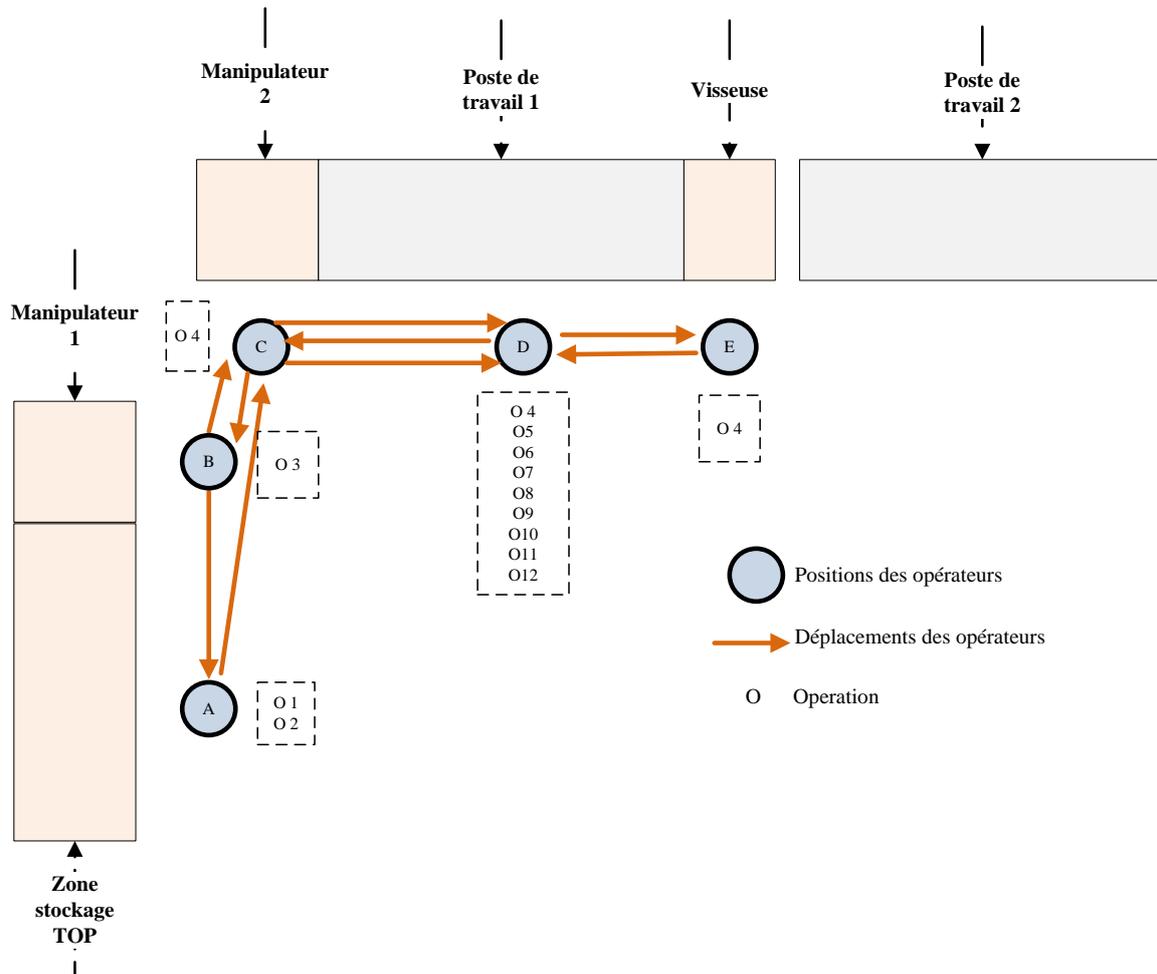


Figure 33 : Schématisation du processus du montage du TOP

4.2.2. Conception d'une solution technique d'automatisation

Deux scénarios d'automatisation sont possibles. Le premier est d'automatiser l'ensemble des opérations (LoA = 100%) et le deuxième est de n'automatiser que les opérations les plus pénibles à savoir la prise et la dépose du TOP dans le véhicule (LoA = 68%).

Vu la présence des skillets (Figure 34) et l'envie de Stellantis de faire les opérations au défilé, il faut opter pour des robots bras en l'air sur des axes linéaires pour suivre le mouvement du véhicule.

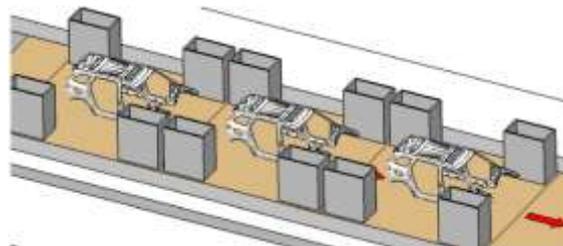


Figure 34 : Présentation des skillets [19]

Les temps de cycle sont étudiés pour identifier le nombre de robots qui peuvent réaliser toutes les opérations. Ainsi deux solutions techniques se présentent :

- LoA = 100 % → Un préhenseur pour prendre le TOP de la zone de stockage, un robot bras en l'air pour introduire le TOP dans le véhicule, et des robots pour visser les écrous.
- LoA = 68% → Un préhenseur pour prendre le TOP de la zone de stockage, un robot bras en l'air pour introduire le TOP dans le véhicule, et un opérateur pour visser les écrous.

Deux fournisseurs ont été sollicités afin de participer à la conception d'une solution technique pour automatiser le montage du TOP. La Figure 35 présente la solution conçue avec le fournisseur et partenaire (F1) qui consiste à avoir un préhenseur pour la prise du TOP de la zone de stockage et sa dépose sur une table de centrage. Ensuite, un robot introduit le TOP dans le véhicule et fait le vissage de deux écrous pour assurer le pré maintien, et finalement, pour un LoA = 100%, avoir un robot de chaque côté pour le vissage des écrous.

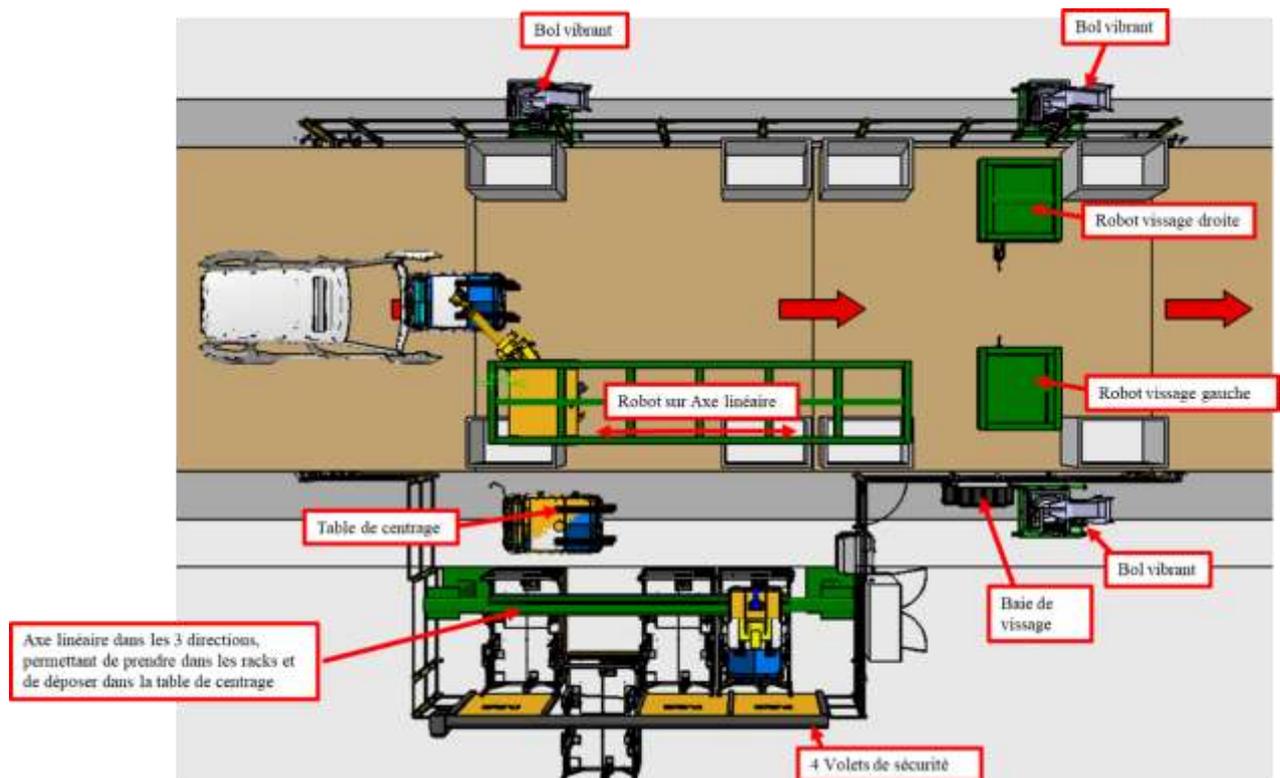


Figure 35 : Solution conçue avec le fournisseur (F1)

La Figure 36 présente la deuxième solution qui a été conçue avec le fournisseur et partenaire (F2) qui consiste à avoir un préhenseur pour la prise du TOP de la zone de stockage. Sur le même poste, un robot introduira le TOP dans le véhicule et 4 robots (2 de chaque côtés) feront le vissage des 18 écrous (le cas où LoA = 100%). Dans l'autre cas, le robot introduira le TOP dans le véhicule et 2 robots (1 de chaque côté) feront le vissage de quelques écrous pour le pré maintien.

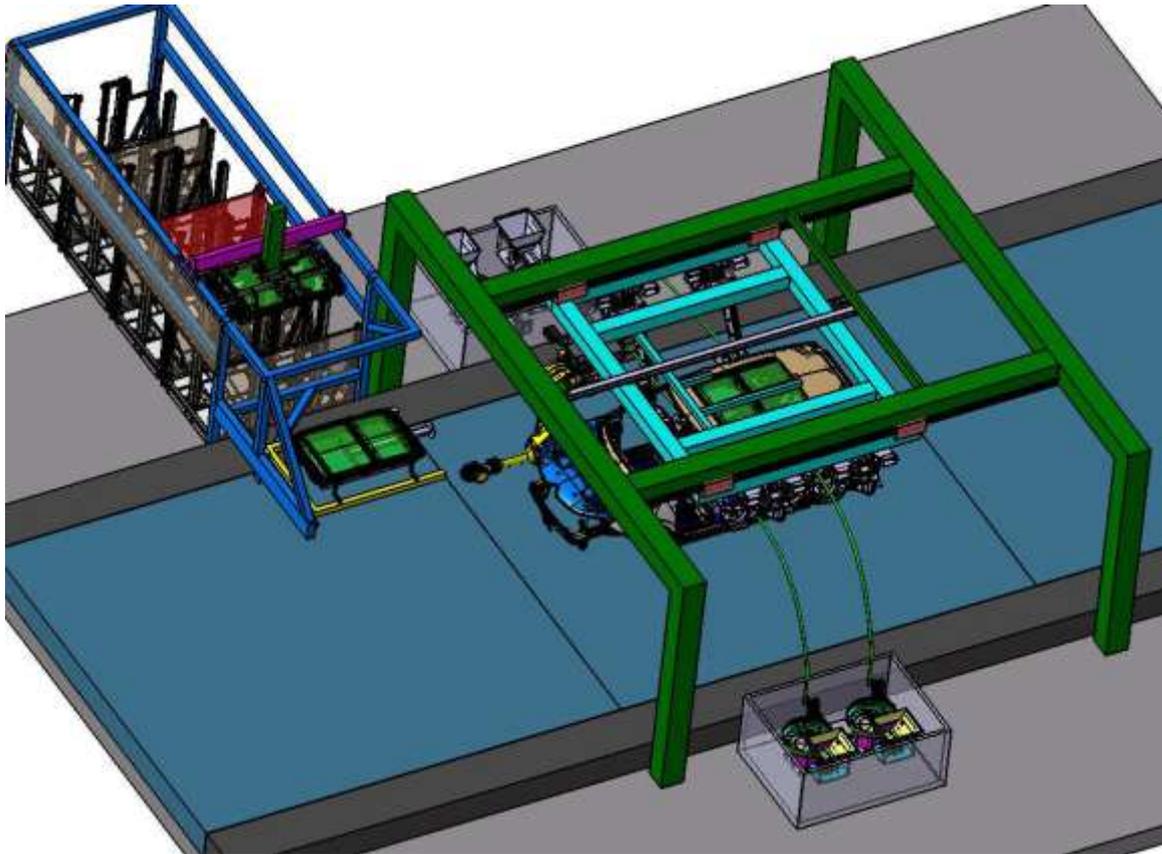


Figure 36 : Solution conçue avec le fournisseur (F2)

La suite du manuscrit considère que :

- Sol 1 représente la solution conçue avec le fournisseur (F1) dans le cas de LoA = 100%
- Sol 2 représente la solution conçue avec le fournisseur (F1) dans le cas de LoA = 68%
- Sol 3 représente la solution conçue avec le fournisseur (F2) dans le cas de LoA = 100%
- Sol 4 représente la solution conçue avec le fournisseur (F2) dans le cas de LoA = 68%

Quatre solutions d'automatisation sont identifiées. Pour choisir celle qui répond au mieux à la vision du métier montage, il est impératif de quantifier les critères d'évaluation et d'appliquer la méthode AHP.

4.3. Estimation des critères

Les différents critères permettant la prise de décision sont quantifiés moyennant les modèles de calcul présentés dans le chapitre 3.

4.3.1. Quantification des coûts

Pour simplifier les coûts, il a été décidé de ne considérer que les coûts relatifs aux investissements et à la main d'œuvre. En effet, ces deux composants sont généralement les plus importants.

- Salaire des opérateurs

Sol 1 et Sol 3 présentent un LoA = 100% donc :

$$C_{opé} = 0 \text{ €}$$

Sol 2 et Sol 4 : le salaire des opérateurs est calculé en utilisant l'équation (2) et (3) :

$$C_{op\acute{e}} = 45000 \times 2 \times (1 - 0.68) = 28\ 800 \text{ €}$$

- Investissements

Les investissements nécessaires sont calculés en appliquant l'équation (10). Le Tableau 25 présente les coûts d'investissement pour chaque solution technique d'automatisation.

