THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ GRENOBLE ALPES

École doctorale : I-MEP² - Ingénierie - Matériaux, Mécanique, Environnement, Energétique, Procédés, Production
Spécialité : GI - Génie Industriel : conception et production
Unité de recherche : Laboratoire des Sciences pour la Conception, l'Optimisation et la Production de Grenoble

Les apports des pratiques Lean, de la digitalisation et de l'optimisation du séquencement pour une production à grande variété et faible volume : application à la fabrication de grues à tour

Contributions of Lean practices, digitalization and sequencing optimization for high-variety, low-volume production : application to the manufacture of tower cranes

Présentée par :

Zineb MRABBAJ

Direction de thèse :

Bernard PENZ PROFESSEUR DES UNIVERSITES, Grenoble INP	Directeur de thèse
Malek MASMOUDI ASSOCIATE PROFESSOR, University of Sharjah	Co-directeur de thèse
Zahir MESSAOUDENE INGENIEUR DOCTEUR, ECAM-LYON	Co-encadrant de thèse

Rapporteurs :

Samir LAMOURI
PROFESSEUR DES UNIVERSITES, ENSAM CER Paris
Jacques LAMOTHE
PROFESSEUR, IMT Mines Albi-Carmaux

Thèse soutenue publiquement le **5 décembre 2024**, devant le jury composé de :

Gülgün ALPAN, PROFESSEURE DES UNIVERSITES, Grenoble INP - UGA	Présidente
Bernard PENZ, PROFESSEUR DES UNIVERSITES, Grenoble INP - UGA	Directeur de thèse
Malek MASMOUDI, ASSOCIATE PROFESSOR, University of Sharjah	Co-directeur de thèse
Samir LAMOURI, PROFESSEUR DES UNIVERSITES, ENSAM CER Paris	Rapporteur
Jacques LAMOTHE, PROFESSEUR, IMT Mines Albi-Carmaux	Rapporteur
Gilles GONCALVES, PROFESSEUR DES UNIVERSITES EMERITE, Université d'Artois	Examinateur

Invités :

Bertrand DEPALE
Manitowoc Crane Group France
Zahir MESSAOUDENE
DOCTEUR EN SCIENCES, ECAM LaSalle - Campus de Lyon

Remerciements

Je souhaite exprimer ma profonde gratitude envers mes directeurs de thèse, M. Bernard Penz, M. Malek Masmoudi et M. Zahir Messaoudene. Leur soutien infaillible, leurs conseils éclairés et leur patience tout au long de cette thèse CIFRE ont été des piliers essentiels qui ont enrichi mon parcours académique et professionnel. Leur expertise combinée et leur engagement ont été essentiels pour la réussite de ce projet de recherche.

Je tiens également à remercier les membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à cette thèse en acceptant de l'évaluer : M. Samir Lamouri et M. Jacques Lamothe, rapporteurs, ainsi que M. Gilles Goncalves et Mme. Gülgün Alpan, examinateurs.

De plus, je suis profondément reconnaissante envers mon encadrant industriel, M. Bertrand Depale, pour m'avoir fait confiance en me confiant un projet si intéressant et stratégique. Ses conseils, son soutien et son management exemplaire m'ont permis de progresser de manière significative, tant sur le plan humain que technique. Grâce à lui, j'ai pu développer des compétences essentielles et acquérir une précieuse expérience professionnelle. Je souhaite aussi remercier tous mes collègues chez Manitowoc avec qui j'ai eu la chance de travailler, et principalement, M. Lionel Meunier, le développeur de l'outil « Easy Planning » qui a évolué progressivement jusqu'à devenir un véritable outil de pilotage pour l'entreprise. Mes années chez Manitowoc resteront un chapitre mémorable de ma vie, riche en apprentissages et en épanouissement professionnel.

Durant ces années de thèse, j'ai eu la joie de devenir maman de deux merveilleux enfants. Je souhaite exprimer toute ma gratitude envers mes parents pour leur soutien constant, leurs encouragements et leur présence.

Enfin, je tiens à adresser un immense merci à mon époux pour sa flexibilité, et ses sacrifices tout au long de ce voyage. Ton amour et ton soutien ont illuminé ce chemin parfois difficile, et je ne pourrai jamais assez te remercier pour tout ce que tu as fait et tu continues de faire pour moi et notre famille.

Résumé :

Cette thèse CIFRE s'inscrit dans le cadre d'une collaboration entre l'entreprise Manitowoc, leader mondial de fabrication de grues, et le laboratoire G-SCOP. Dans cette thèse, nous étudions la problématique de l'entreprise Manitowoc, liée à la gestion complexe de ses processus de production. Cette complexité découle de la grande variété des composants nécessaires pour les postes de montage et de la rigidité du système de convoyage, ce qui entraîne des lead times longs et variables. Malgré l'augmentation du nombre d'opérateurs pour tenter de livrer les clients à temps, cette stratégie n'a permis qu'une amélioration marginale des délais de livraison, tout en dégradant la productivité. Par conséquent, le séquencement s'est avéré en être une des pistes d'amélioration principales.

Le problème de séquencement à traiter est complexe, reconnu et classé comme un problème d'optimisation NP-difficile. De plus, l'étude de terrain a montré les limites des outils de planification existants et la difficulté de fournir manuellement un planning journalier pour l'approvisionnement des postes de montages. Ce séquencement manuel est entravé par l'absence de données fiables et le manque d'informations en temps réel. Cela empêche d'obtenir un bon séquencement et complique la gestion efficace des opérations. D'autres difficultés rendent rapidement obsolètes la planification et le séquencement établis. Principalement le non-respect du séquencement par les opérateurs qui est souvent lié à une optimisation locale, où chaque poste de travail cherche à optimiser ses propres critères de performance, indépendamment des besoins et contraintes des autres ateliers. Les aléas rencontrés en cours de production, tels que les problèmes d'approvisionnement ou les défauts de qualité, s'ajoutent à ces difficultés. Cette situation conduit à une déviation par rapport au séquencement global, provoquant des déséquilibres dans la chaîne de production, des retards de livraison et une baisse de la qualité nécessitant des reprises.

La résolution du problème de séquencement, bien que nécessaire, ne suffit pas à assurer le bon fonctionnement global de l'usine. Un bon séquencement doit être soutenu par une visibilité constante de l'information et une traçabilité des produits tout au long de la chaîne logistique pour être efficace. L'accès en temps réel aux données est essentiel pour une planification précise et pour permettre des réponses rapides aux aléas survenant pendant la production.

De plus, l'exécution du séquencement dépend en grande partie des opérateurs sur le terrain. Leur engagement et leur capacité à suivre le séquencement établi influent directement sur la performance globale de l'usine. L'autonomie et l'apprentissage individuel des opérateurs jouent un rôle clé dans le respect des objectifs de séquencement, tandis que des outils d'aide à la décision avancés peuvent améliorer leur efficacité et leur coopération.

Pour surmonter ces défis et challenges, nous avons proposé une solution performante pour piloter efficacement l'organisation globale de la chaîne logistique. La complexité du problème étudié nécessite l'intégration de trois briques complémentaires et intégrées : **Lean** pour la prise de décision ambivalente (centralisation et décentralisation), **digitalisation intelligente**, et **outils de planification et de séquencement avancés** afin de proposer une solution globale capable d'apporter une réponse pertinente à la problématique étudiée. La contribution majeure de cette thèse réside dans l'intégration de ces trois approches dans des apports harmonieux et complémentaires. L'adoption d'une seule de ces approches ne suffirait pas à optimiser les opérations dans leur ensemble. C'est l'interconnexion et la complémentarité de ces trois domaines qui ont permis d'atteindre des résultats significatifs, en abordant les défis de la production de manière holistique.

Abstract :

This CIFRE thesis is part of a collaboration between Manitowoc, a global leader in crane manufacturing, and the G-SCOP laboratory. In this thesis, we study the complex production process management issues faced by Manitowoc. This complexity arises from the wide variety of components required for the assembly stations and the rigidity of the conveyor system, leading to long and variable lead times. Despite increasing the number of operators to try to deliver to customers on time, this strategy has only resulted in marginal improvements in delivery times while degrading productivity. Consequently, sequencing has been identified as one of the main causes.

The sequencing problem to be solved is complex, recognized and classified as an NP-hard optimization problem. Moreover, field studies have highlighted the limits of existing planning tools and the difficulty of manually providing a daily sequence for supplying assembly stations. This manual sequencing is hampered by the lack of reliable data and real-time information, which prevents effective sequencing and complicates effective operations management. Furthermore, it encounters additional difficulties that quickly render the established planning and sequencing obsolete. Primarily, the non-compliance with sequencing by operators is often linked to local optimization, where each workstation seeks to optimize its own performance criteria, regardless of the needs and constraints of other workshops. The uncertainties encountered during production, such as supply issues or quality defects, add to these difficulties. This situation leads to deviations from the overall sequencing, causing imbalances in the production line, delivery delays, and a decline in quality.

The resolution of the sequencing problem, although necessary, is not sufficient to ensure the overall smooth operation of the factory. Effective sequencing must be supported by constant information visibility and product traceability throughout the supply chain. Real-time data access is essential for accurate planning and for enabling quick responses to any disruptions that occur during production.

Moreover, the execution of the sequencing largely depends on the operators in the field. Their commitment and ability to follow the established sequencing directly impact the overall performance of the factory. The autonomy and individual learning of the operators play a key role in meeting the sequencing objectives, while advanced decision-support tools can enhance their efficiency and cooperation.

To overcome these challenges, we have an efficient and learning management tool for the overall organization of the supply chain. The complexity of the problem studied requires the integration of three complementary and integrated components: Lean Theory for ambivalent decision-making (centralization and decentralization), intelligent digitalization, and advanced planning and sequencing tools. These components form a comprehensive solution capable of providing a relevant response to the problem at hand. The major contribution of this thesis lies in the harmonious and simultaneous integration of these three approaches. Adopting only one of these approaches would not suffice to optimize operations as a whole. It is the interconnection and complementarity of these three domains that have enabled significant results, addressing production challenges in a holistic manner.

Table des matières

Introduction générale 13
Chapitre I : Contexte industriel et problématique 15
I.1 Introduction et objectifs 15
I.2. La grue, un produit complexe 16
I.2.1 Les grues POTAIN et le site industriel de Moulins 16
I.2.2. La grue : un produit à forte personnalisation 16
I.2.2.1 Présentation du produit 17
I.2.2.2. Les éléments de personnalisation des grues Potain 18
I.2.2.2.1 Les caractéristiques de base 18
I.2.2.2.2 Les options spécifiques 18
I.2.2.2.3 Les options communes 19
I.2.3. La chaine logistique et le processus de production global 19
I.2.3.1 La chaine logistique des grues POTAIN 19
I.2.3.2. Le processus de production dans l'usine 22
I.2.3.2.1 L'atelier de soudage 22
I.2.3.2.2 L'atelier de traitement de surface 22
I.2.3.2.3 L'atelier de montage 22
I.2.3.2.4 Le système de manutention 22
I.3. Le périmètre d'étude un haut lieu de contraintes et variabilité 22
I.3.1. Le système physique 23
I.3.1.1 Le système de convoyage 23
I.3.1.2 Le pendage 24
I.3.1.3 Le grenaillage 25
I.3.1.4 La peinture 26
I.3.1.5 Le dépendage 27
I.3.1.6 Le montage 28
I.3.2. Le système décisionnel : planification de la production 30
I.3.2.1. Le processus de planification et de séquencement 30
I.3.2.1.1 La planification : lissage à la semaine 30
I.3.2.1.2 Le Séquencement : lissage quotidien 31
I.3.2.2 Le lancement et suivi de production 32
I.4. La problématique et les contributions attendues 33
I.4.1. L'objectif de Manitowoc et les enjeux scientifiques soulevés 33
I.4.2. Des outils complémentaires et intégrés au service d'un objectif unique 34

I.4.3. Les contributions de la thèse 35
I.5 Conclusion 36
Chapitre II : Critique du Lean pour un environnement de fabrication à grande variété et à faible volume 38
II.1 Introduction et objectifs 38
II.2. Le Lean sur le site industriel de Manitowoc à Moulins : les constats de réussites et d'échecs 39
II.2.1 Cartographie des changements organisationnels de la gestion de performance 39
II.2.2. Les succès majeurs du Lean sur le site de Moulins 42
II.2.2.1 La Transition vers une organisation en flux de valeur 42
II.2.2.2 La transformation des approvisionnements internes par le Lean Kitting 44
II.2.3. Les limites de certaines pratiques Lean sur le site de Moulins 48
II.2.3.1 Le travail standardisé 49
II.2.3.2 La conversion des cellules d'assemblage en ligne d'assemblage 49
II.2.4 Conclusion 51
II.3. Analyse du Lean dans le contexte HMLV 52
II.3.1 Le modèle Lean est-il universel et applicable à tous les contextes ? 54
II.3.2 L'universalité du Lean – Un constat mitigé ? 56
II.3.3 L'inefficacité du modèle Lean pour des environnements de type HMLV 60
II.3.4 Conclusion sur la compatibilité du Lean avec les environnements HMLV : impact des différentes définitions 62
II.4. Analyse du Lean dans le périmètre d'étude 63
II.4.1. Le Lean : Une efficacité conditionnelle et contextuelle 64
II.4.1.1 Problème d'information : Les difficultés de la remontée d'information 64
II.4.1.2 Problème de standardisation : Le manque de travail standardisé dans le chargement des palonniers 66
II.4.1.3 Problème de synchronisation : Les difficultés de synchronisation des flux entre le pendage et le magasin 66
II.4.2. Expérimentation de deux pratiques Lean dans le périmètre d'étude 67
II.4.2.1. Exploration du Kanban 67
II.4.2.1.1 Le *Kanban* 67
II.4.2.1.2 Expérimentation du Kanban 67
II.4.2.1.4 Résultat et discussion 69
II.4.2.2. L'exploration du SMED. 70
II.4.2.2.1 Le *SMED* 70
II.4.2.2.2 Expérimentation du SMED dans le périmètre d'étude. 70
II .4.2.2.3 Résultats et discussion 73

II.4.3 Conclusions sur le Lean dans le cadre du périmètre d'étude et proposition d'une issue complémentaire et synergétique 74

Chapitre III : La digitalisation pour faciliter l'équilibre entre la centralisation et la décentralisation de la prise de décision 78

III.1 Introduction et objectifs 78

III.2. La digitalisation au service de la prise de décision 79

III.2.1. Comment la digitalisation sert de support à la prise de bonnes décisions 80

III.2.1.1 La complexité de la prise de décision dans un environnement HMLV 80

III.2.1.2 : La digitalisation comme remède aux lacunes 80

III.2.2. La digitalisation peut-elle aider à gérer les tensions entre centralisation et décentralisation de la prise de décision? 81

III.2.2.1 Centralisation de la prise de décision facilitée par la digitalisation 81

III.2.2.2 Décentralisation de la prise de décision soutenue par la digitalisation 82

III.2.2.3 Rôle médiateur de la digitalisation pour résoudre les tensions entre la centralisation et la décentralisation de la prise de décision 82

III.3. La digitalisation pour un séquencement centralisé 83

III.3.1. Collecte, analyse et centralisation des données pour un séquencement proactif 83

III.3.1.1 Contexte initial et vulnérabilités du processus de séquencement 83

III.3.1.2 Transition intégrale avec Easy Planning : Le rôle crucial de la digitalisation 85

III.3.2. Automatisation des processus récurrents, et utilisation d'algorithmes avancés 87

III.3.2.1 Gestion de la modification des commandes 87

III.3.2.2 Fiabilisation des délais de livraison promis par les fournisseurs 88

III.3.2.3 Faciliter l'automatisation du séquencement 90

III.3.3. Les obstacles et les limites associés au séquencement centralisé 91

III.3.3.1 La non-flexibilité de certains palonniers 91

III.3.3.2 La présence de deux lignes de peinture 91

III.3.3.3 Les Perturbations quotidiennes et imprévues 91

III.3.3.4 Gestion des perturbations opérationnelles : Les limites de l'approche de reséquencemment 91

III.4. La digitalisation pour un séquencement décentralisé dans un environnement compatible avec le modèle Lean 92

III.4.1. Les avantages d'un séquencement décentralisé 92

III.4.1.1 Gestion décentralisée au niveau du pendage : 93

III.4.1.2 Gestion décentralisée au niveau de l'atelier de peinture : 93

III.4.2. Les risques potentiels des décisions décentralisées 94

III.4.2.1 Manque de coordination globale 94

III.4.2.2 Risque de sous-optimisation globale 94

III.5. La mise en œuvre d'un outil permettant de combiner les avantages de la centralisation et de la décentralisation pour un bon équilibre du respect du séquencement. 94
III.5.1. Comment s'assurer que le séquencement centralisé soit bien respecté ? 95
III.5.1.1 Réduire le champ de visibilité des pendeurs 95
III.5.1.2 Comment un KPI en temps réel assure le respect du séquencement global 96
III.5.2. Comment aider les opérateurs à prendre les bonnes décisions et à mieux effectuer leur travail ? 97
III.5.2.1 Vers une décision décentralisée éclairée : Intégration d'un KPI évaluant l'impact des décisions locales sur les performances globales 97
III.5.2.2. La digitalisation pour renforcer l'efficacité de certaines pratiques Lean : Le management visuel 99
III.5.2.2.1 Le management visuel vu par la littérature scientifique 99
III.5.2.2.2 L'application du management visuel dans l'entreprise 99
III.4.2.2.3 Résultat et discussion 101
III.5.2.3 La digitalisation pour renforcer l'efficacité de certaines pratiques Lean : Le travail standardisé 102
III.5.3. L'impact de la digitalisation sur l'efficacité de l'atelier de montage 104
III.5.3.1 Synchronisation des flux entre le pendage et le magasin 104
III.5.3.2 Suivi automatique des en-cours sur le convoyeur 105
III.6 Conclusion 106
Chapitre IV : Étude heuristique empirique pour le problème de séquencement d'un flowshop hybride 109
IV.1 Introduction : 109
IV.2. Problème de séquencement dans un flowshop hybride 110
IV.2.1. Séquencement dans un flowshop hybride : Contraintes et objectifs multi-ateliers 110
IV.2.1.1 La grenailleuse : Espacement des Éléments Mécano-Soudés (EMS) critiques 110
IV.2.1.2 Peinture : Regroupement des EMS de couleur identique 111
IV.2.1.3 Dépendage : Minimisation des blocages et lissage de la charge de travail 111
IV.2.1.4 Montage : réduction de l'encombrement des postes et accélération du flux de sortie des colis 112
IV.2.2 Modélisation mathématique du problème de séquencement 113
IV.2.3 Unification des objectifs : Transformant un problème multi-objectif en un problème mono-objectif 117
IV.3. Revue de la littérature 119
IV.3.1 Recherche locale 120
IV.3.2. Algorithme génétique 121
IV.3.2.1 Le cadre général d'un algorithme génétique 122
IV.3.2.2 Les opérateurs de l'algorithme génétique 122

IV.3.3 Algorithme génétique hybride 125
IV.4. Les approches développées 126
IV.4.1 Algorithme de recherche locale 127
IV.4.2 Algorithme génétique 128
IV.4.3 Algorithme génétique hybride 129
IV.5. Résultats expérimentaux 129
IV.5.1 Expérimentation de la recherche locale 130
IV.5.2 Expérimentation de l'algorithme génétique 132
IV.5.3 Expérimentation de l'AGH 137
IV.5.4 Comparaison entre la RL, l'AG et l'AGH 138
IV.6 Conclusion 143
Conclusion et Perspectives 145
Bibliographie 151
Annexe 1 161
Annexe 2 161
Annexe 3 163
Annexe 4 164
Annexe5 164

Liste des figures

Figure 1 : Eléments principaux de la GME 17
Figure 2 : Nombre de RAL utilisés 19
Figure 3: Chaine logistique des grues Potain 21
Figure 4 : Soudage 22
Figure 5 : Convoyeur aérien "Manitowoc" 23
Figure 6 : Description du système de convoyage 24
Figure 7 : Pendage Mat 24
Figure 8 : Pendage élément de flèche 24
Figure 9: Opération de soufflage 25
Figure 10 : Peinture 26
Figure 11 : Cabines de peinture 27
Figure 12: Dépendage 27
Figure 13: Zone de montage des flèches 28
Figure 14 : Montage 29
Figure 15 : Lissage hebdomadaire 31
Figure 16 : Lissage par volume et mix de zones de montage 32
Figure 17 : Le séquencement journalier 32
Figure 18 : Les contributions de la thèse 35
Figure 19 : L'objectif et la cible de Manitowoc 41
Figure 20 : Historique des idées d'amélioration 44
Figure 21 : Exemple d'approvisionnement mixte: en continu et en kit 45
Figure 22 : Kitting Lean avec des conteneurs spécifiques pour les contre-flèches 47
Figure 23 : Conversion d'une ligne de montage en cellule de montage 50
Figure 24 : Le plan de la partie état de l'art 53
Figure 25 : Défis des environnements HMLV, tiré de (Siong et al., 2018) 60
Figure 26 : Différents problèmes identifiés sur la chaîne de production 65
Figure 27 : Le séquencement journalier 68
Figure 28 : Parc de stockage des EMS 68
Figure 29 : Tableau Kanban pour le pendage 69
Figure 30 : Pendage d'un EMS 71
Figure 31 : Changement de configuration avant SMED 71
Figure 32 : Posture forcée des membres supérieurs 72
Figure 33 : Posture inconfortable des membres supérieurs 72
Figure 34 : Conception d'une nouvelle table pour atténuer les postures inconfortables 72
Figure 35 : Changement de configuration après SMED 74
Figure 36 : Les contributions de la thèse 76
Figure 37 : VSM : Problèmes persistants et limites du Lean 77
Figure 38 : Processus de collecte de données 84
Figure 39 : Automatisation de l'importation d'une commande dans Easy Planning 85
Figure 40 : Remontée des problèmes perturbant le séquencement 86
Figure 41 : Modification des commandes 88
Figure 42 : Fiabilisation des délais de livraison 89
Figure 43 : Relance automatique pour les approvisionneurs 89
Figure 44 : Alerte sur les retards de livraison 90
Figure 45 : Taux de respect des délais de livraison 90
Figure 46 : Taux de respect du séquencement 97
Figure 47 : Impact des décisions locales sur les objectifs/contraintes globaux 98
Figure 48 : Pareto des non-conformités 100
Figure 49 : Transition vers un management visuel digitalisé 101
Figure 50 : Historique d'évolution des erreurs de teinte 102
Figure 51 : La digitalisation des standards de travail de pendage 103

Figure 52 : La digitalisation des standards de travail de l'opération de protection des surfaces usinées 104
Figure 53 : Synchronisation des flux entre le pendage et le magasin 105
Figure 54 : Suivi automatique des en-cours sur les convoyeur 106
Figure 55 : VSM : Impact de la digitalisation sur la résolution des problèmes identifiés 108
Figure 56 : Espacement des EMS critiques 111
Figure 57 : Blocage au niveau des postes de dépendage 112
Figure 58 : Classification des méthodes approchées 119
Figure 59 : Algorithme de la recherche locale 121
Figure 60: Opérateur de croisement à deux points 123
Figure 61 : Opérateur de croisement OX 124
Figure 62 : Opérateur de croisement PBC 124
Figure 63 : Organigramme des approches développées 126
Figure 64: Algorithme RL développé 127
Figure 65: L'AG développé 128
Figure 66: L'AGH développé 129
Figure 67: Evolution du temps d'exécution de la RL selon la taille des instances 132
Figure 68: Evolution du temps de calcul selon la taille de population 133
Figure 69 : Evolution du temps d'exécution de l'AG en fonction de la taille des instances 137
Figure 70 : Evolution du temps d'exécution de l'AGH en fonction de la taille des instances 138
Figure 71: Comparaison des Coûts Initiaux et des Coûts trouvés par la RL, l'AG et l'AGH 138
Figure 72 : Étude comparative des temps d'exécution de la RL, l' AG et l'AGH 139
Figure 73 : comparaison de la robustesse de la RL, l'AG et l'AGH 139
Figure 74 : VSM : problèmes résolus grâce à l'optimisation du séquencement 144
Figure 75 : Les contributions de la thèse 149
Figure 76 : VSM : Les défis résolus 150
Figure 77 : Marques de grues Manitowoc 162

Liste des tableaux

Tableau 1 : Evolution des systèmes de production adoptés par Manitowoc 41
Tableau 2 : Avantages/Inconvénients du système Lean Kitting chez Manitowoc 48
Tableau 3 : Différentes caractéristiques entre la production Toyota et la production HMLV (Adapté de Tomašević et al., 2021 ; Adlin et al., 2020 ; Hussain et al., 2020, Irani,2020) 52
Tableau 4 (partie 1) : Freins à la réussite du Lean 55
Tableau 5 (partie 1) : Bénéfices et limites à l'universalité de certains outils/pratiques 58
Tableau 6 : L'impact des différentes définitions du Lean sur sa compatibilité avec les environnements HMLV 63
Tableau 7 : Résultats de mise en œuvre du Kanban 69
Tableau 8 : Taux de Respect du Séquencement : Observation Indirecte vs Directe chez Manitowoc. 96
Tableau 9 : Evaluation et valorisation des objectifs 118
Tableau 10 : Résultats expérimentaux de la RL 131
Tableau 11 : Performances de l'AG selon la taille de la population et des instances 134
Tableau 12 : Paramètres de l'AG 135
Tableau 13 : Résultats expérimentaux de l'AG 136
Tableau 14 : Résultats expérimentaux de l'AGH 136
Tableau 15 (partie 1) : Comparaison entre la RL, l'AG et l'AGH 141

Introduction générale

L'évolution du marché de la production de masse vers la personnalisation de masse a considérablement accru la complexité des opérations pour les entreprises. Dans les modèles de production de masse traditionnels, les tâches sont routinières et standardisées, permettant une production à grande échelle avec des processus bien définis et des produits uniformes. En revanche, la personnalisation de masse nécessite de s'adapter à une demande diversifiée, impliquant la fabrication de produits variés selon les besoins spécifiques des clients.

Cette transition s'est d'abord opérée dans les entreprises à fort volume de production. Dans ce contexte, les lignes d'assemblages ont été reconçues pour alterner des produits différents à une cadence élevée. L'industrie automobile en est un exemple emblématique (Louis et al.,2022).

Pour les entreprises produisant des volumes faibles, la transition a été plus tardive. Elle a donné naissance à des organisations de type (High Mix, Low Volume - HMLV). Ces entreprises se caractérisent par une grande variété de produits à fabriquer, tout en maintenant des volumes de production relativement faibles pour chaque type de produit. Cette combinaison complexe pose de nombreux défis opérationnels, notamment en termes de gestion de stocks, de gestion des encours de production, des délais de livraison souvent allongés et une utilisation moins efficace des ressources. De plus, les caractéristiques diversifiées, voire uniques, des produits, augmentent la complexité des opérations, notamment en matière de séquencement de production. C'est ce type de défis auquel sont confrontées les entreprises de fabrication de moyen de levage, et en particulier des grues comme Manitowoc (Duret, 2016).

Pour les entreprises de production, en particulier de grues, le séquencement de la production est l'élément structurant de toute l'usine. Le séquencement est un processus qui consiste à déterminer l'ordre d'exécution des différentes opérations ou des tâches dans un processus de production de manière à optimiser les performances globales du système. Cela peut inclure la minimisation des temps d'attente, la réduction des temps de production, l'utilisation efficace des ressources disponibles, ou encore la réduction des coûts.

Mais la résolution du problème de séquencement à elle seule ne suffit pas à garantir un fonctionnement optimisé des entreprises HMLV. Le séquencement peut être perturbé par divers aléas tels que les pannes d'équipement, les changements de commandes, les problèmes d'approvisionnement en matières premières ou les défauts de qualité. En outre, les variations importantes de la demande client et les exigences en matière de personnalisation peuvent rendre le séquencement plus difficile à trouver et à exécuter.

Pour surmonter ces défis et maintenir une production efficace, il est essentiel de combiner les solutions de séquencement avancées avec d'autres approches, notamment le Lean manufacturing, qui a fait ses preuves dans les entreprises de production. Les principes Lean, tels que l'amélioration continue, la production juste à temps et la réduction des gaspillages, offrent des stratégies éprouvées pour optimiser les processus de production et augmenter leur flexibilité.

En complément, les outils de digitalisation s'imposent dans la plupart des entreprises, et fournissent des moyens de suivi de la production, mais aussi d'optimisation locale et globale. En effet, la digitalisation, permet un suivi des opérations avec une remontée des informations en temps réel, permettant une gestion plus précise de la chaîne de production et une meilleure réactivité aux aléas.

Cette thèse explore comment ces outils et approches complémentaires, le séquencement, le Lean et la digitalisation, peuvent être utilisés de manière intégrée pour apporter des solutions aux défis des entreprises de type HMLV, et en particulier pour la fabrication de grues.

Ce mémoire est structuré en quatre chapitres.

Le premier chapitre présente le contexte industriel dans lequel se sont déroulés les travaux de recherche. Il décrit le terrain de recherche, le site de production de grues de Moulins (Manitowoc) et les spécificités des produits fabriqués. Il explore également la chaîne logistique et les différents processus de production tout en explicitant les défis liés à la planification et au séquencement dans les environnements HMLV. Enfin, il aborde la problématique de recherche et la façon dont elle a été traitée, ainsi que les contributions principales de la thèse.

Le deuxième chapitre présente l'expérience de mise en œuvre du Lean Manufacturing dans l'entreprise Manitowoc. Une première partie traite de l'évolution historique des modèles Lean adoptés par cette entreprise (notamment le site de Moulins), avec comme angle d'étude les succès et les échecs. La deuxième partie analyse les convergences et les divergences issues de la littérature sur les compatibilités du Lean et ses modèles d'adoption au sein des environnements de type HMLV. Elle explore et analyse comment les différentes interprétations du Lean, qu'il s'agisse d'une approche stratégique, d'un système de management, d'un système socio-technique, d'une philosophie, ou d'une boîte à outils peuvent influer les réussites et les échecs de sa mise en œuvre dans ces environnements. Enfin la dernière partie, présente et discute d'un ensemble d'expérimentations du Lean mis en œuvre dans l'entreprise.

Le troisième chapitre est consacré à la digitalisation. Il présente un état de l'art qui explore l'impact de la digitalisation sur le processus de prise de décision. Il montre ensuite comment, dans l'entreprise Manitowoc, la digitalisation est utilisée pour construire un séquencement centralisé et optimisé, mettant en lumière ses avantages mais aussi les risques potentiels liés au non suivi du séquencement à certaines étapes du processus de production. Ensuite, il examine les avantages et les risques potentiels des prises de décisions décentralisées, préconisées dans l'approche Lean mise en œuvre dans l'entreprise. Enfin, il présente la mise en œuvre d'un outil développé pour Manitowoc, conçu pour tirer parti des avantages des deux approches (centralisée et décentralisée), dans le but d'atteindre un bon équilibre dans le processus de prise de décision, et un fonctionnement optimisé du système de production global.

Enfin, le quatrième chapitre est consacré au séquencement de la production, et plus particulièrement au flowshop hybride caractéristique de la fabrication de grues. Dans un premier temps, il aborde les objectifs et contraintes spécifiques aux ateliers de production interconnectés de l'entreprise Manitowoc, mettant en lumière les particularités de chaque étape de production. Ensuite, il présente une modélisation mathématique du problème de séquencement étudié prenant en compte les objectifs et les contraintes très variés. Il présente ensuite les différentes approches proposées pour résoudre le problème de séquencement, un algorithme de recherche locale (RL), un algorithme génétique (AG) et un algorithme génétique hybride (AGH). Enfin, il décrit les résultats expérimentaux obtenus, en comparant les performances de ces méthodes sur des instances industrielles de taille réelle en termes de coûts et de temps de calcul.

Ce mémoire s'achève en reprenant les principales contributions de cette recherche, et en proposant quelques perspectives pour des travaux futurs.

Chapitre I : Contexte industriel et problématique

I.1 Introduction et objectifs

Au cours des dernières années, le contexte commercial mondial a évolué vers une personnalisation de masse. Les entreprises cherchent à proposer des produits personnalisés (couleur, taille, option, etc.) pour répondre aux différents besoins des clients. L'industrie automobile en est un exemple emblématique. Les clients peuvent personnaliser leur véhicule en choisissant parmi une large gamme d'options (carrosserie, couleur, toit ouvrant, motorisation, climatisation, système audio, etc.) (Louis et al., 2022). Ce phénomène est présent dans de nombreux autres secteurs industriels, comme l'industrie de levage et l'industrie de la construction. La personnalisation de masse et la pression concurrentielle poussent donc les entreprises à proposer des produits de plus en plus personnalisés, tout en conservant une haute qualité, un faible coût, et des délais minimisés.

L'évolution du marché vers des produits fortement diversifiés accroit l'incertitude, multiplie les références, et réduit considérablement les possibilités de production pour stock. De nombreuses entreprises sont donc passées d'une production pour stock (Make To Stock - MTS) à une production à la demande (Make To Order - MTO) (Liang et al., 2022).