Tableau 25 : Coûts des investissements pour chaque solution d'automatisation

Solution	Investissements
Sol 1	1 090 400 €
Sol 2	935 400 €
Sol 3	969 000 €
Sol 4	765 000 €

Ainsi les coûts pour chacune des solutions d'automatisation est la somme des coûts relatifs aux salaires des opérateurs et aux investissements :

$$C_{Sol\ 1} = 1\ 090\ 400 \text{ €}$$

$$C_{Sol\ 2} = 964\ 200 \text{ €}$$

$$C_{Sol\ 3} = 969\ 000 \text{ €}$$

$$C_{Sol\ 4} = 793\ 800 \text{ €}$$

4.3.2. Quantification de l'ergonomie

Sol 1 et Sol 3 (respectivement Sol 2 et Sol 4) conduisent au même niveau d'ergonomie. Ce niveau est quantifié en appliquant la méthode RULA.

- Sol 1 et Sol 3

Les deux solutions concernent un poste de travail totalement automatisé et sécurisé. Donc, les conditions de travail sont acceptables pour les opérateurs. Ainsi :

$$Score_{Sol\ 1} = Score_{Sol\ 3} = 1$$

- Sol 2 et Sol 4

En analysant le poste de travail, et en se basant sur l'Annexe 6 et la Figure 19, le score final pour les solution 2 et 4 est calculé. La Figure 37 résume les calculs faits :

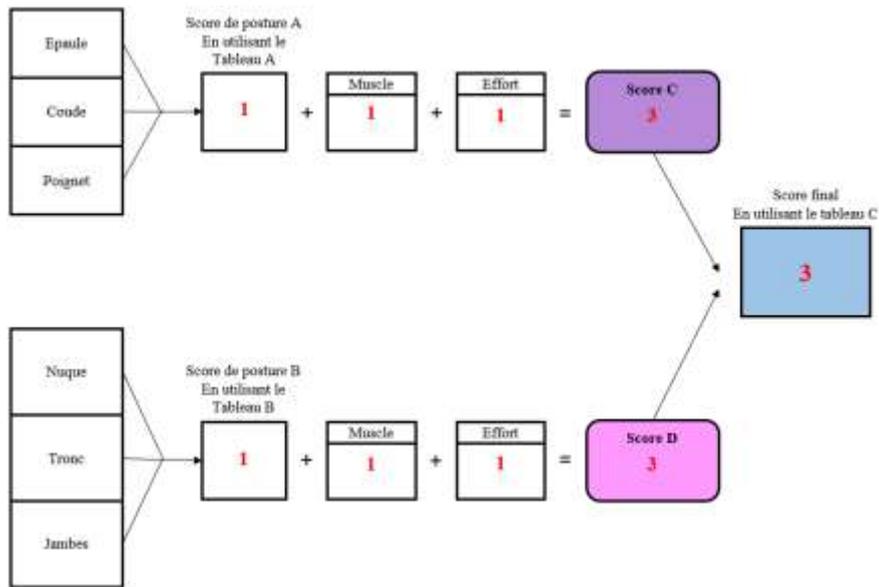


Figure 37 : Calcul des scores des solutions 2 et 4 en appliquant la méthode RULA

Ainsi

$$Score_{Sol\ 2} = Score_{Sol\ 4} = 3$$

4.3.3. Quantification de la flexibilité

Tout d'abord, la méthode AHP est appliquée pour calculer les poids des paramètres variabilité et volume. L'Annexe 15 présente les calculs effectués.

Ainsi le poids du paramètre volume est 0,87 et le poids du paramètre variabilité est 0,13. La prochaine étape est d'évaluer chaque solution en se basant sur le Tableau 16 et l'équation (15) du chapitre 3.

Le Tableau 26 présente le score final obtenu pour chacune des solutions conçues avec les fournisseurs. Le détail des calculs est fourni dans l'Annexe 16.

Tableau 26 : Evaluation de la flexibilité des solutions techniques d'automatisation

Solution	Score final
Sol 1	3,20
Sol 2	2,91
Sol 3	2,87
Sol 4	2,58

4.3.4. Quantification de la maturité de l'automatisation

Les différentes technologies proposées par les fournisseurs sont évaluées moyennant l'expérience et le savoir-faire de Stellantis. Le Tableau 27 présente l'évaluation de chacune de ces technologies.

Tableau 27 : Evaluation de la maturité des technologies proposées par les deux fournisseurs

Fournisseur	Solutions	Technologies	TRL
F1	Sol 1 et Sol 2	Prise du TOP du conditionnement	9
	Sol 1 et Sol 2	Introduction du TOP dans le véhicule et Vissages pour le pré maintien	6
	Sol 1	Vissage au défilé	6
F2	Sol 3 et Sol 4	Prise du TOP du conditionnement	9
	Sol 3 et Sol 4	Introduction du TOP dans le véhicule	8
	Sol 3	Vissage au défilé	6

En appliquant l'équation (16), les différents niveaux de maturité de chacune des solutions sont calculés.

$$TRL_{Sol 1} = \frac{9+6+6}{3} = 0,78$$

$$TRL_{Sol 2} = \frac{9+6}{2} = 0,83$$

$$TRL_{Sol 3} = \frac{9+8+6}{3} = 0,86$$

$$TRL_{Sol 4} = \frac{9+8}{2} = 0,94$$

Une estimation de l'ensemble des critères est faite. La prochaine étape consiste à appliquer la méthode AHP afin de choisir la solution la plus robuste. Ainsi la section suivante a pour but d'évaluer les différentes solutions conçues avec les fournisseurs.

4.4. Application de la méthode AHP

La méthode AHP est appliquée. Les détails des calculs sont présentés dans l'Annexe 17.

Dans un premier temps, les solutions ont été évaluées pour chaque critère. L'objectif est de calculer les poids des solutions. Ces derniers sont utilisés lors de la dernière étape qui est d'évaluer les solutions en se basant sur l'ensemble des critères.

Ainsi, le score final de chaque solution est obtenu en multipliant les poids des solutions par les poids des critères (Tableau 28).

Tableau 28 : Méthode AHP appliquée pour le choix d'une solution d'automatisation

Critères de sélection	Sol 1	Sol 2	Sol 3	Sol 4	Poids critères
Coût	0,05	0,16	0,10	0,69	0,46
Ergonomie	0,42	0,08	0,42	0,08	0,14
Maturité de l'automatisation	0,07	0,18	0,32	0,44	0,30
Flexibilité	0,05	0,14	0,19	0,62	0,11
Score	0,10	0,16	0,22	0,52	

Les résultats montrent que la solution 4 a le meilleur score. Ainsi, c'est cette solution qui respecte le mieux les exigences du métier montage.

En analysant l'aspect rentabilité, il s'est avéré que la solution 4 n'est pas tout à fait rentable. Les prochains travaux doivent être axés sur l'élément coût pour essayer de le réduire.

5. Conclusion

A travers trois cas d'études, ce chapitre illustre les propositions faites concernant les regroupements d'opérations, l'étude des opérations ergonomiquement critiques, ou encore l'estimation des critères et l'analyse multicritère.

Le contexte de chaque étude est présenté. L'objectif est de souligner les besoins industriels. Les différentes activités de la méthodologie sont appliquées pour chercher des solutions répondant à ces besoins.

Une analyse des résultats est effectuée. Concernant le regroupement d'opérations de vissage, la complexité du problème est engendrée par la diversité des vis/écrous, la volonté de Stellantis de maintenir les opérations au défilé, ou encore le changement de conception des futures pièces. L'application du programme VBA s'est avérée utile pour traiter les contraintes de précédence. Toutefois, le programme a des limites puisqu'il ne permet pas de distinguer réellement les opérations qui ont les mêmes caractéristiques, ce qui impose de traiter les résultats par un expert afin d'identifier ces opérations.

Pour la deuxième partie de la méthodologie, les opérations d'assemblage du toit ouvrant panoramique sont présentées. Deux fournisseurs ont été sollicités pour concevoir des solutions techniques d'automatisation. Ces dernières sont évaluées moyennant les divers critères présentés dans le troisième chapitre.

Chapitre 5 : Conclusion Générale et Perspectives

Résumé

Ce chapitre est consacré à la conclusion générale des travaux de recherche effectués. Il résume les contributions faites. Ensuite, il souligne les limites de la méthodologie et des outils développés. Par la suite, il propose des points d'amélioration et des perspectives industrielles et scientifiques.

La forte demande variée des consommateurs est un réel défi pour les industriels. En effet, ils ont du mal à faire face à cette grande diversité et à suivre les tendances du marché, ce qui signifie un volume réduit et un mix élevé. Il est donc important d'améliorer les systèmes de production pour rester compétitif. L'automatisation est l'une des solutions pour faire face à cette variabilité. Néanmoins, Les fabricants sont conscients qu'un recours accru à l'automatisation ne se traduit pas nécessairement par des gains économiques accrus. Ainsi, l'objectif de la thèse est de proposer une méthodologie qui permet d'accroître l'efficacité des lignes de montage par l'analyse d'automatisations rentables dans un contexte de production multi-modèles.

Le manuscrit présente et détaille l'ensemble des travaux menés afin de répondre à la problématique de recherche. La première partie présente le contexte industriel et académique. Elle souligne les besoins industriels et détaille la problématique que doivent traiter les travaux de recherche.

Pour répondre aux différentes questions posées dans la première partie, un état de l'art est présenté et analysé. Les différentes exigences qu'une méthodologie adéquate à la problématique de la thèse sont identifiés.

La troisième partie du manuscrit explique les différentes étapes qui constituent la méthodologie développée. Les outils (regroupements d'opérations, estimation des critères ...) permettant sa compréhension et son application y sont présentés.

La quatrième partie du manuscrit présente trois applications industrielles qui ont pour objectif de valider et de mieux expliquer l'application de la méthodologie et outils développés.

La cinquième et dernière partie du manuscrit résume les différentes contributions issues de ce travail de thèse. L'objectif est de donner une vue d'ensemble des méthodologies et modèles développés pour répondre à la problématique de recherche. Les différentes contributions sont brièvement décrites et leurs limites sont soulignées. Ceci ouvre des perspectives pour de nouveaux axes de recherche.

1. Synthèse des travaux réalisés

En guise de rappel, la question globale de recherche qui est présentée au début de ce document est la suivante :

Comment identifier les zones d'assemblage à potentiel d'automatisation dans le cadre d'une production multi-modèles ?

Par la suite, quatre questions clés ont été définies pour répondre à la problématique de recherche. Ces quatre questions représentent une base pour structurer la conclusion générale.

1.1. Question 1 : Comment qualifier le degré d'automatisation d'un poste de travail ? Voire d'un atelier de montage ?

Des exigences que doit satisfaire une bonne définition du niveau d'automatisation ont été identifiées. Ainsi, un bon indicateur LoA doit être applicable pour les systèmes de production existants ou futurs. Il doit être quantitatif et objectif. L'échelle doit traiter le mode opératoire et doit permettre une automatisation partielle. Et enfin, elle doit donner une vision claire aux décideurs sur la charge des opérateurs et celle des machines.

Pour répondre à ce besoin, une étude bibliographique des différentes définitions du niveau d'automatisation a été faite. Sur la base des exigences présentées, les différentes définitions issues de l'état d'art ont été évaluées. Cette évaluation montre qu'aucune définition n'analyse la charge des opérateurs et celle des machines. Il est à noter également que la majorité des approches issues de la littérature traitent le processus complet et manquent de précision quant à la description du niveau d'automatisation de chaque poste de travail.

Ainsi, la nécessité de développer une nouvelle définition du LoA a été argumentée. Le temps est l'indicateur choisi pour quantifier le LoA puisqu'il permet d'évaluer la part de l'Homme et la part des moyens automatisés. Le LoA proposé est défini comme un rapport de temps entre le temps des opérations automatisées et le temps de cycle. Cette définition a été utilisée pour décrire le potentiel d'automatisation des postes de montage étudiés dans le quatrième chapitre.

1.2. Question 2 : Quels sont les critères de regroupement d'opérations en vue d'équilibrer la charge opérateur et la charge moyens automatisés ?

A travers le regroupement d'opérations, l'industriel cherche non seulement à rentabiliser l'automatisation mais aussi à équilibrer la charge des opérateurs et la charge des installations automatisées. Ainsi, le but de cette question est de mettre l'accent sur la nécessité d'identifier les critères qui permettent la recherche des regroupements d'opérations.

Une liste des critères a été établie à travers des réunions et discussions avec les industriels de Stellantis. Pour chaque type d'opérations, des critères qualitatifs et quantitatifs ont été listés afin de pouvoir identifier des opérations à caractéristiques similaires et ainsi, pouvoir identifier des regroupements d'opérations.

Pour faciliter cette tâche, un programme VBA a été développé. Les différentes étapes du programme sont présentées dans le chapitre 3.

1.3. Question 3 : Quelle est l'approche la plus adaptée pour chercher des regroupements d'opérations pour les automatiser ?

Pour garantir la rentabilité du projet et étant donné que les opérations de montage sont très courtes en durée, la recherche des regroupements d'opérations reste la meilleure solution.

Un ensemble d'exigences qu'une approche doit respecter pour répondre à cette deuxième problématique est défini. Ainsi, la méthodologie doit être analytique et doit permettre d'étudier plusieurs scénarios d'automatisation. Elle doit donner des règles de calcul de chacun des critères qui permettent d'identifier le scénario d'automatisation optimal. Et finalement, la méthode doit permettre une analyse de regroupement d'opérations et d'équilibrage de la ligne.

Les méthodologies d'aide à la décision pour augmenter le niveau d'automatisation des lignes de production trouvées dans la littérature ont été analysées et évaluées moyennant les exigences définies précédemment. Il en résulte qu'aucune des méthodes analysées dans la littérature ne satisfait complètement les exigences exprimées. D'autant plus qu'aucune des méthodes ne traite l'aspect du regroupement d'opérations et de l'équilibrage de la ligne. Ainsi, Il a été essentiel de présenter une méthodologie répondant aux exigences industrielles citées auparavant.

La méthodologie développée comporte six activités qui permettent d'analyser l'ensemble des données d'entrée liées aux gammes de production, à l'architecture de l'usine ou encore à la conception des produits. Moyennant plusieurs critères de regroupements, la méthodologie permet d'étudier les contraintes de précédence et de proposer ainsi des regroupements d'opérations. Et finalement, la méthodologie permet d'identifier le scénario d'automatisation qui satisfait au mieux la vision du métier montage.

1.4. Question 4 : Quels sont les critères de sélection et la méthode permettant d'identifier le scénario d'automatisation optimal ?

Une étude bibliographique a été menée pour lister et identifier l'ensemble des critères et données d'entrée à prendre en compte pour sélectionner le scénario d'automatisation optimal. Des réunions avec les industriels de Stellantis ont été organisées pour identifier les critères les plus importants pour l'entreprise. Il a été décidé de retenir les critères suivants : coût, ergonomie, maturité de l'automatisation et flexibilité.