Sur le plan industriel, le MTO impose une organisation apte à produire cette diversité. Les entreprises recherchent donc un processus de fabrication capable de produire une grande variété de produits, à faible volume (HMLV) (Kocsi et al., 2020). Cependant, l'augmentation de la variété des produits dans la fabrication HMLV, apporte de nouveaux défis dans le contrôle (Liang et al., 2022), la planification et l'ordonnancement de la production (Gan et al., 2023), car les propriétés des produits, des composants, et des processus changent dynamiquement (Kocsi et al., 2020).

La production d'une grande variété de produits sur une même ligne est un défi. Du fait de leurs caractéristiques hétérogènes, les produits ont souvent des process de production et des temps de cycle avec une forte variabilité, nécessitant un ensemble d'outillages différents, ce qui engendre généralement des temps de changement d'outils longs et variables (Ramadan et al., 2020).

En conséquence, le HMLV implique généralement des coûts de production et des délais de production (*Lead time*) élevés (Tahmina et al., 2022). Ceux-ci sont souvent liés aux gaspillages qui existent habituellement tout au long du processus de production (défauts, transports inutiles, temps d'attente, etc.) (Zennaro et al., 2019), et à la manière d'ordonnancer les produits (Ramadan et al., 2020). De plus, le faible niveau de digitalisation des processus fait également partie des facteurs contribuant à l'augmentation du *lead time* (Daniyan et al., 2022).

Actuellement, dans tous les systèmes de production, l'environnement est dynamique et incertain, en raison d'évènements internes (pannes, absences d'opérateurs, rebuts, etc.) et externes (manque de matières premières, modification de commande, changement de date de livraison, etc.). Cela complexifie le processus de prise de décision et tend à augmenter les coûts et le *lead time*.

Dans ce contexte, les entreprises recherchent de plus en plus des approches et outils appropriés pour améliorer leur fonctionnement. Ainsi, le Lean, adopté avec succès dans les environnements stables et répétitifs fait de plus en plus son apparition dans les environnements HMLV (Danese et al., 2018). La digitalisation représente également une opportunité pour les entreprises pour répondre à ces défis (Buer et al., 2018 ; Kumar et al., 2020).

L'objectif de ce premier chapitre est de présenter le contexte industriel dans lequel se sont déroulés les travaux de recherche, et notamment de bien cerner le périmètre de l'étude. Pour cela, nous décrirons notre terrain de recherche, le site de production de grues de Moulins (Manitowoc). Nous expliciterons ensuite la problématique de recherche, et comment nous l'avons traitée.

I.2. La grue, un produit complexe

Les grues sont des engins de levage utilisés pour transporter des charges lourdes (machines, matériaux, marchandises) à diverses fins. Elles sont le plus souvent utilisées pour des chantiers de construction (naval, bâtiments en tout genre).

Deux grandes familles de grues existent : les grues mobiles (sur roues ou chenilles) et les grues à tour (fixes). Cette deuxième famille se subdivise en deux sous-groupes comprenant respectivement, les grues à montage automatisé, parfaitement adaptées aux structures légères et les grues à montage par éléments, qui sont plus hautes, peuvent soulever des poids plus lourds et conviennent aux constructions de grande hauteur. Nous détaillons plus loin cette dernière famille, qui fait l'objet du présent travail.

Nos travaux de thèse se déroulent dans l'entreprise Manitowoc (maison mère des grues Potain), l'un des principaux fabricants de grues au monde (voir un historique en *Annexe 1*), et plus précisément sur le site de Moulins (03000, France).

Dans cette partie, nous nous attacherons à présenter le site industriel de moulins et ses spécificités, et nous introduirons le vocabulaire associé au produit fabriqué, nécessaire pour la compréhension de la suite de cette recherche.

I.2.1 Les grues POTAIN et le site industriel de Moulins

Le site moulinois de Manitowoc est spécialisé dans la fabrication des **G**rues à tour à **M**ontage par **É**léments (GME). Les GME de Manitowoc sont connues sous la marque POTAIN, une des cinq grandes marques du groupe (voir *Annexe 2*).

Potain conçoit et fabrique plus de quarante modèles de GME, qui peuvent être configurés, adaptés aux besoins du chantier. Les clients de Manitowoc tels que, *Bouygues construction materiel, Korea International Ltd, et Kranor AS,* témoignent de la polyvalence et de l'adaptabilité des grues Potain, pour répondre aux besoins variés de différents types de projets de construction. Traditionnellement, les GME étaient de couleur jaune, le jaune Potain, et la configuration des grues se limitait initialement aux caractéristiques de base, telles la hauteur, la capacité de levage, la portée, etc.

Cependant, pour demeurer compétitive face à une concurrence de plus en plus forte et des clients de plus en plus exigeants, l'entreprise propose désormais une large gamme de produits, de teintes et d'options, pour conquérir de nouveaux marchés et cela sur plusieurs continents. Chaque produit est désormais unique et spécifique.

I.2.2. La grue : un produit à forte personnalisation

Cette section a pour but de présenter, dans un premier temps, les principaux ensembles constituant une GME et, dans un second temps, les éléments de personnalisation d'une grue.

I.2.2.1 Présentation du produit

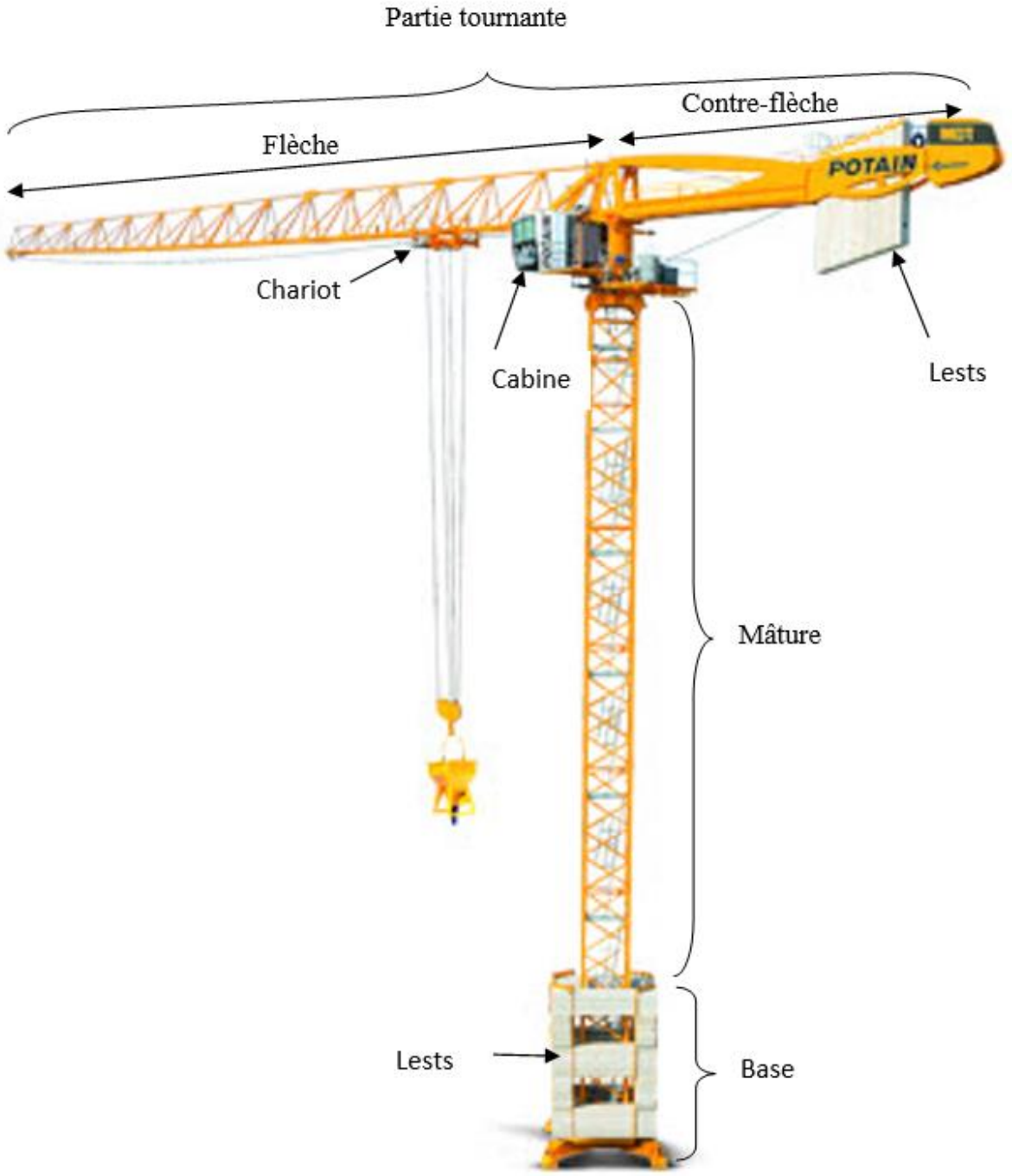


Figure 1 : Eléments principaux de la GME

Comme le montre la *Figure 1*, une GME se compose de trois ensembles structurels principaux, à savoir la partie tournante, la mature et la base.

La partie tournante contient la flèche et la contre-flèche :

- La flèche est constituée d'un treillis métallique de section triangulaire, qui porte la charge et permet au chariot de se déplacer d'un rayon à l'autre. La flèche assure à la grue la portée nécessaire.

- La contre-flèche a pour fonction de supporter des lests (généralement en béton armé) qui servent à équilibrer le poids de la flèche et de la charge.

La Mature est composée d'un treillis métallique de section carrée, servant de support à la partie tournante. Le nombre d'éléments empilés donne à la grue sa hauteur.
La base est constituée d'un ensemble d'éléments métallique, et des lests. Elle assure la liaison au sol et la stabilité globale de la grue.

Cette structure de base est complétée par une cabine de pilotage, généralement située au sommet de la mature. Un ensemble de moteurs assure les différents mouvements effectués par la grue à tour :

- le levage (mouvement vertical du crochet) ;
- la distribution (déplacement du chariot le long de la flèche) ;
- l'orientation (rotation de la partie tournante autour de l'axe d'orientation).

Une grue est donc le résultat d'un assemblage de milliers de composants (de 5500 à 8000 composants selon le modèle de la grue).

I.2.2.2. Les éléments de personnalisation des grues Potain

La grue joue un rôle crucial dans la rentabilité et la durée d'un chantier. Son choix n'est donc plus limité aux caractéristiques de base, comme présentées dans la section précédente. De nombreuses options sont aujourd'hui disponibles pour personnaliser chaque grue.

Actuellement, Manitowoc conçoit et fabrique plus de quarante modèles de grues GME (hors options) pour répondre à tous les besoins des clients. Chaque modèle est ensuite personnalisé par le client en fonction de ses besoins spécifiques.

La personnalisation de la grue est décomposée selon trois catégories pour lesquelles nous donnons quelques exemples de possibilités ci-dessous : Les caractéristiques de base, les options spécifiques, et les options communes.

I.2.2.2.1 Les caractéristiques de base

Le principal avantage des grues Potain est qu'elles sont configurables en fonction de la nature du chantier. Ainsi, il est possible de choisir la longueur de la flèche, en augmentant le nombre d'éléments préfabriqués assemblés (jusqu'à 80 mètres). Il est également possible de choisir la hauteur de la grue, de la même façon (jusqu'à 300 mètres de haut). La charge maximale qui peut être soulevée dépend principalement de ces deux paramètres.

Deux types de flèches existent. La flèche distributrice (voir *Figure 1*) est la plus utilisée pour les chantiers qui ne présentent pas d'obstacle dans le rayon de travail. Elle est constituée d'éléments fixes et ne se déplace que dans le plan horizontal, en rotation autour de l'axe de la mâture. La flèche relevable peut se redresser dans le plan vertical. Elle est utilisée lorsque la zone de travail est limitée. C'est le cas par exemple des chantiers en centre-ville, avec des constructions toujours plus hautes et des environnements de plus en plus denses.

I.2.2.2.2 Les options spécifiques

Manitowoc propose de nombreuses options pour augmenter la sécurité, la productivité et le confort de l'opérateur.
Parmi les différentes options possibles, on peut citer :

- les radiocommandes qui permettent de piloter la grue depuis le sol, et d'éloigner le conducteur des risques ou au contraire de l'approcher de la zone de dépose de charge ;

- l'ascenseur qui aide l'opérateur à rejoindre la cabine de pilotage et réduit le temps d'arrêt de la grue ;
- le tag RFID (Radio Frequency Identification), technologie qui repose sur des puces électroniques, fixées ou intégrées à un élément de la grue, capable de stocker de l'information et de la transmettre à distance par ondes radio ;
- le travail en zones multi-grues pour éviter les collisions, et optimiser le temps de fonctionnement des grues.

I.2.2.2.3 Les options communes

Le nombre de codes couleurs (RAL[1]) proposé aux clients est en augmentation depuis 2012 pour deux raisons principales (voir *Figure 2*) :

- la réglementation : Pour les grues montées à proximité d'un aéroport par exemple, la flèche et la contre-flèche doivent être balisées, peintes bi-couleur (alternativement blanc et rouge), afin d'être plus visibles des aéronefs.
- le marketing : Manitowoc propose à chaque client de personnaliser sa grue à sa couleur (exemple : orange Bouygues).

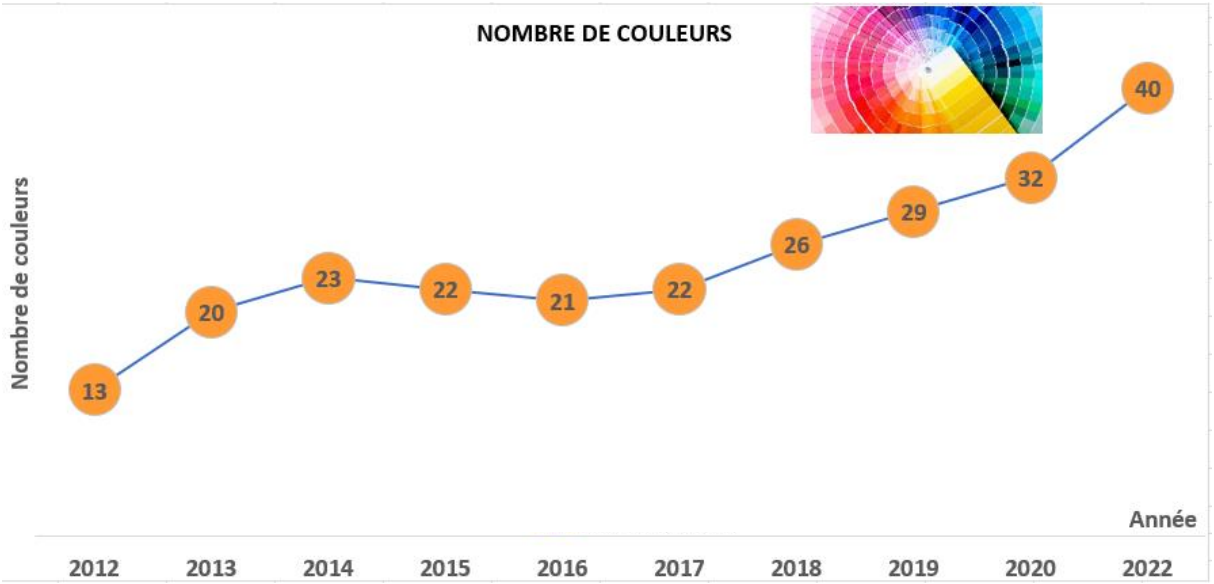


Figure 2 : Nombre de RAL utilisés

Les éléments de personnalisation présentés plus haut sont les principaux, mais il en existe beaucoup d'autres. Cette diversité amène à gérer un nombre plus important de pièces et composants, ce qui complexifie la gestion de la chaîne logistique et la fabrication sur de nombreux points.

I.2.3. La chaine logistique et le processus de production global

Dans cette section, nous donnerons une vision complète de la chaine logistique, puis présenterons le processus de production global de l'usine.

I.2.3.1 La chaine logistique des grues POTAIN

Comme nous l'avons vu dans la section précédente, Manitowoc propose des produits de plus en plus personnalisés. Le nombre restreint de commandes (quelques dizaines de grues par mois) et la

[1] RAL est l'abréviation de « Reichs-Ausschuß für Lieferbedingungen und gütesicherung », un système de codification des couleurs développé en 1927 par l'Institut allemand pour l'assurance qualité et le marquage associé.

grande diversité des produits interdisent toute production pour stock. La chaîne logistique mise en place chez Manitowoc, est donc une organisation tirée par le client (MTO), de l'acceptation de la commande jusqu'à la livraison des grues.

Dans un premier temps, la demande du client est reçue par le département commercial de Manitowoc. Ce département envoie l'information au département marketing qui centralise les demandes et formalise des commandes.