Dans le domaine de l'estimation des coûts, une revue exhaustive des modèles de coûts et des approches qui pourraient soutenir la décision d'automatisation a été faite. En raison des spécificités de la problématique, quelques modèles de la littérature n'étaient pas applicables. Ainsi, des modifications et/ou adaptations ont été effectuées.

Pour la quantification de l'ergonomie, une étude bibliographique a été menée. Une analyse et une comparaison de l'ensemble des méthodes ont été faites afin de choisir la méthode adéquate pour le traitement du sujet de la thèse.

Une évaluation a été proposée afin de quantifier la flexibilité de chaque alternative d'automatisation. Cette évaluation est basée sur l'un des travaux issus de la littérature.

Concernant la maturité des technologies, une autre interprétation de cet indicateur a été donnée. En se basant sur l'échelle définie par l'organisation internationale de normalisation, une méthode de calcul de la maturité des technologies a été proposée.

Une étude bibliographique de l'ensemble des méthodes d'analyse multicritère a été effectuée. Les différentes méthodes ont été analysées. Le choix de la méthode AHP a été justifié.

2. Limites et Perspectives

Cette section a donc pour objectif de souligner les limites des travaux de recherche effectués dans le cadre de cette thèse. Elle présente également des propositions de travaux futurs.

2.1. Définition du niveau d'automatisation

La définition proposée permet de décrire le potentiel d'automatisation d'un poste de travail. Elle permet également de quantifier la charge des opérateurs et la charge des moyens automatisés. Cependant, cette définition ne peut être applicable pour mesurer le niveau d'automatisation global de l'atelier montage chez Stellantis.

En effet, chez Stellantis, les temps des opérations automatisés ne sont pas renseignés dans les gammes de production. Ainsi, il est impossible de mesurer le niveau d'automatisation global de l'atelier en se basant sur la définition proposée dans ce travail de thèse.

Des réunions ont été initiées pour voir la faisabilité de calculer ce niveau d'automatisation en se basant sur le nombre de postes automatisés et manuels. Malheureusement, les gammes de montage, telles qu'elles sont conçues aujourd'hui, ne permettent pas de faire ces calculs. Pour remédier à cette problématique, deux solutions se présentent :

- Avoir toutes les gammes dégradées liées aux automatisations existantes dans l'atelier
- Pouvoir identifier ces gammes : des gammes en mode dégradé existent pour des opérations qui ne sont pas automatisées. Il faut donc mettre en place un moyen (code par exemple) pour pouvoir identifier les gammes liées à des automatisations.
- Pouvoir identifier les postes automatisés liés à ces gammes dégradées

2.2. Recherche des regroupements d'opérations

La recherche des regroupements d'opérations commence par l'analyse des contraintes de précédence. Actuellement, ces contraintes sont définies en se basant sur l'expertise humaine. Ce manque est d'ailleurs souligné par le diagramme UML présenté dans le chapitre 3.

Il serait donc très intéressant d'étudier la faisabilité de développer une méthodologie et/ou un outil pour analyser la nomenclature des produits, les arbres des spécifications présentes dans les fichiers CAO ... et en déduire ainsi automatiquement les contraintes de précédence entre les pièces. La deuxième phase de cet axe de recherche pourrait être de faire un lien entre cet outil et les gammes de production industrielles.

Le programme VBA développé permet de visualiser les contraintes de précédence. Il facilite ainsi la recherche des regroupements. Néanmoins, il présente une limite. En effet, ce programme ne traite pas les critères de regroupements, et donc ne permet pas de distinguer réellement les opérations qui ont les mêmes caractéristiques. Cette limite impose qu'un expert analyse les résultats pour pouvoir identifier ces opérations.

Pour contourner cette limite il faut :

- Formaliser les critères de regroupements pour être exploitables par le programme.
- Faire évoluer le programme pour qu'il puisse faire un tri en se basant sur les critères de regroupements.

2.3. Méthodologie développée

L'analyse de la méthodologie développée montre que l'expertise humaine est essentielle à son déploiement. Le seul outil informatique qui a été développé est le programme qui facilite la recherche des regroupements d'opérations.

Plusieurs outils peuvent être proposés pour faciliter le déploiement de la méthodologie :

- **Création de la base de données des opérations à analyser** : aujourd'hui, plusieurs extractions sont nécessaires pour rassembler toutes les données d'entrée. Les calculs permettant d'identifier la nature d'opérations à traiter sont faits manuellement.
- **Quantification facile des critères de sélection** : une base de données contenant l'ensemble des technologies peut enrichir cet outil.
- **Application de la méthode d'analyse multicritère** : l'analyse présentée dans le chapitre 4 a été faite manuellement. Un outil pour faciliter la prise de décision et analyser la sensibilité des résultats peut être intéressant à déployer.

La méthodologie permet d'analyser et de regrouper des opérations de même nature. Aujourd'hui, grâce à la technologie, il est possible de réaliser plusieurs types d'opérations en même temps. Il serait donc pertinent d'enrichir ce travail en identifiant les critères et contraintes à respecter afin de regrouper et d'automatiser des natures d'opérations différentes.

2.4. Autres perspectives

La méthodologie a été appliquée sur les usines ex-PSA. Il faut l'appliquer sur d'autres usines du groupe Stellantis (ex-FCA) pour pouvoir analyser leurs méthodologies (constitution des gammes de production par exemple) mais aussi l'architecture des usines et la conception de leurs véhicules. Cela permettra de standardiser les processus d'analyse et peut être homogénéiser et transversaliser des automatisations.

Dans le cas d'une automatisation complexe, la méthodologie (activité A3.5) préconise de proposer des évolutions au niveau de la conception des produits. Il serait donc intéressant d'étudier la possibilité d'intégrer un échange plus constructif entre les équipes de conception et les équipes de production dès la première phase de définitions des caractéristiques des produits. Même si les approches Design for Manufacturing ou Design for Assembly existent, il faut les accroître.

Compte tenu de l'évolution constante des technologies, il serait également intéressant que les méthodologies futures fournissent une aide à la décision quant au choix des robots, cobots et automatismes à mettre en place. Un autre axe à enrichir concerne les postes de travail en mode dégradé qui ont pour principale fonction de se substituer à des postes automatisés en cas de défaillances.

A ce jour, le sujet d'automatisation du toit ouvrant panoramique n'a pas été mené jusqu'à sa mise en production. La méthodologie doit encore évoluer pour prendre en compte les phases d'industrialisation comme :

- Les essais et tests de qualification du système automatisé avec un intégrateur
- L'approvisionnement et l'intégration de l'automatisation à la ligne de montage
- La formation des opérateurs
- La mise en production

Une autre perspective pourrait être l'analyse de l'équilibrage de la ligne. Cette contrainte n'a pas été traitée durant ce travail de thèse. Chez Stellantis, la répartition fine des opérations est réalisée avec deux outils ; le cyclogramme du poste de travail et un système informatique qui permet d'affecter à un opérateur une ou plusieurs gammes de montage. Cette démarche est faite en prenant en compte différents critères comme le temps de cycle et le niveau d'activité au poste.

Une analyse de ces différents outils peut être envisagée. Ceci va permettre de définir les besoins fonctionnels d'évolutions des outils d'équilibrage, voire la création d'un outil pré-équilibrage afin de prendre en compte les contraintes liées aux automatisations et permettre ainsi une analyse plus rapide de l'équilibrage des lignes.

La synthèse des contributions réalisées au cours de cette thèse montre la complexité de la problématique et l'aspect multicritère de la décision. Cette synthèse permet non seulement de souligner les avantages de la méthodologie et modèles développés, mais également de montrer leurs limites et proposer ainsi des axes d'amélioration.

Certains axes comme la création automatique de la base de données ou encore l'amélioration du programme VBA peuvent être traités sur le court terme. D'autres axes nécessitent plus d'effort et de recherche notamment l'équilibrage de la ligne et le regroupement de différentes natures d'opérations.

Liste des publications scientifiques

Conférences nationales

H. Ait Malek, A. Etienne, A. Siadat, et T. Allavena, « A Literature Review on the Level of Automation and New Approach Proposal », in *Advances in Production Management Systems. The Path to Digital Transformation and Innovation of Production Management Systems*, vol. 591, B. Lalic, V. Majstorovic, U. Marjanovic, G. von Cieminski, et D. Romero, Éd. Cham: Springer International Publishing, 2020, p. 408-417. doi: 10.1007/978-3-030-57993-7_46.

H. Ait Malek, A. Etienne, A. Siadat, et T. Allavena, « Proposal of a Methodology to Improve the Level of Automation of an Assembly Line », in *Advances in Production Management Systems. Artificial Intelligence for Sustainable and Resilient Production Systems*, vol. 631, A. Dolgui, A. Bernard, D. Lemoine, G. von Cieminski, et D. Romero, Éd. Cham: Springer International Publishing, 2021, p. 433-441. doi: 10.1007/978-3-030-85902-2_46.

Reuves scientifiques

H. Ait Malek, A. Etienne, A. Siadat, et T. Allavena, « Improving the level of automation of assembly lines: Methodology and case study » (en cours)

Bibliographie

- [1] LCFC, « Laboratoire de Conception Fabrication Commande - LCFC Présentation - », 2021. <http://lcfc.ensam.eu/> (consulté le 28 septembre 2021).
- [2] S. Khushboo, « All About the Automotive Industry », *WorldAtlas*, p. 11-2019, avr. 2017.
- [3] J.-P. Corniou, « Le nouveau monde de l'automobile: L'impasse du moteur à Explosion ». 2016.
- [4] C. Da Cunha, O. Cardin, G. Gallot, et J. Viaud, « Designing the Digital Twins of Reconfigurable Manufacturing Systems: application on a smart factory », *IFAC-PapersOnLine*, vol. 54, n° 1, p. 874-879, 2021, doi: 10.1016/j.ifacol.2021.08.103.
- [5] F. Jovane, Y. Koren, et C. R. Boër, « Present and Future of Flexible Automation: Towards New Paradigms », *CIRP Ann*, vol. 52, n° 2, p. 543-560, janv. 2003.
- [6] A. Granou, Y. Baron, B. Billaudot, C. crise, et Rééd, Éd., Paris: Maspero, 1983.
- [7] B. Coriat, *L'atelier et le chronomètre : Essai sur le taylorisme, le fordisme et la production de masse*. Christian Bourgois Editeur, 1994.
- [8] J.-J. C. J. Perrin, « Science, technologie et modes d'organisation du travail », *Sociol. Trav*, vol. 28, n° 1, p. 23-40, 1986.
- [9] R. P. V. Riley, « Humans and Automation: Use, Misuse, Disuse, Abuse », *Hum. Factors J. Hum. Factors Ergon. Soc*, vol. 39, n° 2, p. 230-253, juin 1997.
- [10] B. Claverie, « COGNITIVE - Science et pratique des relations à la machine à penser, Bernard Claverie - livre, ebook, epub, L'Harmattan ». 2005.
- [11] P. K. Muhuri, A. K. Shukla, et A. Abraham, « Industry 4.0: A bibliometric analysis and detailed overview », *Eng. Appl. Artif. Intell*, vol. 78, p. 218-235, févr. 2019.
- [12] B. Ślusarczyk, « Industry 4.0 - Are we Ready? », *ResearchGate*, juin 2018.
- [13] A. Ustundag et E. Cevikcan, *Industry 4.0: Managing The Digital Transformation*. Cham: Springer International Publishing, 2018. doi: 10.1007/978-3-319-57870-5.
- [14] et A. B. David Pérez Perales F. Alarcón, « Industry 4.0: A Classification Scheme », *ResearchGate*, juill. 2016.
- [15] G. Bonnafos, « Automatisation et nouvelles formes d'organisation du travail dans l'industrie automobile », *Form. Empl*, vol. 8, n° 1, p. 5-14, 1984.
- [16] J. D. L. Bobbie D. Seppelt, *Human Factors in Automation Design*. Springer Handb. Autom, 2009.
- [17] A. Boufnour, « L'avenir de l'industrie automobile mondiale: Quelles stratégies? », Paris Dauphine, France: La Documentation française, 1984, p. 144.
- [18] R. Feno, « Analyse et évaluation de la reconfiguration d'une ligne de production: application à l'assemblage en tôlerie automobile », Thèse de doctorat, Arts et Métiers Paristech, 2016.
- [19] T. Allavena, « Module Formation - Conception et architecture de l'usine excellente », France, mars 2018.
- [20] T. Saint-Victor, « Développement d'un outil informatique pour l'équilibrage de ligne dans le contexte de production mixte », Thèse de doctorat, Université du Québec, 2008.
- [21] E. Muhl, P. Charpentier, N. Grumbach, et P. Bonneau, « Validation d'une hypothèse de résolution d'optimisation globale du flux d'une usine terminale d'un constructeur automobile », *MOdélisation et SIMulation - MOSIM'01*, vol. 3e Conférence Francophone, p. 8, avr. 2001.
- [22] K. Aroui, « Séquencement d'une ligne de montage multi-modèles: application à l'industrie du véhicule industriel ». Grenoble Alpes, France, 2006.
- [23] A. Lesert, *Sur l'évaluation de la flexibilité de l'atelier montage d'une usine terminale automobile*. Institut National Polytechnique de Grenoble, 2006.
- [24] T. Moulieres-Seban, D. Bitonneau, J.-F. Thibault, M. Salotti, et B. Claverie, « La Cobotique : un domaine pluridisciplinaire émergent utile à l'ergonome », *Congrès International Société d'Ergonomie de Langue Française*, vol. 51, p. 12, 2016.
- [25] H.-P. Wiendahl, H. A. ElMaraghy, P. Nyhuis, M. F. Zäh, H. H. Wiendahl, N. Duffie, et M. Brieke, « Changeable Manufacturing - Classification, Design and Operation », *CIRP Annals*, vol. 56, n° 2, p. 783-809, 2007, doi: 10.1016/j.cirp.2007.10.003.