Chaque mois, ce département défini les quantités de grues à produire sur un horizon d'un an, M+1 jusqu'à M+12 (les commandes du mois M étant déjà figées). Ce planning permet au département manufacturing, de déterminer un programme de production sur un horizon d'un mois, programme qui précise les dates d'échéance des commandes, et qui est envoyé à trois départements : approvisionnement, production et expédition, comme illustré dans la *Figure 3*.

Le département approvisionnement a pour mission de commander et de faire livrer les bonnes quantités de matières premières et composants pour le département de production. Il est responsable de toutes les relations avec les fournisseurs.

Le département production est en charge de l'ensemble des transformations des matières premières ou composants pour fabriquer les différents éléments de la grue. Ce département est en charge de trois ateliers, comme le montre la *Figure 3* : le soudage, le traitement de surface (grenaillage – peinture) et le montage. Ces trois ateliers seront présentés plus en détail dans la section suivante.

Le département expédition gère l'acheminement physique des produits finis au client. La taille des GME impose une livraison en kits appelés colis. Le transport des colis entre l'usine et le client (chantier) se fait la plupart du temps par camion. Il faut compter en moyenne une quinzaine de camions (colis) pour acheminer une grue complète. Ces colis doivent être envoyés dans l'ordre du montage des différents éléments de la grue. Tout d'abord les éléments de la base, puis les éléments de la mature, et enfin les éléments de la partie tournante.

La livraison des colis en juste à temps et en ordre voulu est primordiale pour l'entreprise, afin d'éviter les pénalités de retard. Le jour consacré au montage d'une grue ne peut pas être décalé en raison de contraintes économiques et organisationnelles. En effet, il implique la location de grues mobiles, nécessaires au montage des GME, dont le tarif est élevé. Ainsi, il nécessite le plus souvent des accords d'utilisation de la voirie et ces procédures administratives demandent plusieurs semaines pour être obtenus (Duret, 2016).

Comme nous venons de le voir, le processus de la commande à la livraison fait intervenir six départements. Avec pour objectif final de livrer un ensemble de colis le bon jour, et dans le bon ordre pour satisfaire cette commande. Ceci implique une coordination et une coopération de toute la chaine logistique. Compte tenu de la grande diversité des produits, la satisfaction de ces deux objectifs (colis livré le bon jour et dans le bon ordre) impacte fortement la chaine logistique, et plus précisément le département de production.

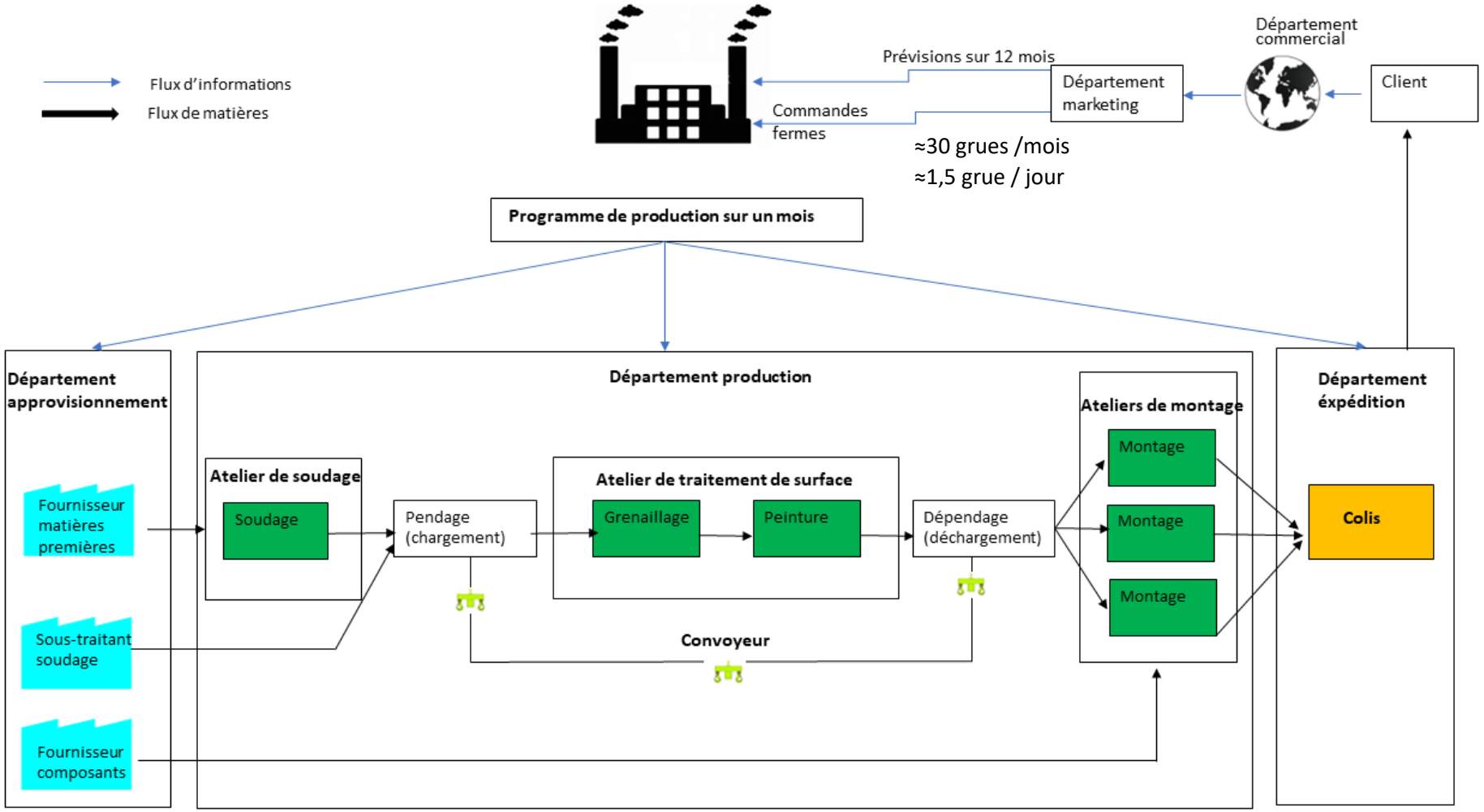


Figure 3: Chaine logistique des grues Potain

I.2.3.2. Le processus de production dans l'usine

La fabrication des éléments de la grue commence par le soudage des pièces métalliques afin de fabriquer des Éléments Mécano-Soudés (EMS). Ils sont ensuite traités et peints dans l'atelier de traitement de surface. Puis, les EMS et les autres composants (mécaniques, électroniques et électriques) sont assemblés dans l'atelier de montage (Voir *Figure 3*).

I.2.3.2.1 L'atelier de soudage

Après découpe et mise en forme, les pièces métalliques sont soudées afin d'obtenir un EMS (voir *Figure 4*). C'est un atelier partiellement automatisé : certaines tâches, telles que la découpe, sont réalisées par des robots, tandis que d'autres, comme les opérations de soudage, requièrent une intervention humaine. Le processus de soudage est stable, avec peu d'aléas. De plus, la diversité de produit à ce niveau est faible, ce qui simplifie la gestion de la production et garantit une qualité constante des EMS produits.



Figure 4 : Soudage

I.2.3.2.2 L'atelier de traitement de surface

Le traitement et la peinture d'un EMS sont réalisés en trois étapes successives : le décapage (à l'aide d'une grenailleuse), l'apprêt (pour préparer le métal à recevoir la peinture) et la laque (application d'une couche de peinture).

I.2.3.2.3 L'atelier de montage

L'atelier de montage se compose de plusieurs postes de travail en parallèle et indépendants les uns des autres. Chaque poste est spécialisé dans l'assemblage d'une partie de la grue. Toutes ces opérations sont manuelles.

I.2.3.2.4 Le système de manutention

La plupart des EMS à produire sont volumineux (jusqu'à 10 mètres de long), et lourds (jusqu'à 10 tonnes). Ils sont donc difficiles à manipuler. Pour assurer la sécurité des opérateurs, la qualité des EMS (protection de la peinture pendant le transport), et compte tenu de la très grande variété, Manitowoc a opté pour un convoyeur aérien lors de la création de son usine. Sur ce convoyeur circulent des palonniers (porte EMS) permettant le chargement et le transport des EMS en hauteur. Le convoyeur est alimenté en EMS dans des zones de pendage (Voir *Figure 3)*. Il dessert ensuite l'atelier de traitement de surface (grenailleuse puis postes de peinture). Les EMS sont ensuite dépendus dans des zones de dépendage. Le convoyeur fonctionne en boucle fermée. Les palonniers restent suspendus au convoyeur, un palonnier vidé de ses EMS revient donc en zone de pendage pour se voir attribué d'autres EMS.

I.3. Le périmètre d'étude un haut lieu de contraintes et variabilité

Le convoyeur, qui relie les postes amont (de soudage) et aval (atelier de montage), est un équipement qui structure toute l'activité de l'entreprise. Il crée une forte interdépendance entre tous les postes.

Dans cette étude, nous nous concentrons sur le périmètre du convoyeur. L'atelier de soudage et les sous-traitants externes sont nos fournisseurs d'EMS, tandis que l'atelier de montage est notre client interne.

De façon générale, un système de production peut être décomposé en deux sous-systèmes complémentaires, système physique et système décisionnel (Messaoudene & Gramdi, 2007). Les caractéristiques de chacun des systèmes sont présentées respectivement dans les sections suivantes.

I.3.1. Le système physique

Dans cette section, nous allons présenter les caractéristiques du système physique. Dans un premier temps, nous allons décrire le système de convoyage utilisé et expliquer son manque de flexibilité. Dans un deuxième temps, les différents postes de travail du processus de traitement de surface seront analysés pour comprendre leur fonctionnement et leurs contraintes. Pour terminer, nous étudierons les besoins de nos clients, à savoir, l'atelier de montage.

I.3.1.1 Le système de convoyage

Le déplacement des EMS est effectué par un convoyeur aérien (voir *Figure 5*). Sur ce convoyeur se déplace des palonniers sur lesquels sont suspendus les EMS.



Figure 5 : Convoyeur aérien "Manitowoc"

Le convoyeur aérien est de type asynchrone. Le palonnier est arrêté pour effectuer une opération sur l'EMS suspendu. Dès que l'opération est terminée, le palonnier avance vers le poste suivant. Un poste de travail ne peut libérer un palonnier que s'il y a de la place sur le convoyeur en aval (stock avant le poste suivant). Si ce n'est pas le cas, le palonnier reste bloqué sur le poste en attendant que la place nécessaire se libère (blocage).

Ce système de convoyage dispose, à certains endroits, des fonctions d'aiguillage divergent/convergent. Les fonctions d'aiguillage divergent servent à diviser le flux de palonniers d'une ligne en deux lignes. Par exemple, à l'entrée des cabines d'apprêt, l'aiguillage divergent permet de diriger le palonnier sur l'apprêt N°1 ou l'apprêt N°2 selon la décision prise par l'opérateur (voir *Figure 6*). Tandis que les fonctions d'aiguillage convergent permettent de combiner le flux de deux lignes en une seule ligne. Par exemple, à la sortie des cabines des laques, l'aiguillage convergent réunit les

palonniers sur une ligne unique desservant les postes de dépendage (voir *Figure 6*). Un système de séparation en deux flux parallèles existe également au niveau des postes de pendage.

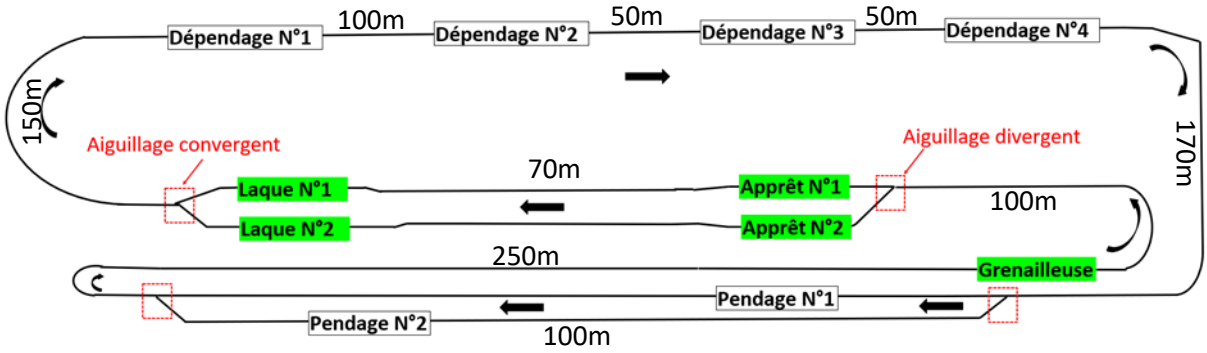


Figure 6 : Description du système de convoyage

Nous voyons ici que le convoyeur est un équipement rigide dans son fonctionnement. Les EMS ne peuvent se dépasser sur un segment de convoyeur. Les seules flexibilités dans le flux apparaissent au niveau des aiguillages. Il est alors possible de changer l'ordre de certains palonniers, mais cela reste très limité. Il est donc très important que sur un même segment l'ordre des EMS soit déterminé avec précision car il ne sera pas possible de le changer.

I.3.1.2 Le pendage

Dans un poste de pendage, un opérateur a pour rôle de pendre les EMS sur les palonniers, et d'envoyer ensuite le palonnier dans le flux de production.

Le pendage est réalisé sur deux postes de travail, situés en parallèle sur le convoyeur, et distants d'une centaine de mètres (voir *Figure 6*). Pour le pendage d'un EMS, le choix du poste dépend de la zone de stockage de l'EMS.

À l'entrée du poste de pendage, l'opérateur arrête le palonnier. En fonction de l'EMS à pendre (fourni par la planification) et de la configuration du palonnier qui se présente au poste, l'opérateur peut être amené à effectuer un changement de configuration du palonnier. Cela consiste à enlever ou à mettre des accessoires de levage appelés « transversaux » (voir *Figure 7*). Par exemple le pendage des éléments de flèche impose d'enlever les transversaux (voir *Figure 8*), sans quoi la position de l'élément de flèche serait trop basse, ce qui engendrerait des risques sécurité, ergonomique et sur la qualité. Selon la nature de l'EMS, le type de crochet utilisé pour le suspendre varie. Il peut donc être nécessaire d'enlever les crochets présents sur le palonnier pour mettre les crochets adaptés.

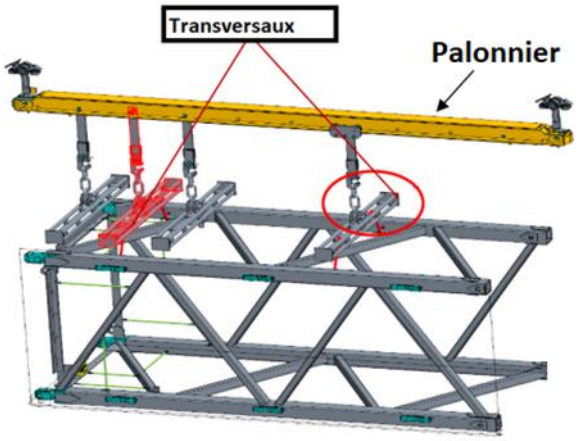


Figure 7 : Pendage Mat



Figure 8 : Pendage élément de flèche

Cette opération de changement de transversaux ou de crochets est indispensable, mais elle nécessite du temps, une charge de travail pour le pendeur, et peut se révéler parfois peu ergonomique. En conséquence, les pendeurs préfèrent souvent modifier le séquencement des EMS pour éviter un changement de configuration.

I.3.1.3 Le grenaillage

Les palonniers entrent dans la grenailleuse afin d'assurer une mise en propreté des EMS, avant l'application de la peinture. Ce poste est automatisé et la vitesse du convoyeur dans la grenailleuse est constante. En sortie de la grenailleuse, les EMS subissent une opération de soufflage manuelle (*Figure 9*) pour enlever tous les résidus de grenaille. La séquence des palonniers n'est pas modifiable entre le pendage et le grenaillage, car le convoyeur n'est constitué que d'un unique tronçon comme le montre la *Figure 6*.

Pour la plupart des EMS, les temps de cycle de grenaillage des EMS sont inférieurs au *Takt time*. Le *takt time* représente la fréquence à laquelle un produit doit être fabriqué pour répondre à la demande du client (Chaple et Narkhede, 2017). Cependant, certains EMS ont des temps de cycle élevés, car le soufflage en sortie de grenailleuse est plus long, du fait de la taille et de la géométrie de l'EMS. La succession de plusieurs EMS avec des temps de cycle supérieurs au *Takt time*, peut engendrer des goulets d'étranglement et provoquer un blocage du poste amont (pendage) et un arrêt de l'activité du poste aval (peinture) par manque d'EMS.