- [26] C. A. Chung, « Human issues influencing the successful implementation of advanced manufacturing technology » », *J. Eng. Technol. Manag.*, vol. 13, n° 3-4, p. 283-299, sept. 1996.
- [27] A. Aublet-cuvelier, L. Claudon, B. Delecroix, V. Govaere, S. Guyot, A. Savescu, et C. Trontin, « Innovation technologique, changements organisationnels : quels enjeux pour la prévention ? », Nancy, mars 2017, p. 6.
- [28] K. Säfsten, M. Winroth, et J. Stahre, « The content and process of automation strategies » », *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 110, n° 1-2, p. 25-38, oct. 2007.
- [29] T. B. Sheridan, W. L. Verplank, et T. L. Brooks, « Human and Computer Control of Undersea Teleoperators », Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Rapport Technique - Projet NR 196-152, juill. 1978.
- [30] R. Parasuraman, T. B. Sheridan, et C. D. Wickens, « A model for types and levels of human interaction with automation », *IEEE Trans. Syst. Man Cybern. - Part Syst. Hum.*, vol. 30, n° 3, p. 286-297, mai 2000.
- [31] G. Lintern et T. Hughes, « Development of a Supervisory Control Rating Scale », General Dynamics, Rapport Technique AFRL-RH-WP-TR-2008-0054, janv. 2008.
- [32] M. R. Endsley, « Towards a New Paradigm for Automation: Designing for Situation Awareness » », *IFAC Proc.*, vol. 28, n° 15, p. 365-370, juin 1995.
- [33] J. Frohm, V. Lindström, J. Stahre, et M. Winroth, « Levels of Automation in Manufacturing », *Ergonomica International Journal of Ergonomics and Human Factors*, vol. 30, n° 3, p. 29, janv. 2008.
- [34] J. A. Adams, P. Rani, et N. Sarkar, « Mixed-Initiative Interaction and Robotic Systems », *AAAI Workshop on Supervisory Control of Learning and Adaptive Systems*, p. 8, janv. 2004.
- [35] V. Riley, « A General Model of Mixed-Initiative Human-Machine Systems » », *Proceedings of the Human Factors Society Annual Meeting*, vol. 33, n° 2, p. 124-128, oct. 1989.
- [36] M. Vagia, A. A. Transeth, et S. A. Fjerdings, « A literature review on the levels of automation during the years. What are the different taxonomies that have been proposed? », *Appl. Ergon.*, vol. 53, p. 190-202, mars 2016.
- [37] I. Gorchach et O. Wessel, « Optimal Level of Automation in the Automotive Industry », *Engineering Letters*, vol. 16, p. 141-149, févr. 2008.
- [38] J. Frohm, V. Lindström, M. Winroth, et J. Stahre, « The industry's view on automation in manufacturing » », *IFAC Proc.*, vol. 39, n° 4, p. 453-458, 2006.
- [39] M. Winroth et V. Lindström, « Aligning manufacturing strategy and levels of automation: A case study », *Journal of Engineering and Technology Management*, vol. 27, n° 3-4, p. 148-159, sept. 2010, doi: 10.1016/j.jengtecman.2010.06.002.
- [40] T. B. Sheridan, *Human and Automation: System Design and Research Issues*, 1^{re} éd. Wiley-Interscience, 2002.
- [41] R. Parasuraman et T. B. Sheridan, « Human-Automation Interaction », *Reviews of Human Factors and Ergonomics*, vol. 1, p. 89-129, juin 2005, doi: 10.1518/155723405783703082.
- [42] Å. Fasth, « Quantifying Levels of Automation: To Enable Competitive Assembly Systems », Thèse de doctorat, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden, 2012.
- [43] M. R. Endsley et E. O. Kiris, « The Out-of-the-Loop Performance Problem and Level of Control in Automation » », *Human Factors The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, vol. 37, n° 2, p. 14, juin 1995, doi: 10.1518/001872095779064555.
- [44] C. Windmark, P. Gabrielson, C. Andersson, et J. E. StEhl, « A Cost Model for Determining an Optimal Automation Level in Discrete Batch Manufacturing », *Procedia CIRP*, vol. 3, p. 73-78, 2012.
- [45] M. P. Groover, *Automation, Production Systems, and Computer Integrated Manufacturing*, 5^e éd. Addison Wesley, 2000.
- [46] K. F. S. Slama, « Highly flexible Assembly – Scope and Justification », *CIRP Ann.*, vol. 50, n° 2, p. 489-498, janv. 2001.
- [47] V. L. Mats Peter Winroth, « Embedding levels of automation in manufacturing strategy », *Swed. Prod. Symp.*, p. 8, nov. 2008.
- [48] K. Feldmann, B. Müller, et T. Haselmann, « Automated Assembly of Lightweight Automotive Components », *CIRP Ann.*, vol. 48, n° 1, p. 9-12, 1999.

- [49] G. B. Alting Leo, « Design for Assembly and Disassembly », *CIRP Ann*, vol. 41, p. 625-636, 1992.
- [50] G. Boothroyd, « Product design for manufacture and assembly » », vol. 26. p. 505-520, juillet 1994.
- [51] K. Dencker, Å. Fasth, J. Stahre, L. Mårtensson, T. Lundholm, et H. Akillioglu, « Proactive assembly systems-realising the potential of human collaboration with automation » », *Annu. Rev. Control*, vol. 33, n° 2, p. 230-237, déc. 2009.
- [52] G. Michalos, J. Spiliotopoulos, S. Makris, et G. Chryssolouris, « A method for planning human robot shared tasks », *CIRP J. Manuf. Sci. Technol*, vol. 22, p. 76-90, août 2018.
- [53] H. Bley, G. Reinhart, G. Seliger, M. Bernardi, et T. Korne, « Appropriate Human Involvement in Assembly and Disassembly », *CIRP Ann*, vol. 53, n° 2, p. 487-509, 2004.
- [54] J. Krüger, T. K. Lien, et A. Verl, « Cooperation of human and machines in assembly lines », *CIRP Annals*, vol. 58, n° 2, p. 628-646, 2009, doi: 10.1016/j.cirp.2009.09.009.
- [55] J. Krüger, B. Nickolay, P. Heyer, et G. Seliger, « Image based 3D Surveillance for flexible Man-Robot-Cooperation », *CIRP Ann*, vol. 54, n° 1, p. 19-22, 2005.
- [56] E. M. D. Picard, *Interaction. ERES*, 2002.
- [57] D. Bitonneau, « Conception de systèmes cobotiques industriels: approche robotique avec prise en compte des facteurs humains: application à l'industrie manufacturière au sein de Safran et ArianeGroup », Thèse de doctorat, Université de Bordeaux, 2018.
- [58] M. A. G. A. C. Schultz, « Human-Robot Interaction: A Survey », *Found. Trends® Hum.-Comput. Interact*, vol. 1, n° 3, p. 203-275, 2007.
- [59] R. Müller, M. Vette, et A. Geenen, « Skill-based Dynamic Task Allocation in Human-Robot-Cooperation with the Example of Welding Application », *Procedia Manufacturing*, vol. 11, p. 13-21, 2017, doi: 10.1016/j.promfg.2017.07.113.
- [60] L. Wang, R. Gao, J. Váncza, J. Krüger, X. V. Wang, S. Makris, et G. Chryssolouris, « Symbiotic human-robot collaborative assembly », *CIRP Annals*, vol. 68, n° 2, p. 701-726, 2019, doi: 10.1016/j.cirp.2019.05.002.
- [61] L. Benos, B. Avital, et B. Dionysis, « Safety and Ergonomics in Human-Robot Interactive Agricultural Operations », *Biosystems Engineering*, vol. 200, n° décembre, p. 18, 2020, doi: 10.1016/j.biosystemseng.2020.09.009.
- [62] A. Gardecki, M. Podpora, et A. Kawala-Janik, « Innovative Internet of Things-reinforced Human Recognition for Human-Machine Interaction Purposes », *IFAC-Pap*, vol. 51, n° 6, p. 138-143, 2018.
- [63] B. Claverie, B. L. Blanc, et P. Fouillat, « La cobotique. La robotique soumise », *Commun. Organ*, n° 44, p. 203-214, déc. 2013.
- [64] G. P. Gerio et P. Francesco, « AURA: An Example of Collaborative Robot for Automotive and General Industry Applications », *International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing, FAIM*, vol. 11, n° 27, p. 338-345, juin 2017, doi: 10.1016/j.promfg.2017.07.116.
- [65] A. Salmi, « Early Phase Assembly Systems Design, Automation Alternatives Description, and Optimization: A Support to Automation Decision », Thèse de doctorat, Grenoble INP, 2016.
- [66] S. T. T. Hirano, « Human and robot allocation method for hybrid assembly systems », *CIRP Ann*, vol. 60, n° 1, p. 9-12, 2011.
- [67] G. Boothroyd, *Assembly Automation and Product Design*, 2nd éd. Boca Raton, Fla: CRC Press, Taylor & Francis, 2005.
- [68] A. Salmi, P. David, E. Blanco, et J. D. Summers, « Deciding the level of automation for the design of assembly manufacturing systems », *International Conference on Computers & Industrial Engineering (CIE45)*, p. 9, oct. 2015.
- [69] B. Almannai, R. Greenough, et J. Kay, « A decision support tool based on QFD and FMEA for the selection of manufacturing automation technologies » », *Robot. Comput.-Integr. Manuf*, vol. 24, n° 4, p. 501-507, août 2008.
- [70] R. Singh, « Automatic Tool Changer ». [En ligne]. Disponible sur: <https://fr.scribd.com/doc/51698181/Automatic-Tool-Changer>.
- [71] Å. F. J. Stahre, « Does Level of Automation need to be changed in an assembly system? - A case study ». p. 9, novembre 2008.

- [72] G. B. P. Dewhurst, « Design for Assembly ». Amherst, MA, 1983.
- [73] H. Ait Malek, A. Etienne, A. Siadat, et T. Allavena, « A Literature Review on the Level of Automation and New Approach Proposal », in *Advances in Production Management Systems. The Path to Digital Transformation and Innovation of Production Management Systems*, vol. 591, B. Lalic, V. Majstorovic, U. Marjanovic, G. von Cieminski, et D. Romero, Éd. Cham: Springer International Publishing, 2020, p. 408-417. doi: 10.1007/978-3-030-57993-7_46.
- [74] H. Ait Malek, A. Etienne, A. Siadat, et T. Allavena, « Proposal of a Methodology to Improve the Level of Automation of an Assembly Line », in *Advances in Production Management Systems. Artificial Intelligence for Sustainable and Resilient Production Systems*, vol. 631, A. Dolgui, A. Bernard, D. Lemoine, G. von Cieminski, et D. Romero, Éd. Cham: Springer International Publishing, 2021, p. 433-441. doi: 10.1007/978-3-030-85902-2_46.
- [75] « L'Usine Auto », 20 décembre 2013. <https://www.usinenouvelle.com/> (consulté le 27 mai 2019).
- [76] C.I.R.P., *Dictionary of Production Engineering*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [77] P. Morin, *Elaboration des gammes de Montage*. PSA, 2004.
- [78] L. Andolfatto, « Assistance à l'élaboration de gammes d'assemblage innovantes de structures composites », *ENS Cachan*, 2013.
- [79] L. Bainbridge, « Ironies of Automation », *IFAC Proceedings*, vol. 15, n° 6, p. 129-35, 1982, doi: 10.1016/S1474-6670(17)62897-0.
- [80] M. Bornschlegl, S. Kreitlein, M. Bregulla, et J. Franke, « A Method for Forecasting the Running Costs of Manufacturing Technologies in Automotive Production during the Early Planning Phase », *Procedia CIRP*, vol. 26, p. 412-17, 2015, doi: 10.1016/j.procir.2014.07.103.
- [81] K. A. Downs et A. J. C. Trappey, « A Sequential Block Approach to the Design of a Cost Estimation System », *Computers & Industrial Engineering*, vol. 23, n° 1-4, p. 423-26, 1992, doi: 10.1016/0360-8352(92)90151-9.
- [82] N. K. Jha, « Probabilistic Cost Estimation in Advance of Production in a Computerized Manufacturing System through Stochastic Geometric Programming », *Computers & Industrial Engineering*, vol. 30, n° 4, p. 809-21, 1996, doi: 10.1016/0360-8352(96)00033-2.
- [83] L. Ping, H. Yongtong, J. Bode, et R. shouju, « Multi-agent system for cost estimation », *Computers & Industrial Engineering*, vol. 31, n° 3-4, p. 731-735, déc. 1996, doi: 10.1016/S0360-8352(96)00247-1.
- [84] W. Winchell, *Realistic Cost Estimating for Manufacturing*, Second. Alfred, New York: Society of Manufacturing, 1989. [En ligne]. Disponible sur: <http://online.fliphtml5.com/zroi/cqmo/#p=5>.
- [85] S. Cavalieri, P. Maccarrone, et R. Pinto, « Parametric vs. Neural Network Models for the Estimation of Production Costs: A Case Study in the Automotive Industry », *International Journal of Production Economics*, vol. 91, n° 2, p. 165-77, 2004, doi: 10.1016/j.ijpe.2003.08.005.
- [86] M. Eklin, Y. Arzi, et A. Shtub, « Model for Cost Estimation in a Finite-Capacity Stochastic Environment Based on Shop Floor Optimization Combined with Simulation », *European Journal of Operational Research*, vol. 194, n° 1, p. 294-306, 2009, doi: 10.1016/j.ejor.2007.11.048.
- [87] P. Duverlie et J. M. Castelain, « Cost Estimation During Design Step: Parametric Method versus Case Based Reasoning Method », *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 15, n° 12, p. 895-906, 1999, doi: 10.1007/s001700050147.
- [88] T. Lenau et J. Haudrum, « Cost Evaluation of Alternative Production Methods », *Materials & Design*, vol. 15, n° 4, p. 235-47, 1994, doi: 10.1016/0261-3069(94)90008-6.
- [89] N. Bernet, M. D. Wakeman, P.-E. Bourban, et J.-A. E. Månson, « An Integrated Cost and Consolidation Model for Commingled Yarn Based Composites », *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 33, n° 4, p. 495-506, 2002, doi: 10.1016/S1359-835X(01)00140-3.
- [90] A. Salmi, P. David, E. Blanco, et J. D. Summers, « A Review of Cost Estimation Models for Determining Assembly Automation Level », *Computers & Industrial Engineering*, vol. 98, n° août, p. 246-59, 2016, doi: 10.1016/j.cie.2016.06.007.

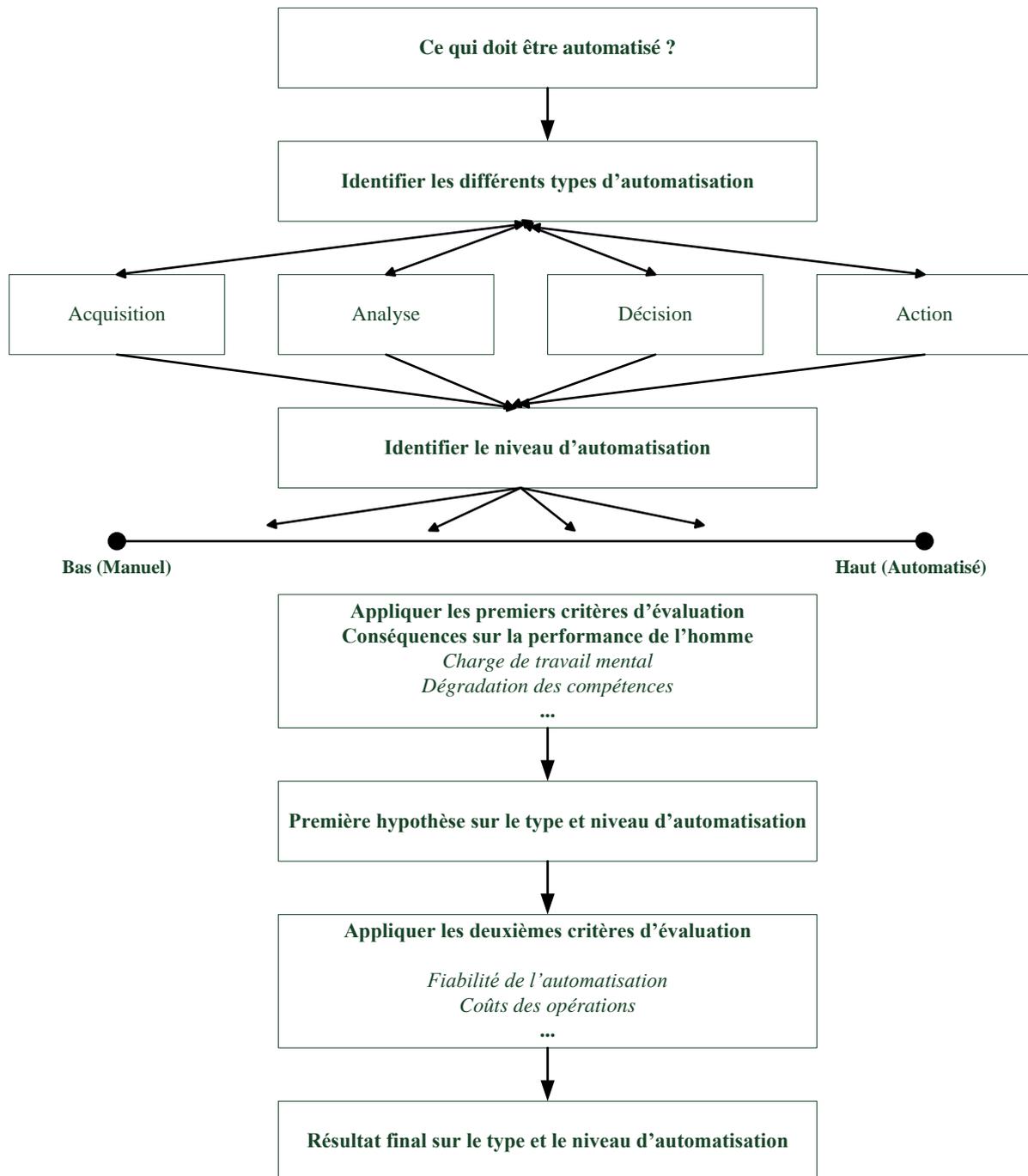
- [91] S. Cavalieri, P. Maccarrone, et R. Pinto, « Parametric vs. neural network models for the estimation of production costs: A case study in the automotive industry », *International Journal of Production Economics*, vol. 91, n° 2, p. 165-177, sept. 2004, doi: 10.1016/j.ijpe.2003.08.005.
- [92] G. T. Sheng-Hsien et S. S. Garimella, « Manufacturing Cost Modeling in Printed Wiring Board Assembly », *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 17, n° 2, p. 10, 1998, doi: 10.1016/S0278-6125(98)80022-8.
- [93] A. Mahadik et D. Masel, « Implementation of Additive Manufacturing Cost Estimation Tool (AMCET) Using Break-down Approach », *Procedia Manufacturing*, vol. 17, p. 70-77, 2018, doi: 10.1016/j.promfg.2018.10.014.
- [94] L. Niu, M. Chen, J. Jiang, et Q. Zhou, « The Drivers Analysis of Strategic Cost Based on AHP », in *Advances in Electrical Engineering and Automation*, vol. 139, Berlin, Heidelberg: Springer, 2012, p. 59-65. doi: 10.1007/978-3-642-27951-5_9.
- [95] E. M. Shehab et H. S. Abdalla, « Manufacturing Cost Modelling for Concurrent Product Development », *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 17, n° 4, p. 341-53, 2001, doi: 10.1016/S0736-5845(01)00009-6.
- [96] M. Bornschlegl, S. Kreitlein, M. Bregulla, et J. Franke, « A Method for Forecasting the Running Costs of Manufacturing Technologies in Automotive Production during the Early Planning Phase », *Procedia CIRP*, vol. 26, p. 412-417, 2015, doi: 10.1016/j.procir.2014.07.103.
- [97] Y. K. Son, « A cost estimation model for advanced manufacturing systems », *International Journal of Production Research*, vol. 29, n° 3, p. 441-452, 1991, doi: 10.1080/00207549108930081.
- [98] M. Jönsson, C. Andersson, et J.-E. Ståhl, « Relations between Volume Flexibility and Part Cost in Assembly Lines », *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 27, n° 4, p. 669-73, 2011, doi: 10.1016/j.rcim.2010.12.002.
- [99] L. C. Rivero, R. G. Rodríguez, Ma. D. R. Pérez, C. Mar, et Z. Juárez, « Fuzzy Logic and RULA Method for Assessing the Risk of Working », *Procedia Manufacturing*, vol. 3, p. 4816-4822, 2015, doi: 10.1016/j.promfg.2015.07.591.
- [100] L. McAtamney et E. Nigel Corlett, « RULA: a survey method for the investigation of work-related upper limb disorders », *Applied Ergonomics*, vol. 24, n° 2, p. 91-99, avr. 1993, doi: 10.1016/0003-6870(93)90080-S.
- [101] B. McPhee, « Work-related musculoskeletal disorders of the neck and upper extremities in workers engaged in light, highly repetitive work », Bonn, Germany, 1997, p. 244-258.
- [102] K. S. Tee, E. Low, H. Saim, W. N. W. Zakaria, S. B. M. Khialdin, H. Isa, M. I. Awad, et C. F. Soon, « A study on the ergonomic assessment in the workplace », Johor, Malaysia, 2017, p. 020034. doi: 10.1063/1.5002052.
- [103] T. Waters, V. Anderson, A. Garg, et L. Fine, « Revised NIOSH Equation for the design and evaluation of manual lifting tasks », *Ergonomics*, vol. 36, p. 749-76, août 1993, doi: 10.1080/00140139308967940.
- [104] T. Waters, V. Putz-Anderson, et A. Garg, « Applications Manual For the Revised NIOSH Lifting Equation ». 1 janvier 1994. Consulté le: 14 octobre 2020. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.cdc.gov/niosh/docs/94-110/pdfs/94-110.pdf?id=10.26616/NIOSH/PUB94110>
- [105] J. Malchaire, R. Gauthy, A. Piette, et F. Strambi, *Classification de méthodes d'évaluation et/ou de prévention des risques de troubles musculosquelettiques: guide*. Brussels: ETUI, 2011.
- [106] Health and Safety Executive, *Manual handling assessment charts (the MAC tool)*. Sudbury: HSE Books, 2008.
- [107] W. M. Keyserling, M. Brouwer, et B. A. Silverstein, « A checklist for evaluating ergonomic risk factors resulting from awkward postures of the legs, trunk and neck », *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol. 9, n° 4, p. 283-301, juin 1992, doi: 10.1016/0169-8141(92)90062-5.
- [108] D. B. Chaffin, G. Andersson, et B. J. Martin, *Occupational biomechanics*, 4th ed. Hoboken, N.J: Wiley-Interscience, 1984.
- [109] J. Moore, A. Garg, et J. Kapellusch, « The Strain Index: A Proposed Method to Analyze Jobs For Risk of Distal Upper Extremity Disorders », *American Industrial Hygiene Association Journal*, vol. 56, n° 5, p. 443-458, mai 1995, doi: 10.1080/15428119591016863.

- [110] A. Garg, J. Steven Moore, et J. M. Kapellusch, « The strain index to analyze jobs for risk of distal upper extremity disorders: Model validation », in *2007 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*, Singapore, déc. 2007, p. 497-499. doi: 10.1109/IEEM.2007.4419239.
- [111] INRS, « Bible outils TMS », A.S.T.A.V, mai 2008.
- [112] V. Louhevaara et T. Suurnäkki, *OWAS: A Method for the Evaluation of Postural Load During Work*, vol. 11. Institute of Occupational Health, Centre for Occupational Safety, 1992.
- [113] D. Colombini, « An observational method for classifying exposure to repetitive movements of the upper limbs », *Ergonomics*, vol. 41, n° 9, p. 1261-1289, sept. 1998, doi: 10.1080/001401398186306.
- [114] J. P. Zana, « Le travail répétitif: De la compréhension à l'action ». Département expertise et conseil technique INRS, 22 mars 2011.
- [115] J. Browne, S. Sethi, D. Dubois, K. Stecke, et K. Rathmill, « Classification of flexible manufacturing systems », *The FMS magazine*, p. 17, 1984.
- [116] D. E. D'Souza et F. P. Williams, « Toward a Taxonomy of Manufacturing Flexibility Dimensions », *Journal of Operations Management*, vol. 18, n° 5, p. 577-93, 2000, doi: 10.1016/S0272-6963(00)00036-X.
- [117] International Organization for Standardization, « Systèmes spatiaux — Définition des Niveaux de Maturité de la Technologie (NMT) et de leurs critères d'évaluation. 2013. », 2013.
- [118] A. Colomi, B. Roy, et M. Paruccini, *A-MCD-A - Aide Multi Critère à la Décision (Multiple Criteria Decision Aiding)*. Luxembourg: Office for Official Publ. of the Europ. Communities, 2001.
- [119] B. Roy, *Multicriteria Methodology for Decision Aiding*, vol. 12. Boston, MA: Springer US, 1996. doi: 10.1007/978-1-4757-2500-1.
- [120] X.-S. Yang, « Multi-Objective Optimization », in *Nature-Inspired Optimization Algorithms*, Elsevier, 2014, p. 197-211. doi: 10.1016/B978-0-12-416743-8.00014-2.
- [121] J. R. S. C. Mateo, « Weighted Sum Method and Weighted Product Method », in *Multi Criteria Analysis in the Renewable Energy Industry*, London: Springer London, 2012, p. 19-22. doi: 10.1007/978-1-4471-2346-0_4.
- [122] C. A. Bana e Costa et J.-C. Vansnick, « A critical analysis of the eigenvalue method used to derive priorities in AHP », *European Journal of Operational Research*, vol. 187, n° 3, p. 1422-1428, juin 2008, doi: 10.1016/j.ejor.2006.09.022.
- [123] T. L. Saaty, « The Analytic Hierarchy Process: Decision Making in Complex Environments », in *Quantitative Assessment in Arms Control*, R. Avenhaus et R. K. Huber, Éd. Boston, MA: Springer US, 1984, p. 285-308. doi: 10.1007/978-1-4613-2805-6_12.
- [124] H. Shidpour, C. Da Cunha, et A. Bernard, « Group multi-criteria design concept evaluation using combined rough set theory and fuzzy set theory », *Expert Systems with Applications*, vol. 64, p. 633-644, déc. 2016, doi: 10.1016/j.eswa.2016.08.022.
- [125] J.-P. Brans et P. Vincke, *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys*, vol. 78. New York, NY: Springer New York, 2005. doi: 10.1007/b100605.
- [126] Stellantis, « Modélisation d'une ligne d'assemblage « Usine de Futur Powertrain » ». 2018.

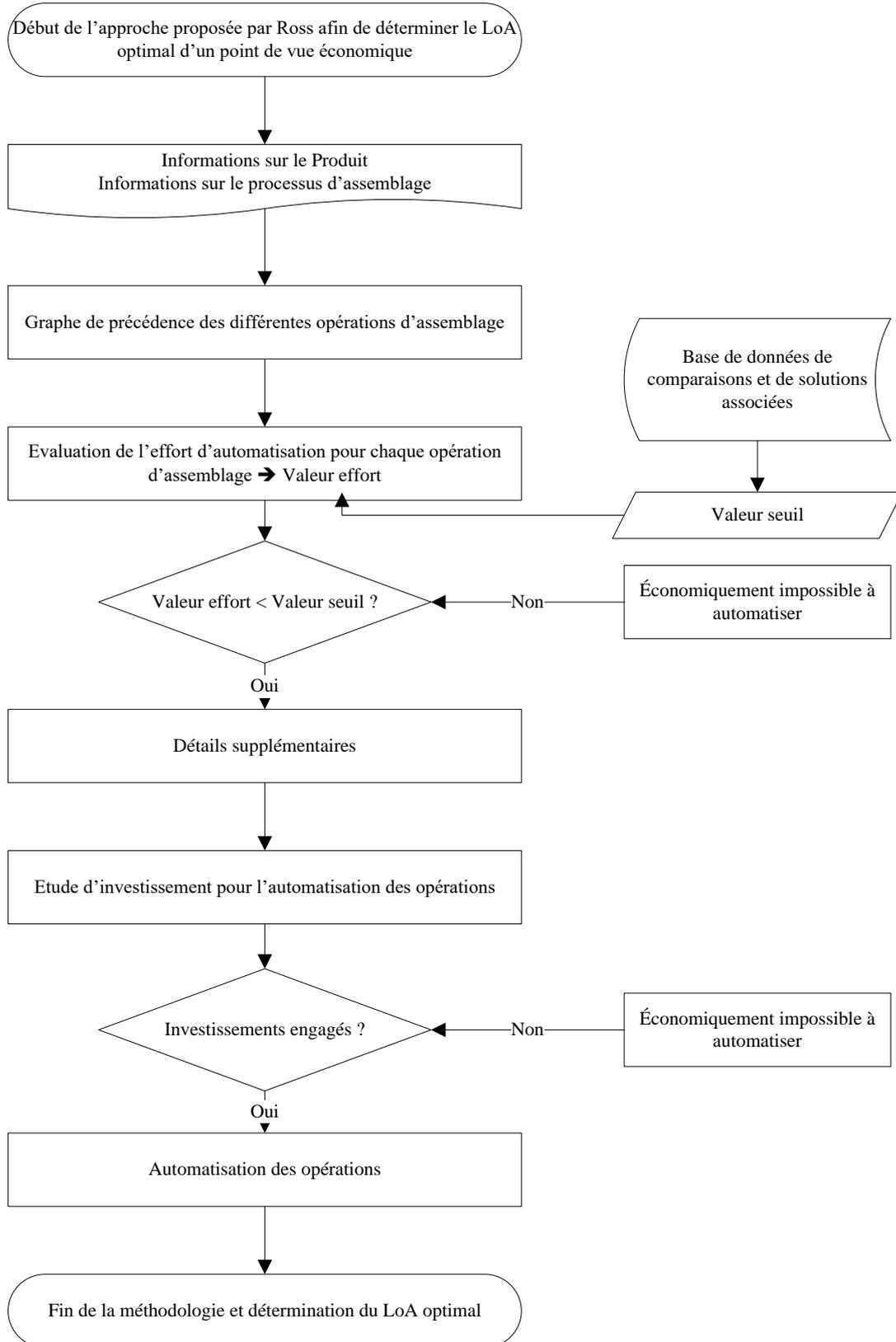
Annexes

Annexe 1 : Méthode proposée par Parasuraman, Sheridan et Wickens	105
Annexe 2 : Méthode développée par Ross	106
Annexe 3 : Méthode développée par Konold et Reger.....	107
Annexe 4 : Méthode proposée par Almannai, Greenough et Kay	108
Annexe 5 : Méthode développée par Boothroyd	109
Annexe 6 : Grille d'évaluation RULA	110
Annexe 7 : Feuille de score MAC	111
Annexe 8 : Checklist de Keyserling	112
Annexe 9 : Grille d'évaluation des 6 paramètres de la méthode Strain Index	113
Annexe 10 : Analyse des différentes méthodes d'évaluation de l'ergonomie.....	115
Annexe 11 : Etude de cas n°1 : Matrice de précédence.....	116
Annexe 12 : Etude de cas n°1 : Regroupement d'opérations	117
Annexe 13 : Etude de cas n°2 : Matrice de précédence.....	118
Annexe 14 : Etude de cas n°2 : Regroupement d'opérations	121
Annexe 15 : Application de la méthode AHP pour calculer les poids des paramètres volume et variabilité.....	123
Annexe 16 : Evaluation de la flexibilité des solutions	124
Annexe 17 : Application de la méthode AHP pour le choix d'une solution technique.....	125