L'ordre de passage des EMS doit donc éviter ces situations en définissant une séquence où ces produits à temps de cycles importants alternent avec des produits dont les temps de cycle sont moins importants.



Figure 9: Opération de soufflage

I.3.1.4 La peinture

Tous les palonniers passent par l'atelier de peinture. Une couche d'apprêt est d'abord appliquée, pour assurer une protection contre les agressions mécaniques que pourrait subir le produit. Puis, une couche de laque est appliquée. Cet atelier est manuel (*Figure 10*).



Figure 10 : Peinture

La ligne de peinture est composée de deux lignes de peinture parallèles (*Figure 11*) mais de gabarit différent : la grande voie et la petite voie. Certains EMS très volumineux ne peuvent passer que sur la grande voie. Pour le reste, l'affectation des palonniers aux lignes est un choix des peintres.

La présence de deux lignes parallèles impacte le séquencement : la séquence en sortie des cabines de peinture ne correspondant plus à l'ordre de pendage. Un exemple de modification de l'ordre en sortie de la peinture est donné dans la *Figure 11*. En effet, dans cet exemple les EMS A et C sont orientés sur la grande voie, tandis que les EMS B et D sont orientés sur la petite. Comme les opérations de peinture sur B et D sont plus rapide que celle sur A, les EMS B et D sortent de la petite voie avant que A et C ne sortent. En conséquence, la séquence obtenue, B, D, A et C ne correspond plus à celle qu'on avait en entrée, A, B, C, et D.

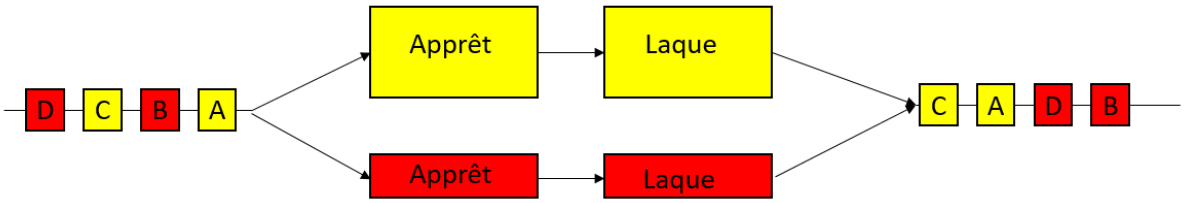


Figure 11 : Cabines de peinture

La succession de deux palonniers transportant des EMS de couleur différente implique une purge des circuits d'approvisionnement de la peinture et des pistolets. Une purge consomme une quantité importante de solvant, et représente un coût non négligeable, estimé à 18€ par purge en moyenne.

En raison du coût important des purges, le séquencement des EMS doit être effectué de sorte à regrouper au maximum les EMS de couleur identique, afin de minimiser le nombre de purges. Ici les gains d'un bon séquencement sont directement chiffrables.

I.3.1.5 Le dépendage

Les palonniers arrivant de l'atelier peinture sont ensuite déchargés par les dépendeurs. Les postes de dépendage sont indépendants et positionnés en série (voir *Figure 12*). Chaque poste est conçu pour décharger un ensemble d'EMS spécifiques et alimenter un ou plusieurs postes de montage bien définis.

Tous les postes de dépendage sont reliés par le convoyeur, et disposent d'un stock inter-poste limité (dépendant de la longueur du convoyeur entre les postes). Un palonnier peut donc passer par plusieurs postes sans s'arrêter. Par exemple, un palonnier devant être déchargé sur le poste 4, traversera les postes 1, 2 et 3, comme le montre la *Figure 12*. A l'inverse, si un palonnier doit être déchargé sur un poste, l'opérateur arrête ce palonnier, ce qui bloque les palonniers suivants en amont de son poste. Par exemple, comme le montre la *Figure 12*, le palonnier devant être déchargé sur le poste 1 bloque les palonniers devant être déchargés sur les postes 2, 3 et 4. Ou encore, le palonnier devant être déchargé sur le poste 2 bloque les palonniers devant être déchargés sur les postes 3 et 4.

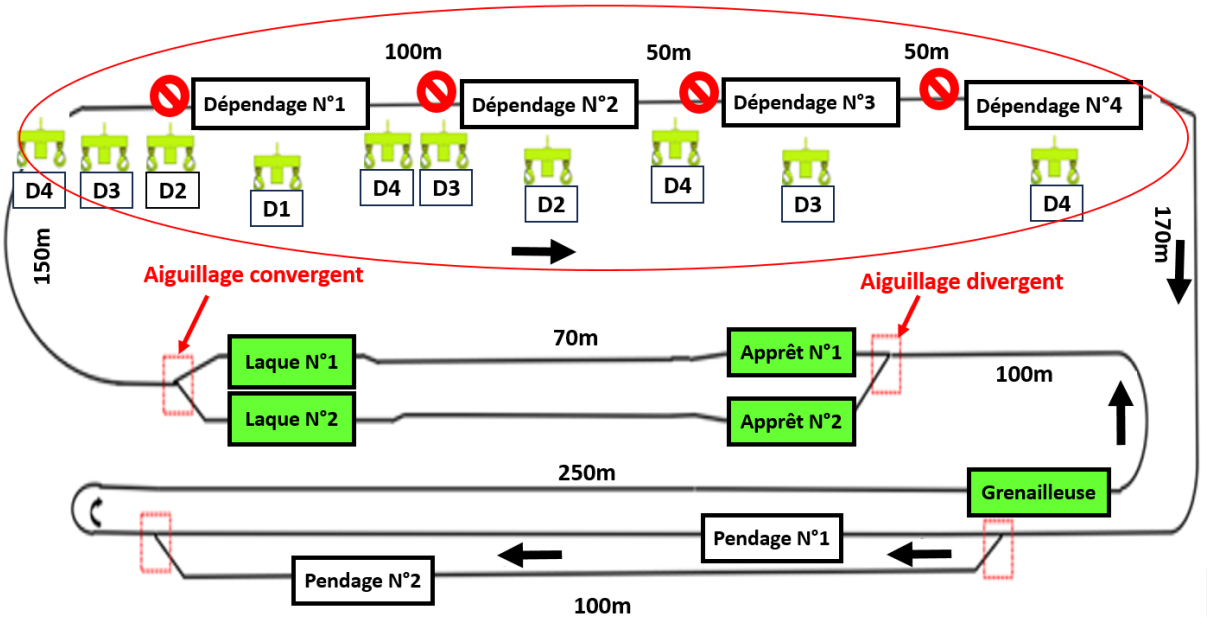


Figure 12: Dépendage

Vu la configuration particulière de cette ligne de dépendage, le séquencement donné comme exemple dans la *Figure 12* génère des temps improductifs. Les dépendeurs peuvent attendre l'arrivée des palonniers qu'ils doivent décharger, car bloqués par des déchargements sur les postes amont. Il peut alors être intéressant de stocker des palonniers en attente de déchargement dans les stocks inter-poste, en constituant des rafales de palonniers destinés au même poste. Mais comme nous avons des stocks inter-poste limités, lorsque le stock tampon atteint sa capacité maximum, le poste en amont doit s'arrêter car bloquer par les palonniers destinés au poste aval. Ce phénomène provoque des situations de blocage au dépendage, ayant des conséquences sur l'approvisionnement des lignes de montage.

Comme nous venons de l'expliquer, la séquence des palonniers ne peut pas être modifiée sur cette section du convoyeur. Les contraintes de blocage dues à l'enchainement des palonniers et de la capacité des stocks tampon, ainsi que les temps de dépendage, doivent être simultanément pris en considération pour garantir un lissage de la charge de travail au niveau des postes de montage.

I.3.1.6 Le montage

Le montage consiste à fixer des composants (mécaniques, électroniques et électriques) sur les EMS, puis les assembler dans un ordre précis pour avoir un colis prêt à expédier.

Comme nous l'avons vu, les EMS sont acheminés par le convoyeur aux postes de dépendage, qui desservent ensuite les zones de montage, (la *Figure 13* illustre la zone de montage des flèches). Les autres composants sont livrés via un flux logistique par petit train (milk run) provenant du magasin.

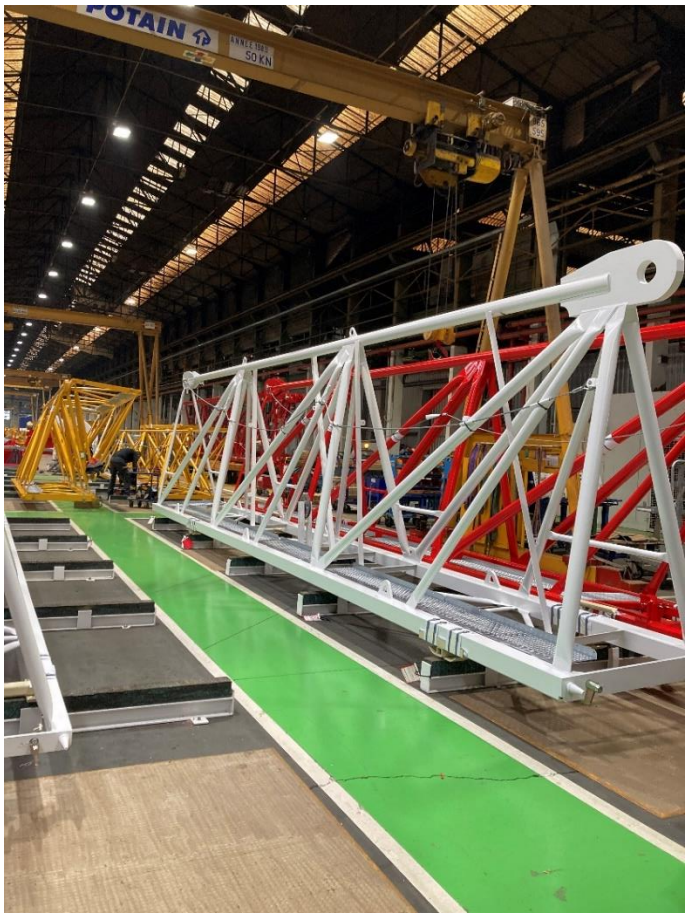


Figure 13: Zone de montage des flèches

Chaque poste de montage est spécialisé dans l'assemblage d'une famille de produit, et doit recevoir, dans la mesure du possible, les composants dans un ordre précis, l'ordre de montage du colis à expédier. La *Figure 14* présente l'exemple d'un colis avec une structure d'assemblage hiérarchique. Les différents niveaux permettent d'obtenir le colis du niveau 0 (ou niveau supérieur) à partir des éléments de niveau inférieur. Sur l'exemple, le colis est constitué de l'assemblage de trois éléments (un rouge, un vert et un jaune). L'élément rouge étant lui-même constitué de trois éléments.

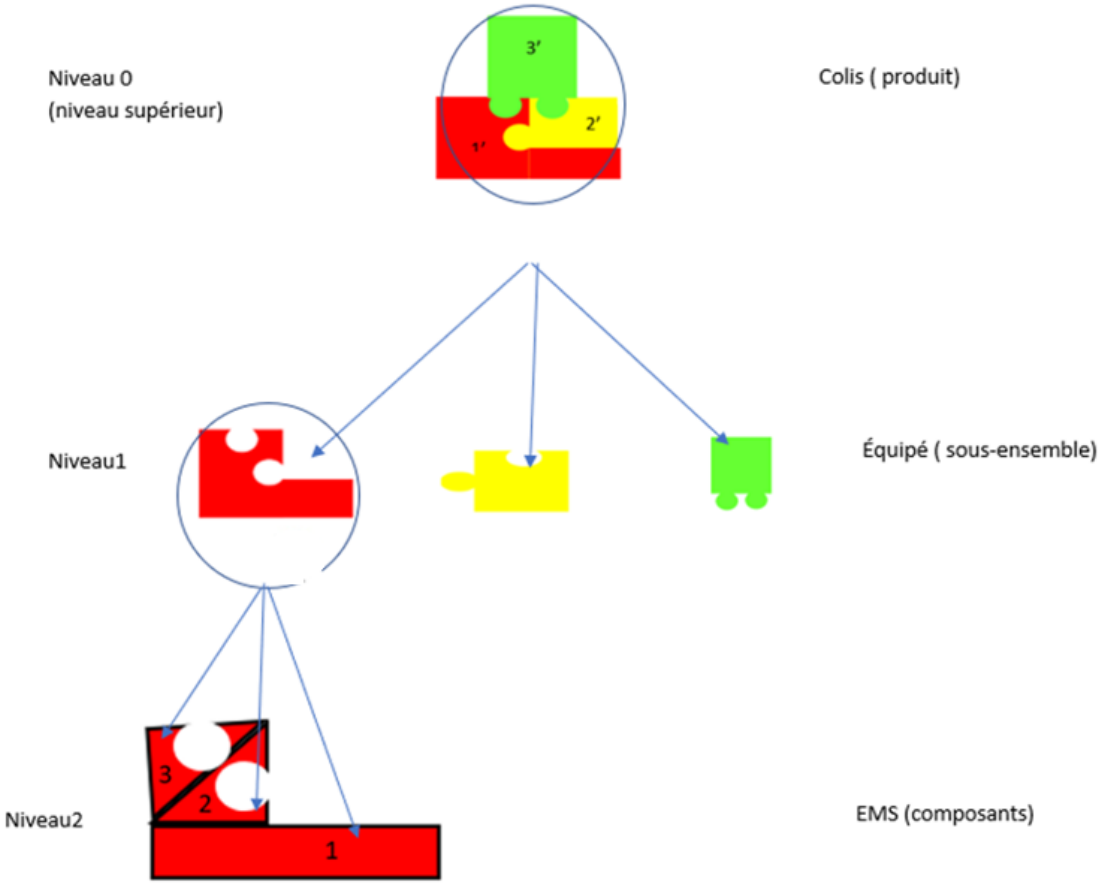


Figure 14 : Montage

Le montage est la dernière étape de la chaine de valeur, et de par cette position, la non-réception des EMS à temps et/ou dans l'ordre de montage génèrent des dysfonctionnements. Si trop d'EMS arrivent sur un poste, cela encombre l'atelier, augmente le nombre de manutention, allonge le temps d'assemblage, et peut entrainer des risques accrus d'accident. De plus, cela peut bloquer les postes de dépendage si la place nécessaire au stockage des EMS n'est plus suffisante dans l'atelier. A l'inverse, si les EMS n'arrivent pas dans le bon ordre, ou en trop faible quantité, cela peut interrompre les opérations d'assemblage et provoquer des périodes d'inactivité pour les opérateurs. Ces contraintes doivent être prises en compte lors de l'établissement de la séquence des EMS.

L'objectif est donc que chaque poste d'assemblage reçoive les EMS d'un même colis, dans l'ordre de montage physique (voir *Figure 14*) afin de réduire l'espace occupé par les EMS en attente, et d'accélérer le flux de sortie des colis. Un bon séquencement des EMS, et le respect de cette séquence est donc primordial pour atteindre cet objectif. De plus, cela permet une bonne synchronisation avec le magasin en charge d'approvisionner les postes de montage en composants.

I.3.2. Le système décisionnel : planification de la production

La planification de la production est un processus de prise de décision qui joue un rôle important dans la plupart des industries manufacturières. Elle se décline sur trois niveaux de décision (Bayard, 2023), où les décisions prises à un niveau deviennent des contraintes à satisfaire ou des objectifs à atteindre pour les niveaux inférieurs.

Le niveau le plus élevé concerne les décisions stratégiques (long terme). Ces décisions sont prises au niveau de la direction. Il s'agit d'une planification de la politique générale de l'entreprise dans son environnement (vision sur plusieurs années, mois). Ces décisions concernent, par exemple, la recherche de nouveaux partenaires industriels, la configuration de l'usine.

Le niveau intermédiaire concerne les décisions tactiques (moyen terme). Ces décisions sont prises sur un horizon moyen terme (de l'ordre de quelques jours à quelques semaines) et sont basées d'une part, sur la planification prévisionnelle élaborée au niveau stratégique, d'autre part, sur des considérations internes à l'entreprise (moyens matériels et humains : capacité des moyens de production, niveau de qualification du personnel, nombre d'effectif, etc.) et externes (commandes fermes et programmées, etc.). À ce niveau, on retrouve notamment la planification de la production qui vise à calculer un plan directeur de production. Dans ce plan, les quantités à produire par période sont calculées de façon à répondre aux demandes au moindre coût. Ces décisions tactiques sont des directives pour la production détaillée et la planification au niveau opérationnel.