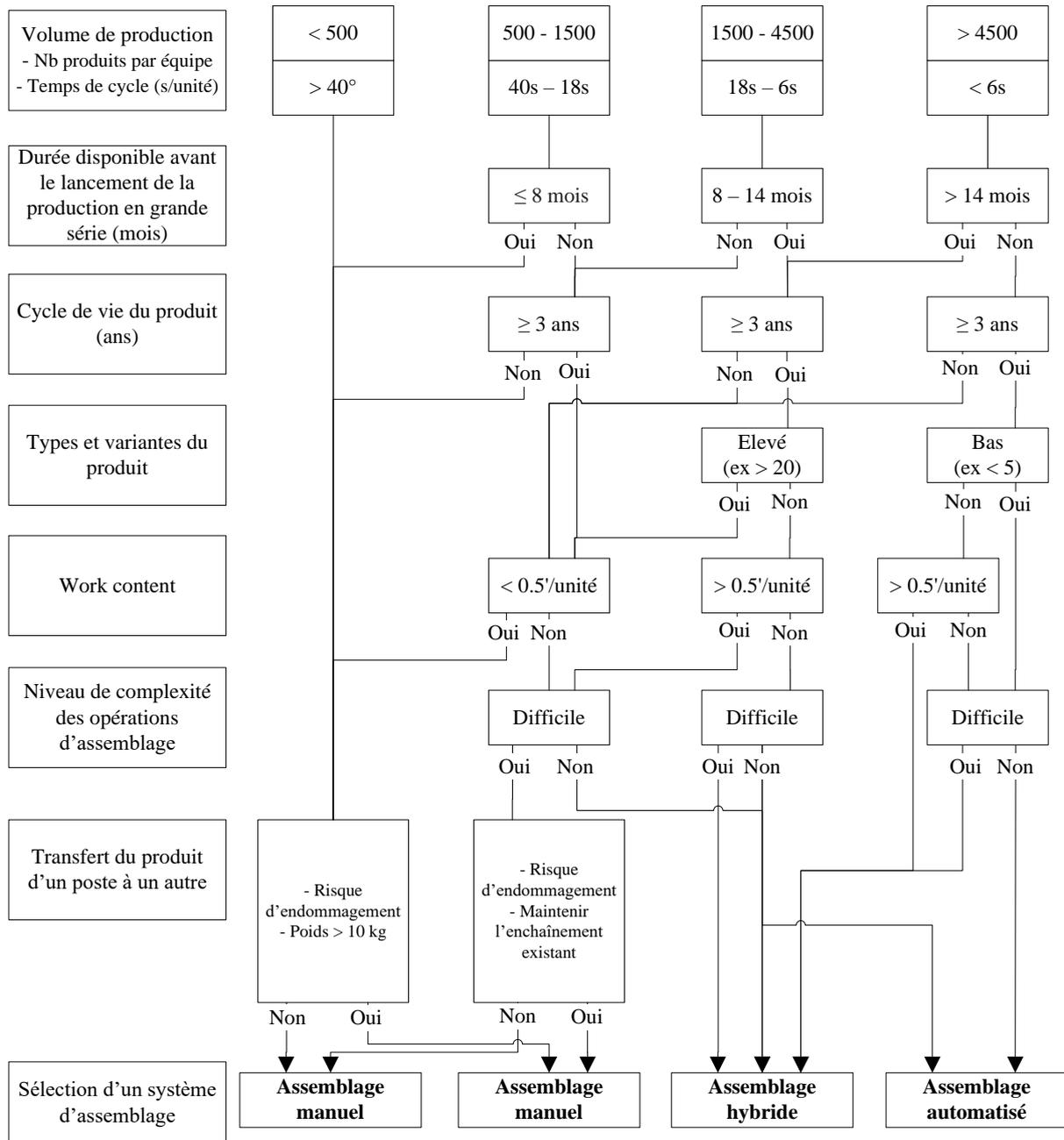
Annexe 1 : Méthode proposée par Parasuraman, Sheridan et Wickens



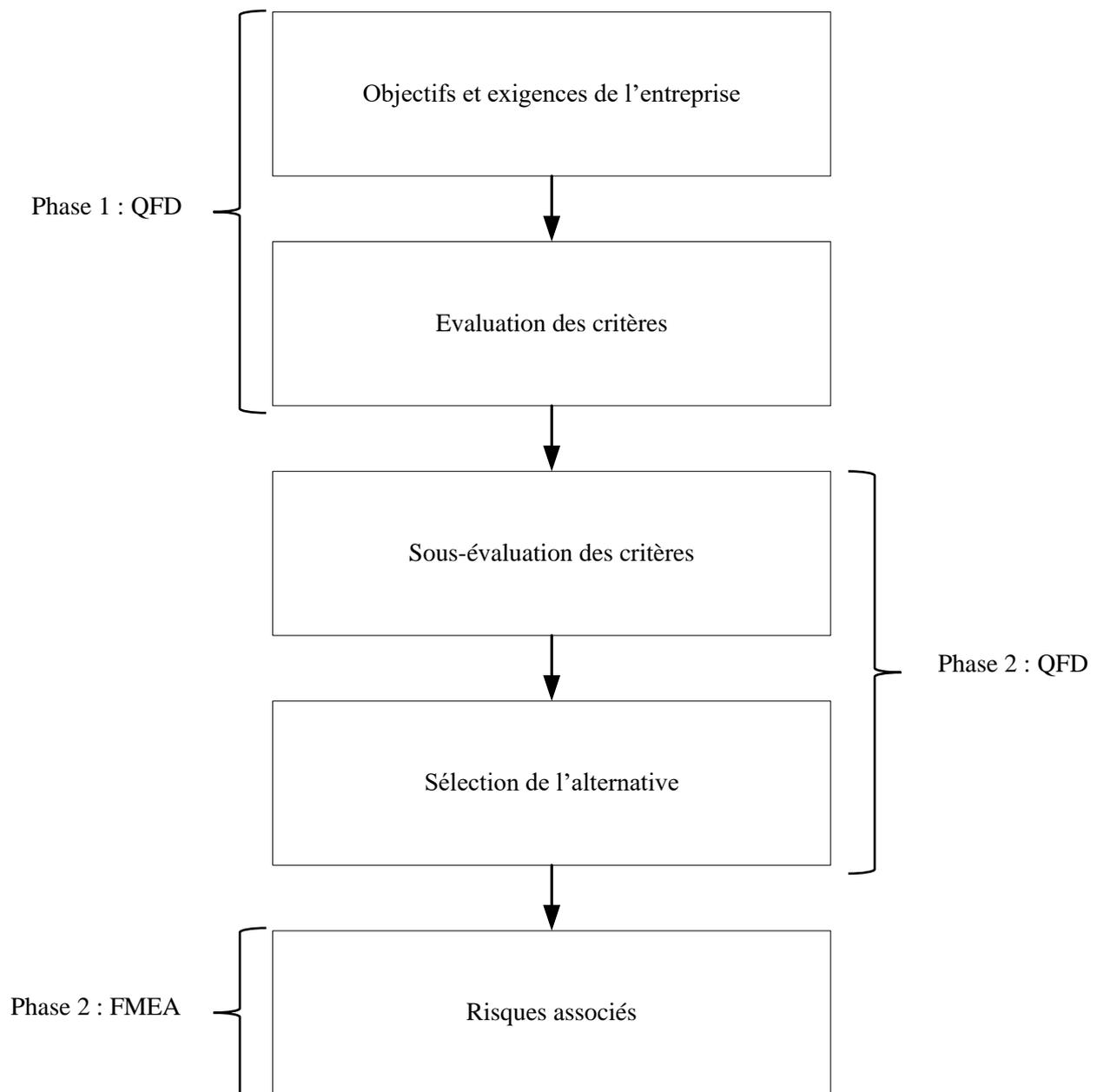
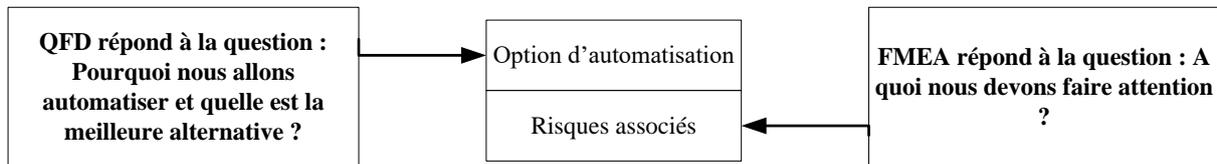
Annexe 2 : Méthode développée par Ross



Annexe 3 : Méthode développée par Konold et Reger



Annexe 4 : Méthode proposée par Almannai, Greenough et Kay



Annexe 5 : Méthode développée par Boothroyd

			NP = 1 (Produit unique sans des variations dans la demande)								Produits similaires	Variétés de produits
			(NT < 1.5 NA) et (ND < 0.5 NA)				(NT ≥ 1.5 NA) ou (ND ≥ 0.5 NA)					
			RI ≥ 5	5 > RI > 2	2 ≥ RI ≥ 1	RI < 1	RI ≥ 5	5 > RI > 2	2 ≥ RI ≥ 1	RI < 1		
			0	1	2	3	4	5	6	7		
VS > 0.65 millions de produits	NA ≥ 16	0	AF	AF	AF	MM (AF)	AP	AP	AP (MM)	MM	MA (AP)	MA
	7 ≤ NA ≤ 15	1	AF	AF (AI)	AI (AF)	MM (AI)	AP	AP	MM (AP)	MM	MA	MA
	NA ≤ 6	2	AI	AI	AI	AI	AI	AI (AP)	MM	MM	MA	MA
0.4 ≤ VS ≤ 0.6 millions de produits	NA ≥ 16	3	AP	AP	MM (AP)	MM	AP	AP	AP	MA (MM)	MA	MA
	7 ≤ NA ≤ 15	4	AI	AI	AI	MM	AP	AP	MM (AP)	MA (MM)	MA	MA
	NA ≤ 6	5	AI	AI	MM (AI)	MM	AI (MM)	MM	MM	MA (MM)	MA	MA
0.2 ≤ VS ≤ 0.4 millions de produits	NA ≥ 16	6	AP	AP	MM	MM	AP	AP	AP	MA	MA	MA
	7 ≤ NA ≤ 15	7	AI (MM)	MM	MM	MM	AP	MM	MA (MM)	MA	MA	MA
	NA ≤ 6	8	MM	MM	MM	MM	MM	MM	MA (MM)	MA	MA	MA
VS ≤ 0.2 millions de produits		9	MM	MM	MM (MA)	MM	MM	MA	MA	MA	MA	MA

Avec :

- ND Nombre de pièces dont le Design a été changé durant les trois premières années
- NP Nombre de modèles de produits différents à assembler sur la ligne
- NA Nombre total de pièces à assembler
- NT Nombre total de pièces qui concernent les différents modèles de la ligne
- VS Volume de production annuel par équipe
- RI Potentiel d'investissement dans l'automatisation
- AI Assemblage automatisé qui utilise des machines à indexation
- AF Assemblage automatisé qui utilise des machines de transfert libre (*free-transfert machines*)
- AP Assemblage automatisé avec chargement des pièces en manuel
- AR Assemblage automatisé avec deux bras
- MA Assemblage manuel
- MM Assemblage manuel avec assistance mécanique

Annexe 6 : Grille d'évaluation RULA

RULA - FEUILLE D'ANALYSE

RULA: a survey method for the investigation of work-related upper limb disorders, McAtamney & Corlett, Applied Ergonomics 1993, 24(2), 91-99

A. Analyse du bras et du poignet

Etape 1 : position de l'épaule

Etape 1a: Ajustez :
 - Epaule levée : +1
 - Bras en abduction : +1
 - Si le bras est soutenu ou la personne est penchée : -1

Etape 2 : Position du coude

Etape 2a: Ajustez :
 - Si avant bras en abduction : ajoutez 1.

Etape 3 : Position du poignet

Etape 3a: Ajustez :
 - Déviation dorsale ou cubitale du poignet : ajoutez 1.

Etape 4 : Torsion du poignet

Etape 5 : Score de posture A

Once aux valeurs des étapes 1 à 3, reportez le score dans la table A.

Etape 6 : Activité musculaire

Si la posture est maintenue statique pendant plus de 10 minutes ou si l'action est répétée plus de quatre fois par minute, ajoutez 1.

Etape 7 : Score d'effort et de charge

Charge inférieure à 2 kg (par intermittence) : 0
 Charge entre 2 et 10 kg (par intermittence) : +1
 Charge entre 2 et 10 kg (posture statique ou répétitive) : +2
 Charge supérieure à 10 kg (par intermittence) ou élevée : +3

Etape 8 : Score poignet et bras

Ajoutez les valeurs des étapes 5 à 7 pour obtenir le score Poignet et bras correspondant aux lignes de la table C.