Le dernier niveau concerne les décisions opérationnelles (court terme). Ces décisions consistent à gérer le fonctionnement de la production à court terme, de l'ordre de quelques heures à quelques jours. D'une part, elles s'appuient sur la planification à moyen terme pour déboucher sur un programme détaillé (séquencement des tâches de production), et d'autre part, elles assurent le suivi et le contrôle de l'exécution des différentes tâches programmées, la validation du processus. De plus, le re-séquencement apportent les corrections nécessaires au programme de séquencement en cas d'aléa.

Dans cette étude nous nous intéressons à la planification de la production à moyen et court terme. Dans la suite de cette section nous présentons le processus de planification de l'usine et nous allons insister sur la manière dont est fait le séquencement, et comment sont prises en compte les différentes contraintes vues plus haut. Nous présentons aussi le suivi et le contrôle de la production, puisqu'il est fortement lié au séquencement.

I.3.2.1. Le processus de planification et de séquencement

Le programme de production mensuel, fourni par le département marketing, est basé sur les commandes client et les dates souhaitées de livraison. De ce fait, le volume de produits à fabriquer sur la ligne de production diffère d'une journée à l'autre. En effet, du fait la demande variable des clients, il y a des jours où la charge de travail augmente et où l'entreprise est obligée de solliciter le volontariat des opérateurs pour gérer le surplus , alors que sur d'autres jours ses opérateurs sont sous-employés. Pour pallier au maximum à ce problème, le responsable de planification procède à un lissage de la production. Ce lissage se déroule en deux étapes successives : un lissage hebdomadaire (planification), afin d'avoir une production équilibrée d'une journée à l'autre d'une même semaine, et un lissage quotidien (séquencement) pour une production équilibrée et respectant au mieux les différentes contraintes tout au long d'une même journée.

I.3.2.1.1 La planification : lissage à la semaine

La planification consiste à décider du programme de production durant une semaine donnée. Le planning hebdomadaire pour la semaine S+1 est déterminé en semaine S (souvent le lundi). Etant

donné que chaque poste de montage est spécialisé dans l'assemblage d'un ensemble d'EMS, le lissage consiste à organiser la production de manière à répartir le volume de production pour lisser la charge de travail de chaque zone de montage sur tous les jours de la semaine.

Le lissage hebdomadaire est fait à l'aide d'un outil développé en interne s'appelant « Easy Planning ». Il permet d'obtenir un programme de production stable sur une semaine tout en prenant en considération les dates d'échéances des commandes et en respectant les contraintes de l'atelier (le potentiel de l'atelier, la capacité de chaque poste de travail, le calendrier de production, etc.). La *Figure 15* montre un exemple illustrant la différence entre la répartition du volume de production avant et après le lissage.

Répartition du volume de production avant lissage

Jour	1	2	3	4	TOTAL
Montage 1	10	90	5	55	160
Montage 2	70	0	25	25	120
Montage 3	0	1	37	42	80
Montage 4	10	12	7	11	40
TOTA	90	103	74	133	

Répartition du volume de production après lissage

Jour	1	2	3	4	TOTAL
Montage 1	40	40	40	40	160
Montage 2	30	30	30	30	120
Montage 3	20	20	20	20	80
Montage 4	10	10	10	10	40
TOTA	100	100	100	100	

Figure 15 : Lissage hebdomadaire

Les décisions prises au niveau de la planification (décisions à moyen terme) sont des données d'entrée pour le séquencement qui va suivre (décisions à court terme).

I.3.2.1.2 Le Séquencement : lissage quotidien

Le planificateur procède au séquencement le jour J pour le jour J+1. Le séquencement définit l'ordre d'envoi des EMS au pendage, en tenant compte au maximum des contraintes des différents ateliers (grenaillage, peinture, montage) pour la journée de production concernée. Les décisions prises à ce niveau ont un impact significatif sur la fabrication, le coût du produit, et le respect du délai de livraison.

Le séquencement est actuellement établi à la main, en appliquant la méthode Heijunka (nivellement de la production) sur des feuilles de calcul Excel. Le nivellement de la production est défini comme « *la répartition du volume et du mix de produits uniformément au cours d'une période de temps donnée (généralement une journée)* » (Liker, 2004). Il s'agit de tendre vers un séquencement cyclique. Dans cette perspective, le planificateur définit un cycle de base, qui sera répété jusqu'à satisfaire

l'ensemble de la demande. L'objectif est d'équilibrer la charge de travail des différentes zones de montage, et de respecter les enchainements des EMS dans leur ordre de montage.
La *Figure 16* présente un exemple de lissage par volume et mix de zones de montage.

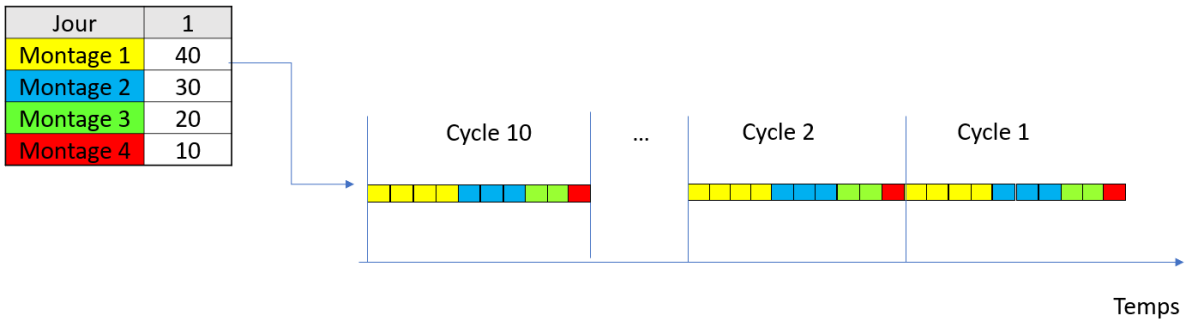


Figure 16 : Lissage par volume et mix de zones de montage

Au moment où nous avons commencé notre étude, Il fallait quatre heures au planificateur pour réaliser ce séquencement. De plus, ce séquencement était souvent modifié en raison d'aléas d'approvisionnement, des choix des pendeurs par exemple. Par ailleurs, ce séquencement proposé présente des limites par la forme et le contenu. À cause de la diversité des EMS et du nombre d'EMS à séquencer (une centaine), le planificateur est confronté à un travail laborieux et difficile à accomplir manuellement. En conséquence, le séquencement proposé sur des documents papier est difficile à lire, peu détaillé, avec des désignations parfois incomplètes (abréviations). La deuxième limite est que le planificateur se concentre principalement sur le lissage de la production, des différents postes de montage, à la fois par le volume et par le mix produits, sans prendre en considération toutes les contraintes et objectifs de production que nous avons mentionnés dans les sections précédentes (voir Section I.3.1).

I.3.2.2 Le lancement et suivi de production

À la suite du travail de séquencement, le planificateur fournit une version imprimée du séquencement (voir *Figure 17*), puis la transmet aux pendeurs. Ce document est accompagné de nombreuses listes à servir « volantes », qui fournissent des informations complémentaires sur les caractéristiques des EMS à pendre, telles que la référence, le poids, la couleur, et les standards de pendage.

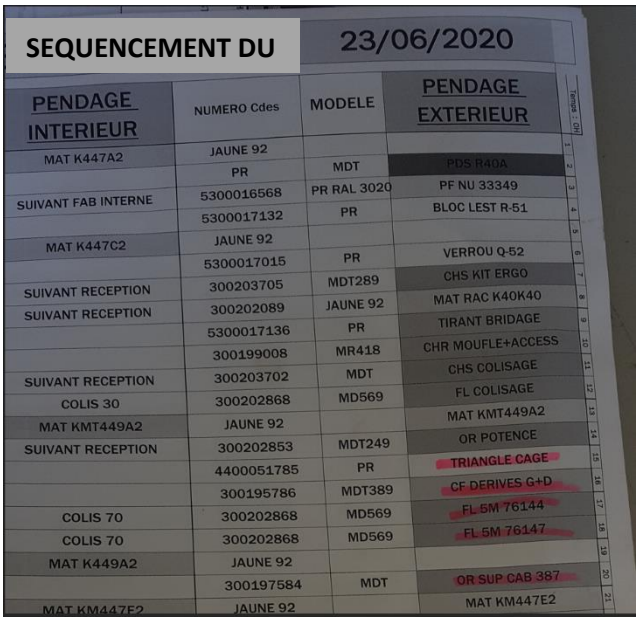


Figure 17 : Le séquencement journalier

Du fait de l'organisation de l'usine et de son fonctionnement (postes de travail distants, rotation des postes, etc.), et des moyens technologiques (manque de partage d'information, et d'outils d'aide à la décision), le pilotage est décentralisé. Chaque poste de travail (pendage, peinture) est libre quant aux décisions qu'il prend. Cette liberté conduit le plus souvent à une logique d'optimisation locale. Par exemple, au niveau du pendage, si le palonnier qui se présente au poste n'a pas la configuration adaptée à l'EMS prévu par le séquencement, l'opérateur cherche un EMS plus loin dans le séquencement prévisionnel. Il gagne ainsi du temps en évitant le changement de configuration, mais il ne respecte pas les priorités donner par le séquencement prévisionnel. Aussi, au niveau de la peinture, les peintres peuvent modifier la séquence afin de réduire le nombre de purges, sans penser que cela peut nuire au dépendage qui va suivre.

Pour suivre l'exécution du séquencement prévisionnel, le planificateur doit attendre la fin du cycle de production, c'est-à-dire le lendemain, pour collecter les informations sur l'exécution des opérations, et donc d'apprécier le respect du séquencement. Actuellement, sur le document qui donne le séquencement, les pendeurs se contentent de surligner les EMS pendus, mais sans indiquer dans quel ordre les EMS ont été envoyés. Et en cas de changement d'ordre, ils n'indiquent pas si ce changement est lié à des problèmes empêchant le pendage de l'EMS planifié (absence de l'EMS ou EMS non trouvé dans le stock par exemple).

Les opérateurs de chaque poste ne disposent que d'une vue locale et partielle du système de production global. De plus, les indicateurs sur lesquels leur travail est jugé ne sont pas toujours en adéquation avec l'objectif global de l'usine. Par exemple dans les postes de pendage, le critère à optimiser est le nombre de palonnier chargé. Pour améliorer cet objectif les pendeurs évitent tout changement de série quitte à ne pas respecter le séquencement, et tendent à envoyer des palonniers presque vides (palonniers sous-chargés). Leurs choix s'appuient sur une vision réduite et locale conduisant à des décisions inadaptées, dans le but premier d'optimiser leurs contraintes et objectifs. Ce mode de fonctionnement conduit à des performances globales insatisfaisantes par rapport aux résultats attendus et à de nombreux dysfonctionnements.

I.4. La problématique et les contributions attendues

Dans cette dernière section, nous donnons la problématique et les contributions de cette thèse. Nous présentons tout d'abord notre problématique de recherche, puis les résultats complémentaires et intégrés qui servent à résoudre cette problématique. Pour finir, nous décrivons les principales contributions du travail, qui constituent les chapitres suivants de ce manuscrit.

I.4.1. L'objectif de Manitowoc et les enjeux scientifiques soulevés

Au sein de l'usine, le *Lead Time* (entre le pendage et le dépendage) est très variable et souvent long (environ 13h). Ceci est dû à la grande diversité des composants à fournir aux postes de montage et à la complexité des flux liée au système de convoyage rigide. Manitowoc a déjà augmenté le nombre d'opérateurs sur les postes de montage pour faire face à ce problème et ainsi tenter de livrer ses clients à temps. Cette solution a légèrement amélioré les délais de livraison, mais elle a dégradé la productivité. Après analyse de la situation, le séquencement de la production s'est avéré en être une des causes principales.

L'étude de terrain a montré les limites des outils de planification existants et la difficulté de fournir manuellement un séquencement journalier pour l'approvisionnement des postes de montages. La planification et le séquencement actuels sont des tâches difficiles car elles doivent prendre en compte de multiples facteurs. De ce fait, le planificateur se concentre uniquement sur le lissage de la production par volume et mix de produits, ce qui ne permet pas une optimisation à l'échelle de l'entreprise dans sa globalité. De plus, il se heurte à d'autres difficultés qui rendent rapidement

obsolètes la planification et le séquencement établis. En effet, les postes de travail ont leurs propres contraintes liées à la nature du produit fabriqué. Les opérateurs optimisent donc localement leur activité et ne prennent pas nécessairement en compte les objectifs globaux d'optimisation des flux. Par exemple, au niveau de la grenailleuse, le critère à optimiser est d'espacer les composants nécessitant un temps de cycle (30min) supérieur au *takt time (9min)*, pour éviter la formation des goulets d'étranglement. Au niveau des cabines de laque, les critères à optimiser sont la consommation de laque et les changements de série, ce qui conduit à regrouper les composants par couleur. En conséquence, chaque poste travaille pour son intérêt propre et tente de trouver une solution pour optimiser le critère important pour lui, indépendamment des besoins et contraintes des autres ateliers. Au final, ces décisions locales impactent fortement l'atelier de montage et engendrent des retards de livraisons importants.

Comme nous l'avons vu plus haut, l'objectif principal de Manitowoc est de satisfaire le besoin client, en livrant les colis en temps et en ordre voulu avec la meilleure rentabilité possible. La question est maintenant de savoir comment satisfaire cet objectif, et quoi mettre en place pour un résultat efficace et pérenne. Un outil de planification et de séquencement avancé est nécessaire pour prendre en compte les diverses contraintes et l'ensemble des objectifs opérationnels et tactiques. Mais est-ce utile si le séquencement n'est pas suivi aux différents postes de production ? Cette question globale est très importante et nous interroge sur d'autres questions :

- *Que faut-il mettre en place pour développer l'implication des opérateurs en leur donnant de l'autonomie sans dégrader la qualité du séquencement* ?
- *Le Lean peut-elle avoir un impact positif sur la responsabilisation et l'apprentissage individuel et collectif des opérateurs* ? *S'adapte-t-elle bien à des environnements avec de faibles volumes et une forte diversité de produit (HMLV*) ?
- *La disponibilité d'informations de qualité et pertinentes n'est-elle pas indispensable ?, et comment mettre ces informations à disposition pour une meilleure réactivité face aux problèmes rencontrés au quotidien des opérationnels ?*

Toutes ces questions sont complexes, et ne sont pas indépendantes les unes des autres. C'est ce qui fait que le problème à traiter ici est multi-facette, et qu'une approche globale est nécessaire pour que la solution proposée soit efficace et puisse évoluer dans le temps, en fonction des évolutions de l'entreprise.

I.4.2. Des outils complémentaires et intégrés au service d'un objectif unique

L'objectif de cette thèse est de développer et d'implémenter une solution intégrée basée sur les pratiques Lean, la digitalisation, et l'optimisation du séquencement pour améliorer les processus de production chez Manitowoc. Le développement d'un système de séquencement performant est un point central, très attendu par Manitowoc pour garantir une bonne synchronisation des processus de production. Il consiste à trouver une solution qui prend au mieux en compte les contraintes variées des différents ateliers, et optimise au mieux les différents objectifs de l'entreprise.

Mais résoudre ponctuellement un problème de séquencement n'est pas suffisant pour assurer le bon fonctionnement de l'usine. En effet, le développement d'un bon séquencement nécessite une visibilité permanente de l'information et une traçabilité des produits tout au long de la chaine logistique. Cette accessibilité à l'information en temps réel est d'une grande utilité aux niveaux décisionnels à moyen et court terme. Au niveau tactique, la visibilité de l'information permet une meilleure planification. Au niveau opérationnel, la remontée de données en temps réel depuis l'atelier permet de surveiller l'état de l'atelier et réagir rapidement face aux aléas qui peuvent survenir en cours de la production.

Aussi, comme une grande partie des opérations reste manuelle, la bonne exécution du séquencement est fortement soumise aux décisions prises localement par les opérateurs. Ce facteur humain induit beaucoup de variabilité qui peut impacter négativement la performance du séquencement déjà établi, et ainsi la performance globale du système. L'engagement des opérateurs est donc aussi un point central de la démarche. Manitowoc a la chance d'avoir mis en place depuis de nombreuses années la démarche Lean sur tous ses sites de production, et particulièrement sur le site de Moulins. C'est sur cette base solide que pourra s'appuyer notre travail de recherche.

L'outil d'aide au pilotage, basé sur un outil de planification et de séquencement avancé, s'appuiera sur une digitalisation intelligente du cycle de vie du produit. Il devra prendre en considération les contraintes des opérateurs face à l'exécution du séquencement, mais il sera aussi un outil de responsabilisation et d'apprentissage individuel. Il devra permettre de développer l'autonomie des opérateurs et constituera également un outil d'apprentissage collectif qui permettra de développer le travail d'équipe.

I.4.3. Les contributions de la thèse

Afin de répondre à ces différents défis, nous présenterons les contributions de ce travail de recherche selon trois points de vue différents mais corrélés comme l'illustre la *Figure 18*. Il s'agit tout d'abord de la mise en place de la démarche Lean pour faire en sorte que les séquencements prévus soient au mieux respectés. Ensuite, les conditions de mise en œuvre de l'outil d'aide au pilotage global passent par une digitalisation intelligente du cycle de vie du produit. Enfin, la recherche d'une bonne planification et d'un séquencement optimisé nécessite le développement d'un outil sur mesure. Ces contributions ne sont pas indépendantes, chacune prenant en compte des éléments, des contraintes, des objectifs des autres. Même si chaque chapitre correspond à un angle d'attaque, l'ensemble des chapitres semblent interdépendants.

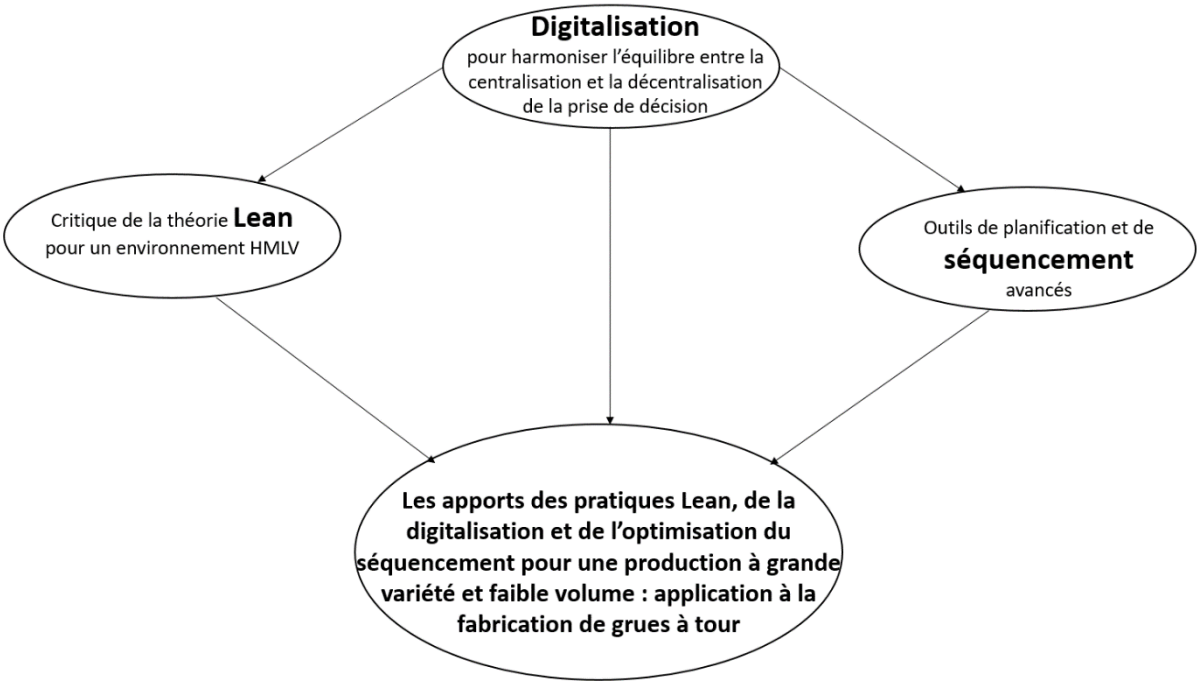


Figure 18 : Les contributions de la thèse

Le chapitre 2 s'intéresse à l'utilisation du modèle Lean pour répondre à la problématique de la thèse. Il propose une critique de l'utilisation du Lean dans un environnement industriel avec de fortes contraintes de production et une grande variabilité des produits (environnement HMLV).
Une étude de terrain ainsi que des expérimentations réalisées apportent des éléments de réponse sur la compatibilité du Lean avec ses environnements, et montrent aussi en quoi l'application du Lean peut contribuer à d'une part, améliorer la qualité de l'apprentissage de la coopération des collaborateurs au sein de l'organisation, et d'autre part, améliorer la qualité de l'apprentissage et l'autonomie décisionnelle des opérateurs. Nous présenterons également certaines limites identifiées du Lean par les expérimentations terrain sur le périmètre d'étude notamment sur l'axe Juste à Temps. De plus ce chapitre tentera de discuter des aspects de centralisation/décentralisation des prises de décisions des opérationnels (autonomie des équipes) pour une meilleure performance globale.

Le chapitre 3 est consacré à la digitalisation de l'usine pour d'une part faciliter la mise en œuvre des outils Lean et d'autre part de permettre le déploiement de l'outil de planification et de séquencement. Dans ce chapitre, nous montrerons dans quelle mesure un certain nombre d'outils Lean nécessitent d'avoir des informations pertinentes et actualisées, pour tirer profit au maximum des outils qui sont proposés. En particulier, il est intéressant de voir comment la digitalisation permet de donner les moyens nécessaires aux opérateurs pour réajuster le séquencement en cas d'aléas, via des outils de suivi de production, des alertes et des préconisations sous forme de remontées de problèmes. Pour fonctionner au mieux, l'outil de planification et de séquencement prédictif doit bénéficier des informations sur l'état actuel des ateliers pour proposer les solutions les plus justes possibles en fonction des commandes à satisfaire. Tout ceci n'est possible que par une digitalisation intelligente de l'usine et des différents postes de travail au niveau du périmètre de l'étude (système de convoyage).

Le chapitre 4 est dédié à l'outil de planification et de séquencement avancé. Le problème de séquencement à traiter est un problème fortement combinatoire, multi-objectifs, et avec des contraintes très variées qui n'apparaissent généralement pas simultanément dans un même problème. Il appartient à la classe des problèmes mathématiques NP-difficiles, quel que soit le critère d'optimisation privilégié, puisqu'il contient naturellement des sous-problèmes eux-mêmes NP-difficiles au sens fort. La première difficulté, avant de tenter de le résoudre, et de le modéliser finement, est de décider ce qui doit être considérer comme des contraintes à respecter, ou des objectifs à poursuivre. Et pour l'ensemble des objectifs, comment les prendre en compte simultanément pour que l'objectif global d'un fonctionnement harmonieux du système de production soit respecté. Du fait de cette extrême difficulté, les méthodes de résolution mathématique choisies sont des méthodes approchées.

I.5 Conclusion

Dans ce premier chapitre, nous avons présenté en détail le contexte industriel sur lequel s'est déroulée cette thèse. Pour cela, nous avons présenté le produit fabriqué et son niveau de personnalisation qui conduit à un produit unique. Nous avons ensuite présenté la chaine logistique de Manitowoc et ses déférents départements, en nous focalisant sur le département de production. Ce département est caractérisé par la complexité de son processus de production, la grande diversité des composants gérés, et la multitude des paramètres à optimiser. Tout ceci complexifie la prise de décision et pousse le processus de planification et de séquencement actuel à ses limites. Les éléments présentés dans ce chapitre permettent de comprendre les caractéristiques du cas d'étude (le système de convoyage), les limites des outils actuels et de décrire la problématique traitée dans ce travail.

Par ailleurs, L'objectif principal de l'entreprise est de satisfaire le besoin client avec le respect des délais. Afin d'atteindre cet objectif, l'étude vise à proposer un outil d'aide au pilotage performant et

apprenant pour l'organisation globale de la chaine logistique. La complexité du problème étudié nécessite l'intégration de trois briques complémentaires et intégrées (Lean pour la prise de décision ambivalente : centralisation et décentralisation, digitalisation intelligente, et outils de planification et de séquencement avancés) afin de proposer une solution globale capable d'apporter une réponse pertinente à la problématique étudiée. Cette thèse montrera comment sont mis en place des outils globaux pour les environnements HMLV en prenant en compte simultanément des aspects souvent abordés indépendamment : l'optimisation du séquencement, les processus permettant de garantir un bon suivi de séquencement, et les outils de digitalisation permettant de faire fonctionner l'ensemble des activités.

Chapitre II : Critique du Lean pour un environnement de fabrication à grande variété et à faible volume

II.1 Introduction et objectifs

La production industrielle est un moteur de croissance économique, qui contribue à améliorer la situation économique et sociale d'un pays. L'industrie a connu une évolution significative au cours des siècles, à travers différents paradigmes (Kumar, 2007 ; Hu,2013 ; Pizoń et Gola, 2023). Elle est passée d'une production artisanale à une production de masse avec le modèle T d'Henry Ford. Par la suite, elle a été inspirée par les progrès réalisés par le modèle productif issu du Toyota Production Système (TPS) à partir de 1970, qui est devenu la référence pour répondre aux besoins de personnalisation de masse. Ces développements ont été principalement motivés par les conditions du marché et les demandes des consommateurs pour des produits variés et personnalisés (Sikhwal et Childs, 2021).

Pendant plusieurs siècles, la production industrielle était principalement basée sur l'artisanat. Dans ce modèle productif, les produits étaient conçus selon les spécifications et les demandes des clients. Cette approche permettait une certaine personnalisation, mais elle était coûteuse. À cette époque, il n'y avait pas de systèmes de fabrication standardisés ou de processus de production organisés. De plus, les fournisseurs de produits artisanaux étaient généralement concentrés dans des régions géographiques spécifiques. Cette localisation restreinte limitait leur capacité à répondre à une demande plus large et à s'étendre à de nouveaux marchés (Hu, 2013).

Au début du XXème siècle, la production de masse, dominée par le système de production américain a révolutionné l'industrie Manufacturière. Cette révolution est souvent associée à Henry Ford, qui a mis en place un nouveau modèle d'organisation du travail, autour du concept de "*Flux*" sous forme de chaîne de montage découpée en tâches (Bysko et al., 2020). Ce modèle productif a permis d'éviter aux opérateurs de se déplacer et par conséquent de perdre du temps dans leur travail (Ford et Crowther, 1922). Cette nouvelle organisation du travail a permis de fabriquer en grande quantité la fameuse Ford T noire. Ce système fit exploser la productivité. Mais il était peu flexible à la demande des clients qui demandaient plus de variétés. A cette époque la diversité de la demande ne pouvait pas cohabiter avec un processus de production dédié à fabriquer un seul modèle de produit.

Le premier choc pétrolier a été un catalyseur majeur pour la remise en question du modèle de production fordiste, et permettre l'avènement du TPS. Sur les bases du Jidoka et Juste à temps (les 2 piliers du TPS), Toyota pouvait produire efficacement et rapidement des véhicules de meilleure qualité, à moindre coût qui satisferont les demandes variées de produits (Park et Shintaku, 2022). La supériorité économique de Toyota par rapport aux autres constructeurs a motivé des recherches sur le TPS. En 1990, ce « système japonais » qui allait devenir connu sous le nom de « LEAN » a été popularisé dans le livre The Machine That Changed the World (Womack et al., 2007). Ce livre est basé sur l'étude menée par l'International Motor Vehicle Programme (IMVP) et centrée sur l'avantage compétitif de Toyota.

Le Lean s'est popularisé comme étant le modèle qui a bouleversé le monde industriel vers plus de compétitivité. Il est caractérisé comme l'une des approches les plus réussies (Powell, 2018). Le Lean répond aux besoins du marché : réduction des coûts, amélioration de la qualité, réduction des délais de livraison afin de permettre aux organisations de gagner un avantage concurrentiel (Tomašević et al., 2021). Cette supériorité productive est soutenue par diverses implémentations réussies des pratiques Lean dans des environnements stables et standard à fort volume de production et à faible

variété de produits. Depuis quelques années, le Lean est de plus en plus adopté dans des contextes spécifiques de fabrication à grande variété et à faible volume (HMLV) (Danese et al., 2018). La fabrication HMLV possèdent des caractéristiques intrinsèques qui peuvent sembler être éloignée de l'environnement où le Lean a été développé pour la première fois (Tomašević et al., 2021).

La plupart de la littérature sur la mise en œuvre du Lean se concentre sur la fabrication centrée sur le produit, répétitive et pour stock, caractérisée par une demande constante de volumes élevés de produits similaires (Braglia et al., 2020 ; Tomašević et al., 2021). Peu d'études ont examiné de manière détaillée si le Lean est compatible avec les industries HMLV (Braglia et al., 2019). Ainsi les modèles de mise en œuvre du Lean présentés dans la littérature sont généralement basés sur des outils, traitant un nombre limité de cas simplifiés qui ne répondent pas entièrement à la complexité de l'industrie HMLV (Tomašević et al., 2021).

L'objectif de ce chapitre est de présenter l'expérience de mise en œuvre du Lean dans l'entreprise Manitowoc. Une première partie traitera de l'évolution historique des modèles Lean adoptés par cette entreprise (notamment le site de Moulins), avec comme angle d'étude les succès et les échecs. La deuxième partie analysera les convergences et les divergences issues de la littérature sur les compatibilités du Lean et ses modèles d'adoption au sein des environnements de type HMLV, afin d'explorer et analyser comment l'interprétation du Lean peut influencer les réussites et les échecs de sa mise en œuvre dans ces environnements. Enfin dans la dernière partie, un ensemble d'expérimentations du Lean sera présenté et discuté dans le cadre du périmètre d'étude de cette recherche.

II.2. Le Lean sur le site industriel de Manitowoc à Moulins : les constats de réussites et d'échecs

II.2.1 Cartographie des changements organisationnels de la gestion de performance

Au cours des dernières décennies, l'évolution de l'entreprise Manitowoc en terme d'organisation industrielle et de gestion de sa performance a été influencée par différents paradigmes, notamment le Fordisme. Puis, il y a plus de 10 ans, le Lean a été introduit dans ses différentes usines. Le but premier, comme beaucoup de grands groupes américains, est de s'adapter aux évolutions du marché et aux nouveaux besoins changeants des clients.

A ses début, l'entreprise Manitowoc a adopté certains principes du Fordisme, notamment durant les « Trente Glorieuses ». Cela a permis d'apporter un changement dans la manière de gérer la performance des usines par l'introduction de la chaîne de production mobile. Ce système se concentrait sur l'exploitation des économies d'échelle par le biais de la standardisation des produits, des tâches et des employés (Alizon et al, 2008). La standardisation des produits a permis à l'entreprise Manitowoc de soutenir le marché de la reconstruction, florissant dans l'après-guerre. La peinture « Jaune Potain » qui recouvrait alors les grues est certainement le meilleur exemple de cette standardisation, rappelant le noir systématique des Ford T.

De plus, la standardisation des tâches opérationnelles des salariés a été introduite selon le modèle fordiste. Elle consistait à diviser le travail en opérations simples et répétitives, regroupant les salariés par compétence. Par exemple, avec le déploiement du convoyeur au sein des usines de Manitowoc, les produits avancent pas à pas sur la ligne de fabrication. À chaque étape de production, les opérateurs ont une responsabilité limitée sur une minime partie de la chaîne de fabrication (Vidal, 2007).

Cette approche a favorisé une structure hiérarchique et pyramidale, avec un management opérationnel qui gèrent les opérations et supervisent les opérateurs qui les exécutent. Les décisions

importantes telles que la planification de la production, l'affectation des ressources et l'élaboration des procédures, sont généralement prises au plus haut sommet de la hiérarchie. Ces décisions circulent de manière descendante vers les opérateurs. Ils jouent un rôle limité en termes de prise de décision et sont principalement considérés pour seulement suivre les procédures et les instructions fournies par leurs supérieurs (Cusumano et al., 2021). Leur travail est souvent répétitif et spécialisé, ce qui limite leur autonomie et leur capacité à influencer les décisions. Les problèmes ne sont généralement résolus que par les services support (maintenance, qualité, méthode/industrialisation) et les opérateurs ne prennent généralement pas d'initiatives pour les faire remonter, et encore moins contribuer à les résoudre.

Devant un marché de plus en plus dynamique et incertain, le modèle productif fordiste s'est avéré moins adapté aux besoins diversifiés et changeants. Dans un soucis de pérennisation et de compétitivité face à la concurrence de plus en plus rude, l'entreprise Manitowoc a développé un système appelé « ***Manitowoc Operating System – MOS*** ». Ce système d'excellence opérationnelle est basé sur l'ensemble des principes fondamentaux du Lean. Le MOS visait à créer un système flexible et adaptable qui pouvait s'ajuster aux demandes évolutives du marché et aux besoins spécifiques des clients.

Ce système a été introduit en 2013 uniquement sous forme de manuel diffusé aux managers pour appliquer le Lean, sans formation, ni soutiens appropriés. Cela a conduit à une perception limitée du Lean en tant que simple collection d'outils. L'accent était mis sur l'application d'outils et de techniques spécifiques, sans une compréhension approfondie des principes sous-jacents et sans l'engagement réel des salariés.