SCORES

Table A : Score de posture Poignet

Epaule	Coude	Torsion du poignet						
		1	2	3	4			
1	1	1	2	2	2	3	3	3
	2	2	2	2	2	3	3	3
	3	2	3	3	3	3	4	4
2	1	2	3	3	3	4	4	4
	2	2	3	3	3	4	4	4
	3	3	4	4	4	4	5	5
3	1	3	3	4	4	4	5	5
	2	3	4	4	4	4	5	5
	3	4	4	4	4	5	5	5
4	1	4	4	4	4	5	5	5
	2	4	4	4	4	5	5	5
	3	4	4	4	4	5	5	6
5	1	5	5	5	5	6	6	7
	2	5	6	6	6	7	7	7
	3	6	6	6	7	7	7	8
6	1	7	7	7	7	8	8	8
	2	8	8	8	8	8	9	9
	3	9	9	9	9	9	9	9

Table B: Posture du tronc

Score Nuque	Score Tronc				
	1	2	3	4	5
1	1	2	2	3	3
2	2	3	3	4	4
3	3	3	4	5	5
4	4	4	5	6	6
5	5	5	6	7	7
6	6	6	7	8	8

Table C: Score nuque, tronc et jambes

Score bras et poignet	Score nuque, tronc et jambes						
	1	2	3	4	5	6	7
1	1	2	3	3	4	5	5
2	2	2	3	4	4	5	5
3	3	3	3	4	4	5	6
4	3	3	3	4	5	6	6
5	4	4	4	5	6	7	7
6	4	4	5	6	7	7	7
7	5	5	6	7	7	7	7
8	5	5	6	7	7	7	7

Interprétation du résultat (score final, table C)

1 ou 2 = posture acceptable
 3 ou 4 = risque faible, intervention nécessaire si autre source
 5 ou 6 = risque élevé, intervention et modifications nécessaires
 7 = risque très élevé, intervention et modifications immédiates requises

B. Analyse du tronc de la nuque et des jambes

Etape 9 : Position de la nuque

Etape 9a: Ajustez :
 - Rotation de la tête : +1
 - Inclinaison de la tête : +1

Etape 10 : position du tronc

Etape 10a: Ajustez :
 - Rotation de tronc :
 - Inclinaison du tronc

Etape 11 : Jambes

Si les pieds et les jambes sont soutenus : 1
 Sinon : 2

Etape 12 : Score de posture B

Once aux valeurs des étapes 9 à 11, reportez le score dans la table B.

Etape 13 : Activité musculaire

Si la posture est maintenue statique pendant plus de 10 minutes ou si l'action est répétée plus de quatre fois par minute, ajoutez 1.

Etape 14 : Score d'effort et de charge

Charge inférieure à 2 kg (par intermittence) : 0
 Charge entre 2 et 15 kg (par intermittence) : +1
 Charge entre 2 et 15 kg (posture statique ou répétitive) : +2
 Charge supérieure à 15 kg (par intermittence) ou élevée : +3

Etape 15 : Score nuque, tronc et jambes

Ajoutez les valeurs des étapes 12 à 14 pour obtenir le score nuque, tronc et jambes, correspondant aux colonnes de la table C.

Score Final

Tâche considérée : _____ Analyse : _____ Date: / / _____

This tool is provided without warranty. The author has provided this tool as a simple means for applying the concepts provided in RULA. © JRM Neve Consulting, Inc. Fourni par Practical Ergonomics Traduction Française : P.MERCIER, A.S.T.A.V. (darken@ergonomart.com) (916) 444-1867

Annexe 7 : Feuille de score MAC

MAC feuille de score	Insérer la couleur et le score pour chacun des facteurs de risque ci-dessous en vous référant à votre évaluation, à l'aide de l'outil							
Entreprise : Description de la tâche :	Facteurs de risque	Couleur			Score			
		Lev	Port	Lev gr	Lev	Port	Lev gr	
		Poids de la charge et fréquence de levage/port						
		Distance entre les mains et le bas du dos						
	Zone verticale de levage							
○ Il y a des antécédents d'incidents lors de cette tâche.	Torsion ou inclinaison latérale du tronc							
○ La tâche est pénible	Contraintes posturales							
○ Les personnes effectuant ce travail montrent des signes qu'elles les trouvent	Prise de la charge							
○ Les personnes effectuant ce travail montrent des signes qu'elles les trouvent	Etat du sol							
○ Les personnes effectuant ce travail montrent des signes qu'elles les trouvent	Autres facteur environnementaux							
○ Les personnes effectuant ce travail montrent des signes qu'elles les trouvent	Distance sur laquelle la charge est portée							
○ Les personnes effectuant ce travail montrent des signes qu'elles les trouvent	Obstacles en route (transport)							
Date :	Communication et coordination							
Signature :	Autres facteurs de risque, par exemple facteurs individuels, facteurs psychosociaux	Score total						

Annexe 8 : Checklist de Keyserling

Force		0	X	XX
1	<p>Effort pour lever, porter, pousser/tirer des objets de plus de 4.5kg Répondre également « oui » à cette question lorsque le travailleur effectue un effort de traction ou de torsion sur un équipement avec une force statique soutenue (ex : chariots à main, ou outils, objets ou appareils fixes suspendus) une élingue).</p>			
2	<p>Prise d'objets ou outils dont la surface est lisse ou glissante ou dont la prise est difficile</p>			
3	<p>Pression ou poussée avec le bout de doigts ou le pouce Le bout des doigts est la partie du doigt incluant l'empreinte digitale et le bout distal de l'ongle. Répondre « oui » si le doigt ou le pouce est utilisé avec force pour placer un couvercle, une attache, une capsule ou si le doigt ou le pouce est utilisé pour pousser un bouton avec une force de plus de 1 kg. Ne pas répondre « oui » pour des tâches nécessitant des forces légères telles que celle de coller une étiquette.</p>			
4	<p>Gêne occasionnée par le port éventuel de gants Les gants peuvent gêner la prise s'ils sont trop épais, trop serrant ou limitent le sens du toucher. Interroger le travailleur pour savoir si les gants posent un problème.</p>			
5	<p>Prise ou maintien d'outils ou d'objets dont le poids est supérieur ou égal à 2.7 kg/main Prendre ou maintenir un objet ou un outil qui pèse plus de 2.7 kg par main signifie qu'un objet pesant 2.7 kg ou plus est pris par une seule main, ou qu'un objet pesant 5.4 kg ou plus est pris par les 2 mains. Si l'objet est suspendu, alors la réponse est « non ».</p>			

Annexe 9 : Grille d'évaluation des 6 paramètres de la méthode Strain Index

Intensité		Durée effort (% cycle)		Nombre efforts/min		Posture		Vitesse		Durée de la tâche en heure	
coef		coef		coef		coef		coef		coef	
Léger	1	< 10%	0.5	< 3	0.5	Très bonne	1.0	Très faible	1.0	< 1	0.25
Un peu dur	3	10 – 29%	1.0	4 – 8	1.0	Bonne	1.0	Faible	1.0	1 – 2	0.5
Dur	6	30 – 49%	1.5	9 – 14	1.5	Moyenne	1.5	Moyenne	1.0	2 – 4	0.75
Très dur	9	50 – 79%	2.0	15 – 19	2.0	Mauvaise	2.0	Rapide	1.5	4 – 8	1.0
Proche max	13	>80%	3.0	> 20	3.0	Très mauvaise	3.0	Très rapide	2.0	> 8	1.5

Annexe 10 : Analyse des différentes méthodes d'évaluation de l'ergonomie

Méthodes	Principes	Type	Facteurs étudiés					
			Efforts	Postures	Nuque	Tronc	Bras	Jambes
RULA	Evaluation de tous les membres du corps. Calcul d'un score pour définir si un risque se présente en appliquant une tâche.	Quantitative	X	X	X	X	X	X
NIOSH	Calcul des limites de poids à soulever ou à décharger	Quantitative	X	X		X		
MAC	Evaluation du risque des opérations de levage, manutention et de transport. Identification de la manutention manuelle à risque.	Quantitative						
KYSERLING	Checklist pour identifier le risque associé à des postures inconfortables des membres inférieurs, du tronc et du cou.	Semi-quantitative	X	X		X		X
Strain Index	Calcul d'un score pour identification des postes à risque	Critères quantitatifs et qualitatifs		X			X	
OWAS	Identification de la fréquence et le temps passé dans les postures prises en effectuant une tâche donnée. Etude et évaluation de la situation, et proposition des actions correctives	Qualitative	X	X			X	X
OCRA	Evaluation des facteurs de risque: fréquence et répétitivité des mouvements; la force, types de mouvements et postures, temps de récupération ...	Quantitative	X	X	X	X	X	

Annexe 11 : Etude de cas n°1 : Matrice de précédence

N° absolu pièce	2PM0 A61D	2PM0 A61G	2PM0 A63G	2PM0 A64G	2PM0 A65D_1	2PM0 A65D_2	2PM0 A65G	2PM0 A66G	2PM0 A68G	2PM0 A69G	2PM0 A70G	2PM0 B72G	2PM0 B75G	2PM0 B77G	2PM0 B78G	2PM0 B79G	2PM0 B80G	2PM0 B82G	2PM0 B84G	2PM0 C86G	2PM0 C87G	2PM0 C88G	2PM0 C91G	2PM0 C92G	2PM0 C94D
2PM0 A61D																									
2PM0 A61G	X																								
2PM0 A63G		X																							
2PM0 A64G			X																						
2PM0 A65D_1				X			X		X																
2PM0 A65D_2				X			X		X																
2PM0 A65G						X													X	X		X			
2PM0 A66G				X																					
2PM0 A68G								X																	
2PM0 A69G								X	X																
2PM0 A70G									X																
2PM0B 72G										X															
2PM0B 75G										X	X														
2PM0B 77G					X	X													X	X		X			
2PM0B 78G												X													
2PM0B 79G														X											
2PM0B 80G															X										
2PM0B 82G																X									
2PM0B 84G					X																				
2PM0 C86G																			X				X		
2PM0 C87G						X													X	X		X			
2PM0 C88G																			X				X		
2PM0 C91G																X									
2PM0 C92G									X										X		X	X			
2PM0 C94D																								X	

Annexe 12 : Etude de cas n°1 : Regroupement d'opérations

NA = 0	NA = 1	NA = 2	NA = 3	NA = 4	NA = 5	NA = 6	NA = 7	NA = 8	NA = 9
STR - DEPOSE MOTEUR + KIT 1 - H1200	STR - PICKING BV - H1200	"STR - ACCOSTAGE BV H1400"	SERRAGE BV - H1400	CHAPE BIELLETTE - H1400	CONVERT+ FAA + IMPACTEUR - H1400	SERRAGE CONVERTISEUR -H1400	SUPPORT COMPRESSEUR	STR - VISS FILTRE + RACCORD RAS	"CABLE POSITIF - H0700"
							SUPPORT ALTERNATEUR	COMPRESSEUR	
							DEMARREUR		

NA = 10	NA = 11	NA = 12	NA = 13	NA = 14	NA = 15	NA = 16	NA = 17
MEP PRECATA - H0700	MEP + FIX PRECATA - H0700	SUPPORT CIRCUIT UREE + CAPTEUR OXYGENE	ARRET GAINÉ + COMELEC	ECRAN THERMIQUE - H0700	CABLE NEG	PALIER TRANSMISSION	PQG ADA - CTRL HAM - H0700
					GALET TENDEUR DYNAMIQUE	ALTERNATEUR	
						SMIG	
						DOSEUR	

Annexe 13 : Etude de cas n°2 : Matrice de précédence

N° absolu pièce	2MV2A 02S	2MV2A 03S	2MV2A 04S	2MV2A 05S	2MV2A 06S	2MV2A 07D	2MV2A 08D	2MV2A 09D	2MV2A 10D	2MV2A 11D	2MV3A 01G	2MV2A 13S	2MV2A 14S	2MV2A 16D	2MV3A 03D	2MV2A12 D_1
2MV2A02 S																
2MV2A03 S	X															
2MV2A04 S		X														
2MV2A05 S			X													
2MV2A06 S				X												
2MV2A07 D					X											
2MV2A08 D						X										
2MV2A09 D							X									
2MV2A10 D								X								
2MV2A11 D									X							
2MV3A01 G									X							
2MV2A13 S										X						
2MV2A14 S										X						
2MV2A16 D												X	X			
2MV3A03 D									X						X	
2MV2A12 D_1										X						X
2MV2A12 D_2										X						X
2MV3A02 D														X	X	
2MV3A06 D																X
2MV3A07 G_2																X
2MV3A08																X

D_2																	
2MV3A04 G														X	X		
2MV3A07 G_1																	
2MV3A08 D_1																	
2MV3A05 D																	
2MV3B09 D								X	X							X	
2MV3B09 G								X	X							X	
2MV3B11 D																	
2MV3B11 G																	
2MV3B14 D																	
2MV3B14 G																	
2MV3B16 G																	

N° absolu pièce	2MV2A1 2D_2	2MV3A 02D	2MV3A 06D	2MV3A0 7G_2	2MV3A0 8D_2	2MV3A 04G	2MV3A0 7G_1	2MV3A0 8D_1	2MV3A 05D	2MV3B 09D	2MV3B 09G	2MV3B 11D	2MV3B 11G	2MV3B 14D	2MV3B 14G	2MV3B 16G
2MV2A02S																
2MV2A03S																
2MV2A04S																
2MV2A05S																
2MV2A06S																
2MV2A07D																
2MV2A08D																
2MV2A09D																
2MV2A10D																
2MV2A11D																
2MV3A01G																
2MV2A13S																
2MV2A14S																
2MV2A16D																

2MV3A03D																	
2MV2A12D_1																	
2MV2A12D_2																	
2MV3A02D																	
2MV3A06D																	
2MV3A07G_2																	
2MV3A08D_2																	
2MV3A04G		X															
2MV3A07G_1			X														
2MV3A08D_1			X														
2MV3A05D						X											
2MV3B09D				X	X		X	X									
2MV3B09G				X	X		X										
2MV3B11D										X	X						
2MV3B11G										X	X						
2MV3B14D												X	X				
2MV3B14G												X	X				
2MV3B16G														X	X		

Annexe 14 : Etude de cas n°2 : Regroupement d'opérations

NA = 0	NA = 1	NA = 2	NA = 3	NA = 4	NA = 5	NA = 6	NA = 7	NA = 8
KIT	TUYAU EAU MASSE	RESSORTS	BERCEAU	CHAUDIERE	COMPARTIMENT MOTEUR	BATTERIE	CALCULATEUR	TRAVERSE

NA = 9	NA = 10	NA = 11	NA = 12	NA = 13	NA = 14	NA = 15	NA = 16	NA = 17	NA = 18
POUTRE AR	DEFLECTEU R AR	REMPLISSAG E CARBURANT	ARMATURE	CENTRAL SUPPORT PARE CHOC AR	REMPLISSAG E REFRI	VOLET	PARE BOUE D	ROUE D	SIEGE
POUTRE AV	DEFLECTEU R AV		COLLECTEU R	ABSORBEUR INF PARE CHOC AV		PARE CHOC G	PARE BOUE G	ROUE G	
				GOULOTTE REMPLISSAG E		PARE CHOC D			
				GRILLE AUVENT					
				PROJECTEUR G					
				PROJECTEUR D					

Annexe 15 : Application de la méthode AHP pour calculer les poids des paramètres volume et variabilité

- Comparaison des critères

Il a été défini que Vol 1, Vol 2 et Vol 3 (respectivement Vri 1, Vri 2, Vri 3) ont la même importance.

	Vol 1	Vol 2	Vol 3	Vri 1	Vri 2	Vri 3
Vol 1	1	1	1	7	7	7
Vol 2	1	1	1	7	7	7
Vol 3	1	1	1	7	7	7
Vri 1	1/7	1/7	1/7	1	1	1
Vri 2	1/7	1/7	1/7	1	1	1
Vri 3	1/7	1/7	1/7	1	1	1
Somme	3,43	3,43	3,43	24	24	24

- Normalisation des critères

Chaque valeur de comparaison est divisée par la somme

	Vol 1	Vol 2	Vol 3	Vri 1	Vri 2	Vri 3
Vol 1	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29
Vol 2	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29
Vol 3	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29
Vri 1	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
Vri 2	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
Vri 3	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04

- Calcul des poids

Pour chaque critère, le poids est calculé en divisant la somme des valeurs normalisées par 6.

6 étant le nombre des critères à évaluer.

	Vol 1	Vol 2	Vol 3	Vri 1	Vri 2	Vri 3	Poids critères
Vol 1	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29
Vol 2	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29
Vol 3	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29
Vri 1	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
Vri 2	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
Vri 3	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04

Vol 1, Vol 2 et Vol 3 (respectivement Vri 1, Vri 2 et Vri 3) ont la même importance. Ainsi les poids du volume et de la variabilité sont :

$$P_{Vol} = 3 \times 0,29 = 0,87$$

$$P_{Vri} = 3 \times 0,04 = 0,13$$

Annexe 16 : Evaluation de la flexibilité des solutions

- Solution 1

Tableau d'évaluation du volume et de la variabilité

Volume	Vol1	5
	Vol2	1
	Vol3	1
Variabilité	Vri1	2
	Vri2	4
	Vri4	4

Score flexibilité en se basant sur l'équation (15) du chapitre III = 3,20

- Solution 2

Volume	Vol1	5
	Vol2	1
	Vol3	1
Variabilité	Vri1	2
	Vri2	4
	Vri4	3

Score flexibilité = 2,91

- Solution 3

Volume	Vol1	4
	Vol2	1
	Vol3	1
Variabilité	Vri1	2
	Vri2	3
	Vri4	4

Score flexibilité = 2,87

- Solution 4

Volume	Vol1	4
	Vol2	1
	Vol3	1
Variabilité	Vri1	2
	Vri2	3
	Vri4	3

Score flexibilité = 2,58

Annexe 17 : Application de la méthode AHP pour le choix d'une solution technique

1. Evaluation des solutions par le critère Coût

Si la différence de coûts > 20% → Importance = 9

Si 15% < la différence de coûts < 20% → 7 < Importance < 5

Si 10% < la différence de coût < 15% → 4 < Importance < 3

Si la différence < 10% → Importance = 2

- Comparaison des solutions

	Sol 1	Sol 2	Sol 3	Sol 4
Sol 1	1	1/5	1/3	1/9
Sol 2	5	1	2	1/7
Sol 3	3	1/2	1	1/9
Sol 4	9	7	9	1
Somme	18,00	8,70	12,33	1,37

- Normalisation des critères

	Sol1	Sol 2	Sol 3	Sol 4
Sol 1	0,06	0,02	0,03	0,08
Sol 2	0,28	0,11	0,16	0,10
Sol 3	0,17	0,06	0,08	0,08
Sol 4	0,50	0,80	0,73	0,73

- Calcul des poids

	Sol 1	Sol 2	Sol 3	Sol- 4	Poids critères
Sol1	0,06	0,02	0,03	0,08	0,05
Sol2	0,28	0,11	0,16	0,10	0,16
Sol3	0,17	0,06	0,08	0,08	0,10
Sol4	0,50	0,80	0,73	0,73	0,69

- Vérification de la cohérence des résultats

Etape 1 : Multiplier chaque score de comparaison des critères par le poids puis calculer la somme

Etape 2 : Calculer un Ratio en divisant la somme calculée par le poids de chaque critère

	Sol 1	Sol 2	Sol 3	Sol 4	Somme	Poids critères	Ratio
Sol 1	0,05	0,03	0,03	0,08	0,19	0,05	4,04
Sol 2	0,23	0,16	0,19	0,10	0,69	0,16	4,19
Sol 3	0,14	0,08	0,10	0,08	0,40	0,10	4,10
Sol 4	0,42	1,15	0,87	0,69	3,14	0,69	4,53

Etape 3 : Calculer le ratio de cohérence (CR) et vérifier qu'il est inférieur à 0,1

$$\lambda_{max} = \frac{4,04 + 4,19 + 4,10 + 4,53}{4} = 4,22$$

$$CI = \frac{\lambda_{max} - 4}{3} = 0,07$$

$$CR = \frac{CI}{0,9} = 0,08 < 0,1$$

2. Evaluation des solutions par le critère Ergonomie

Si le niveau d'ergonomie est le même → Importance = 1

Si le niveau d'ergonomie est différent → Importance = 5

- Comparaison des solutions

	Sol 1	Sol 2	Sol 3	Sol 4
Sol 1	1	5	1	5
Sol 2	1/5	1	1/5	1
Sol 3	1	5	1	5
Sol 4	1/5	1	1/5	1
Somme	2,40	12,00	2,40	12,00

- Normalisation des critères

	Sol 1	Sol 2	Sol 3	Sol 4
Sol 1	0,42	0,42	0,42	0,42
Sol 2	0,08	0,08	0,08	0,08
Sol 3	0,42	0,42	0,42	0,42
Sol 4	0,08	0,08	0,08	0,08

- Calcul des poids

	Sol 1	Sol 2	Sol 3	Sol 4	Poids critères
Sol 1	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42
Sol 2	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
Sol 3	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42
Sol 4	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08

- Vérification de la cohérence des résultats

	Sol 1	Sol 2	Sol 3	Sol 4	Somme	Poids critères	Ratio
Sol 1	0,42	0,42	0,42	0,42	1,67	0,42	4,00
Sol 2	0,08	0,08	0,08	0,08	0,33	0,08	4,00
Sol 3	0,42	0,42	0,42	0,42	1,67	0,42	4,00
Sol 4	0,08	0,08	0,08	0,08	0,33	0,08	4,00

$$\lambda_{max} = 4,00$$

$$CR = 0 < 0,1$$

3. Evaluation des solutions par le critère Maturité technologique

Si la différence de maturité > 20% → Importance = 9

Si 15% < la différence de maturité < 20% → 7 < Importance < 5

Si 10% < la différence de maturité < 15% → Importance = 5

Si 5% < la différence de maturité < 10% → 4 < Importance < 5

Si la différence de maturité < 5% → 2 < Importance < 3

- Comparaison des critères

	Sol 1	Sol 2	Sol 3	Sol 4
Sol 1	1	1/4	1/5	1/6
Sol 2	4	1	1/3	1/4
Sol 3	5	3	1	1/3
Sol 4	1/4	5	3	1
Somme	10,25	9,25	4,53	1,75

- Normalisation des critères

	Sol 1	Sol 2	Sol 3	Sol 4
Sol 1	0,10	0,03	0,04	0,10
Sol 2	0,39	0,12	0,07	0,14
Sol 3	0,49	0,36	0,22	0,19
Sol 4	0,02	0,48	0,66	0,57

- Calcul des poids des critères

	Sol 1	Sol 2	Sol 3	Sol 4	Poids critères
Sol 1	0,10	0,03	0,04	0,10	0,07
Sol 2	0,39	0,12	0,07	0,14	0,18
Sol 3	0,49	0,36	0,22	0,19	0,32
Sol 4	0,02	0,48	0,66	0,57	0,44

- Vérification de la cohérence des résultats

	Sol 1	Sol 2	Sol 3	Sol 4	Somme	Poids critères	Ratio
Sol 1	0,07	0,05	0,06	0,07	0,25	0,07	3,71
Sol 2	0,27	0,18	0,11	0,11	0,66	0,18	3,65
Sol 3	0,33	0,55	0,32	0,15	1,34	0,32	4,25
Sol 4	0,02	0,73	0,95	0,44	2,13	0,44	4,88

$$\lambda_{max} = 4,12$$

$$CR = 0,05 < 0,1$$

4. Evaluation des solutions par le critère Flexibilité

- Comparaison des critères

	Sol 1	Sol 2	Sol 3	Sol 4
Sol 1	1	1/5	1/5	1/8
Sol 2	5	1	1/2	1/6
Sol 3	5	2	1	1/5
Sol 4	8	6	5	1
Somme	19,00	9,20	6,70	1,49

- Normalisation des critères

	Sol 1	Sol 2	Sol 3	Sol 4
Sol 1	0,05	0,02	0,03	0,08
Sol 2	0,26	0,11	0,07	0,11
Sol 3	0,26	0,22	0,15	0,13

Sol 4	0,42	0,65	0,75	0,67
--------------	------	------	------	------

- Calcul des poids des critères

	Sol 1	Sol 2	Sol 3	Sol 4	Poids critères
Sol 1	0,05	0,02	0,03	0,08	0,05
Sol 2	0,26	0,11	0,07	0,11	0,14
Sol 3	0,26	0,22	0,15	0,13	0,19
Sol 4	0,42	0,65	0,75	0,67	0,62

- Vérification de la cohérence des résultats

	Sol 1	Sol 2	Sol 3	Sol 4	Somme	Poids critères	Ratio
Sol 1	0,05	0,03	0,04	0,08	0,19	0,05	4,06
Sol 2	0,24	0,14	0,10	0,10	0,57	0,14	4,11
Sol 3	0,24	0,28	0,19	0,12	0,83	0,19	4,34
Sol 4	0,38	0,84	0,95	0,62	2,79	0,62	4,48

$$\lambda_{max} = 4,25$$

$$CR = 0,09 < 0,1$$

5. Evaluation finale des solutions

- Comparaison des critères

	Coût	Ergonomie	Maturité technologie	Flexibilité
Coût	1	4	2	3
Ergonomie	1/4	1	1/3	2
Maturité technologie	1/2	3	1	3
Flexibilité	1/3	0,5	1/3	1
Somme	2,08	8,50	3,67	9

- Normalisation des critères

	Coût	Ergonomie	Maturité technologie	Flexibilité
Coût	0,48	0,47	0,55	0,33
Ergonomie	0,12	0,12	0,09	0,22
Maturité technologie	0,24	0,35	0,27	0,33
Flexibilité	0,16	0,06	0,09	0,11

- Calcul des poids des critères

	Coût	Ergonomie	Maturité technologie	Flexibilité	Poids critères
Coût	0,48	0,47	0,55	0,33	0,46
Ergonomie	0,12	0,12	0,09	0,22	0,14
Maturité technologie	0,24	0,35	0,27	0,33	0,30
Flexibilité	0,16	0,06	0,09	0,11	0,11

- Vérification de la cohérence des résultats

	Coût	Ergonomie	Maturité technologie	Flexibilité	Somme	Poids critères	Ratio
Coût	0,46	0,55	0,60	0,32	1,92	0,46	4,21
Ergonomie	0,11	0,14	0,10	0,21	0,56	0,14	4,08
Maturité technologie	0,23	0,41	0,30	0,32	1,26	0,30	4,19
Flexibilité	0,15	0,07	0,10	0,11	0,43	0,11	4,05

$$\lambda_{max} = 4,13$$

$$CR = \frac{CI}{0,9} = 0,05 < 0,1$$

Méthodologie d'organisation d'une ligne de montage véhicules basée sur l'analyse des variantes d'automatisation des opérations dans un contexte de production multi- modèles

Résumé

Afin de garantir une meilleure compétitivité sur le marché, il est devenu crucial de bien maîtriser son processus de production. Cela implique de faire des choix appropriés concernant la conception et l'automatisation. Ainsi, le travail de recherche a pour but de proposer une méthodologie d'aide à la décision pour améliorer le niveau d'automatisation des chaînes de montage automobile. Pour répondre à ce besoin, une analyse des travaux de recherche existants a été réalisée. Il en résulte qu'aucune des approches trouvées dans la littérature ne répond parfaitement à la problématique de recherche. D'autant plus qu'aucune des méthodes ne traite l'aspect du regroupement d'opérations et de l'équilibrage de la ligne. Ainsi, il a été essentiel de présenter une nouvelle méthodologie répondant aux exigences industrielles. La méthodologie développée comporte six activités qui permettent d'analyser l'ensemble des données d'entrée liées aux gammes de production, à l'architecture de l'usine ou encore à la conception des produits. Moyennant plusieurs critères de regroupements définis, la méthodologie permet d'étudier les contraintes de précédence et de proposer ainsi des regroupements d'opérations. Une fois, les regroupements d'opérations effectués, plusieurs scénarios d'automatisation sont proposés. Ainsi, afin de déterminer celui qui respecte le plus la vision de l'industriel, plusieurs critères de sélection ont été définis et quantifiés. L'applicabilité de la méthodologie a été vérifiée sur trois études de cas industriel en coopération avec notre partenaire.

Mots clés : Automatisation, Méthodologie d'aide à la décision, Regroupement d'opérations.

Abstract

In order to guarantee a better competitiveness on the market, it has become crucial to have the production process under control. This implies making appropriate choices regarding design and automation. Thus, the aim of this research work is to propose a decision support methodology to improve the level of automation of automotive assembly lines. In order to meet this need, an analysis of existing research works was carried out. The result is that none of the approaches found in the literature perfectly meet the research problem. Moreover, none of the methods deal with the aspect of the grouping of operations and the balancing of the line. Consequently, it was essential to present a new methodology that meets the industrial requirements. The methodology developed includes six activities that allow the analysis of all input data related to production lines, plant architecture or product design. By means of several defined grouping criteria, the methodology allows to study the precedence constraints and to propose operation groupings. Once the groupings of operations are made, several automation scenarios are proposed. Therefore, in order to determine which one better respects the industrial's vision, several selection criteria have been defined and quantified. The applicability of the methodology was verified on three industrial case studies in cooperation with our partner.

Keywords : Automation, Decision method methodology, Grouping of operations.