L'une des initiatives Lean majeures lancées par ce manuel est la transformation vers une organisation en flux de valeur ou chaîne de valeur (value streams management) (Powell et Bartolome, 2020). L'idée principale est de regrouper les salariés des usines en fonction d'une famille de flux de produits et d'informations au lieu de les regrouper seulement en fonction de leurs compétences métiers et en silo. Cette approche clé du Lean vise à augmenter la valeur pour le client, éliminer les gaspillages et libérer de la capacité des usines. Les gaspillages sont définis comme tout ce qui ne crée pas de valeur pour les clients (Womack et al., 2007). L'élimination des gaspillages libère plus de temps pour les opérateurs et les machines, plus d'espace dans les installations, et plus de capacité disponible pour développer l'entreprise. Cela conduit à une création de plus de valeur et pour une meilleure satisfaction des clients, qui se traduit par plus de ventes.

Toutefois, en limitant le Lean à une simple boîte à outils, où chaque département ou équipe sélectionne et utilise des outils de manière isolée, sans feuille de route claire, et avec un appui de la direction insuffisant, la mise en œuvre du MOS a entraîné une fragmentation des efforts et une inefficacité dans l'utilisation du Lean. Cette approche fragmentée n'a pas atteint les résultats escomptés (Amaro et al., 2019).

En 2016, la nouvelle direction de l'entreprise Manitowoc, a identifié des lacunes dans la manière dont le Lean était interprété et appliqué au sein de l'organisation des usines. Elle a mis en place un nouveau système appelé "***The Manitowoc Way***". L'objectif de ce système est de créer une culture efficace, pilotée par la rapidité et l'innovation, dans tous les services de l'entreprise Manitowoc. « The Manitowoc Way » vise à développer et à mettre en œuvre des stratégies Lean pour améliorer continuellement l'efficacité, la rentabilité et la création de valeur pour les principaux acteurs de l'entreprise notamment (voir *Figure 19*) :

- les clients qui veulent des produits personnalisés, de très bonne qualité, des livraisons à temps et des coûts les plus bas du marché ;

- les actionnaires qui veulent de la rentabilité, des dividendes élevés et de la croissance forte ;
- et les salariés qui veulent de la sécurité, des opportunités et de meilleurs conditions de travail.



Figure 19 : L'objectif et la cible de Manitowoc

La nouvelle direction a fait de la culture Lean une priorité stratégique au sein de l'entreprise Manitowoc. Elle a accordé une attention particulière à la formation efficace et pérenne au Lean pour diffuser un langage commun. L'entreprise a mis en place des formations et des programmes de sensibilisation à tous les niveaux de l'organisation en commençant par un accompagnement des directions jusqu'aux opérateurs – formations adaptées à chaque public.

Elle a également encouragé une culture d'amélioration continue au sein de l'entreprise. Les salariés sont encouragés à remonter les problèmes, à participer activement à la recherche de solutions et à se sentir responsables de la performance globale de l'entreprise.

L'entreprise Manitowoc a lancé une transformation majeure en adoptant le Lean comme une approche stratégique. Cette approche va au-delà de l'utilisation d'outils et met l'accent sur la transformation culturelle et organisationnelle, qui implique tous les niveaux de l'entreprise, depuis la direction jusqu'aux opérateurs.

Le *Tableau 1*, présente les caractéristiques des trois systèmes de production adoptés successivement par Manitowoc. En comparant ces systèmes, on constate que le Fordisme présentait des caractéristiques telles que la standardisation rigide, l'organisation pyramidale et la faible autonomie des opérateurs. Le MOS a tenté de se défaire de certaines limites du Fordisme en se basant sur les principes du Lean Management, mais il a connu des difficultés liées à une mise en œuvre fragmentée et un manque d'engagement réel des salariés. « The Manitowoc Way » a émergé comme une approche stratégique pour développer une culture Lean au sein de l'entreprise Manitowoc, en encourageant la formation, l'implication et la responsabilisation de tous les salariés.

Tableau 1 : Evolution des systèmes de production adoptés par Manitowoc

Système de production	Caractéristiques
Fordisme	• Chaîne de production mobile ; • Standardisation des produits, des tâches et des employés ; • Organisation pyramidale avec une autorité centrale ; • Recherche d'économies d'échelle ; • Implication limitée des opérateurs dans la prise de décision.
MOS	• Transition vers une organisation en flux de valeur ; • Flexibilité et adaptation aux demandes du marché ;

	• Limitation du Lean à une simple boîte à outils ; • Absence d'une stratégie claire et de soutien de la direction ; • Fragmentation des efforts et inefficacité dans l'utilisation du Lean.
The Manitowoc Way	• Priorité stratégique donnée à la culture Lean ; • Fort soutien de la direction pour la culture Lean ; • Donner du sens aux membres de l'organisation ; • Formation à tous les niveaux de l'organisation pour développer un langage commun et une compréhension approfondie du Lean ; • Transmission des apprentissages et partage des connaissances.

II.2.2. Les succès majeurs du Lean sur le site de Moulins

La mise en œuvre du Lean au sein de l'entreprise Manitowoc a apporté des succès. Certaines pratiques opérationnelles ont joué un rôle important dans cette réussite. Parmi ces pratiques nous pouvons citer : l'organisation en flux de valeur et le système Lean kitting. Cette section présentera ces deux pratiques Lean opérationnelles dans le détail chez Manitowoc - site de Moulins en insistant notamment sur les méthodologies utilisées et l'impact sur certains indicateurs de performance.

II.2.2.1 La Transition vers une organisation en flux de valeur

Le passage d'une organisation traditionnelle « fordiste » à une organisation en flux de valeur a été un changement fondamental dans l'organisation hiérarchique de l'entreprise Manitowoc et dans son fonctionnement.

Avant de présenter les principaux avantages liés à cette transition, il est nécessaire de définir le concept de flux de valeur et la chaine de valeur idéale selon l'entreprise Manitowoc pour ses différentes usines.

Un flux de valeur est défini comme l'ensemble de toutes les actions spécifiques requises pour amener un produit spécifique (qu'il s'agisse d'un bien, d'un service ou, de plus en plus, d'une combinaison des deux) à travers les trois tâches de gestion critiques de toute entreprise (Womack et Jones, 1997):

- la tâche de résolution de problèmes allant du concept au lancement de la production, en passant par la conception détaillée et l'ingénierie ;
- la tâche de gestion de l'information allant de la prise de commande à la livraison, en passant par la planification détaillée ;
- la tâche de transformation physique passant des matières premières à un produit fini entre les mains du client.

A partir de cette définition, l'entreprise Manitowoc considère qu'une chaine de valeur idéale (Voir *Annexe 3*) :

- comprend toutes les activités qui contribuent à la création de valeur pour les clients ;
- se compose d'une équipe dédiée de personnes travaillant ensemble pour améliorer le flux et créer plus de valeur ;
- organise les personnes autour du flux du produit ou du service vers le client ;
- comprend toutes les personnes directement et indirectement nécessaires pour soutenir l'opération ;
- se compose de personnes qui se consacrent à un seul flux de valeur ;
- est dirigée par un gestionnaire de flux de valeur avec un contrôle complet de chaque aspect de l'opération de flux de valeur.

L'approche Lean remet en question la fabrication traditionnelle basée sur la production en lots importants. Dans une production « Lean », le regroupement de produit par lots est éliminé et l'accent est mis sur le flux continu (Rossini et al., 2023). De la même manière, contrairement à l'approche

traditionnelle qui regroupe les salariés dans des silos ou des groupes fonctionnels, le Lean promeut un nouveau mode de gestion basé sur le flux de valeur (Amaro et al., 2019).

Auparavant l'entreprise Manitowoc s'organisait en groupes fonctionnels avec des services de production, de logistique, de qualité, d'achats et d'ingénierie distincts. Chaque service se concentrait sur ses propres tâches et objectifs associés, voire contradictoires d'un point de vue globale. C'est pourquoi le travail en silo a généré des barrières à la communication et à la collaboration. De plus, dans une organisation en silos, la structure hiérarchique est souvent valorisée, avec une autorité descendante du haut vers le bas (Cusumano et al., 2021). Ce type de structure organisationnelle peut limiter l'autonomie et l'initiative des salariés (Ballé et al., 2019).

En réaction, basant sa stratégie sur la pensée Lean, l'entreprise Manitowoc a organisé ces usines avec une approche basée sur le flux de valeur. L'organisation actuelle de Manitowoc se concentre sur le processus et son flux plutôt que sur le travail spécifique des différentes fonctions. Toutes les fonctions travaillent ensembles comme une seule équipe. Les fonctions identifient et mettent en œuvre des actions correctives en cas de perturbation du flux d'informations et du produit. La fabrication Lean est également associée au développement des personnes et à la création d'une culture de résolution de problèmes en engageant et en impliquant tout le monde dans la résolution de problèmes (Ballé et al., 2019).

Lors de la transition vers une organisation en flux de valeur, Manitowoc a pu bénéficier de plusieurs avantages, existant préalablement dans le MOS, le référentiel Lean interne au groupe Manitowoc :

- ***La focalisation sur la valeur apportée aux clients***

« Les flux de valeur éliminent les barrières fonctionnelles pour permettre une bonne communication entre les personnes travaillant dans le même flux. Cela crée également un sens partagé de la mission parce que les membres de l'équipe travaillent ensemble pour servir des clients identiques et aider l'entreprise à se développer. »

- ***L'amélioration de la maîtrise de la performance***

« L'organisation en value Stream améliore le contrôle de la valeur pour les clients. À partir du flux de valeur P&L (profit et perte), ainsi qu'aux indicateurs de performance clés (KPI), il est possible de comprendre les facteurs qui influencent le flux, de la prise de commande à la livraison. Cela permet également de mieux évaluer la capacité de réponse à la demande des clients de plus en plus versatile et incertaine. »

- ***L'amélioration de la facilité et la rapidité de l'amélioration continue***

« L'amélioration continue est la pierre angulaire du Lean. Une équipe intégrée dans un flux de valeur est généralement plus efficace en matière d'amélioration continue car cela relève clairement de sa responsabilité. Les mesures des KPI du flux de valeur conduisent à l'identification de nouveaux chantiers d'amélioration lors des réunions quotidiennes et hebdomadaires. La résolution de problèmes en temps réel dans les cellules de production avec les services de support fait partie intégrante de l'amélioration globale de la chaîne de valeur. »

- ***La création d'une mentalité collective de résolution de problèmes***

« Une organisation en value stream favorise également la création d'une mentalité d'amélioration continue au sein de l'entreprise. Les équipes travaillant au sein des flux de valeur adoptent une approche de résolution de problèmes dans leur travail quotidien. Elles développent une compréhension approfondie du flux de valeur. De plus elles sont impliquées dans des équipes inter fonctionnelles et cela contribue à un meilleur engagement dans des activités d'amélioration pour la pérennité du site industriel. »

- ***La décentralisation de certaines prises de décision pour une réponse plus rapide et une meilleure qualité***

« Lorsqu'il y a une même équipe habilitée et formée dans un flux de valeur, les décisions du quotidien peuvent être prises par les opérationnels. Ils disposent de toutes les informations, des méthodes de travail standardisées et peuvent prendre des décisions rapides qui servent le client afin de résoudre les problèmes plus efficacement. Les décisions prises sont meilleures, plus rapides et plus réactives. »

L'organisation en flux de valeur permet d'accélérer l'exécution des travaux (résolution de problème, *lead time*), et de réduire les coûts. Les responsables disposent ainsi de plus de temps et de moyens pour travailler sur des questions stratégiques à long terme. Afin de soutenir la gestion de flux de valeur, Manitowoc a déployé une variété d'outils et de techniques Lean tels que :

- les **I**dées d'**A**mélioration (IA) (la *Figure 20* montre l'historique d'évolution des IA) ;
- le 5S (Gupta et Chandna, 2020) (Voir *Annexe 4*) ;
- l'Obeya room (Canonico et al., 2020) ;
- les Value Stream Mapping (VSM) (Seth et al., 2017) ;
- les Gemba walk (Romero et al., 2020) ;
- les A3 (Pereira et al., 2019) ;
- les indicateurs de performance (KPI) (Kerzner, 2022), afin d'évaluer la performance de l'entreprise et mettre en évidence les domaines qui nécessitent une attention particulière (*Annexe5*).

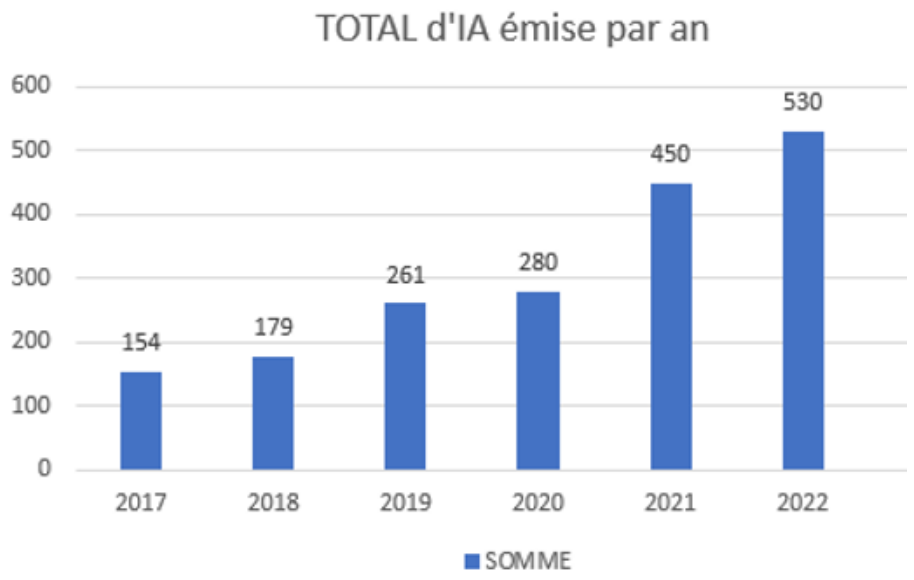


Figure 20 : Historique des idées d'amélioration

II.2.2.2 La transformation des approvisionnements internes par le Lean Kitting

Dans un contexte d'approvisionnement des zones d'assemblage, il existe principalement deux politiques d'alimentation des postes de travail qui peuvent cohabiter (Calzavara et al., 2022) :

- approvisionnement en continu : chaque composant est livré dans un conteneur dédié ;
- approvisionnement en Kit : le kitting est une pratique consistant à fournir dans un même conteneur une nomenclature complète de composants au poste de travail qui va les assembler (Hu et al., 2020).

L'entreprise Manitowoc avait adopté il y a une quinzaine d'années une approche mixte avec :

- approvisionnement en continu pour les petits composants ;
- approvisionnement en kit pour les composants encombrants.

Les petits composants (rondelles, vis, écrous, goupilles, fixations, etc…) étaient livrés dans des caisses dédiées placées dans des racks à chaque poste de travail. Les autres composants étaient livrés en kit dans des caisses en vrac ou sur palette comme le montre la *Figure 21*.



Approvisionnement en continu : Racks de composants à chaque zone de montage

Approvisionnement en kitting dans des caisses en vrac

Figure 21 : Exemple d'approvisionnement mixte: en continu et en kit

Satisfaire les besoins spécifiques et demandes variées des clients est primordial pour Manitowoc, qui veut en faire un atout concurrentiel. Cependant, la diversité des composants utilisés engendrait un nombre élevé de pièces à stocker et manipuler à chaque poste de travail, où un seul poste doit fabriquer plusieurs modèles de produits (Fansuri et al., 2017).

Ainsi, au poste de montage des contre-flèches, il a été constaté que pour un total d'environ 1900 composants nécessaires à l'assemblage d'un colis :

- 73% étaient livrés en approvisionnement en continu ;
- 27% en kitting.

Cette politique d'approvisionnement mixte (en continu et en kitting) posait plusieurs problèmes.

L'approvisionnement en continu suppose un stock permanent de chaque composant à chaque poste de travail, ce qui entraine :

- une immobilisation importante de capital en stock ;
- une occupation excessive de l'espace de l'atelier ;
- des déplacements fréquents des opérateurs pour aller chercher ces composants dans les racks, et les repérer.

De plus, avec l'approvisionnement en continu, les opérateurs ne remontent pas les anomalies telles que :

- les erreurs de nomenclature ;
- les composants défectueux.

car ils ont des composants de remplacement à disposition.

Ceci crée des écarts d'inventaire, mais surtout empêche de mettre en place une dynamique de résolution de problème. C'est peut-être là l'inconvénient majeur de ce mode d'approvisionnement en continu : le stock qu'il engendre cache les problèmes.

Les problématiques liées à l'approvisionnement en continu sont souvent mises en avant dans le cadre du Lean production (Womack et al., 2007). Le temps de déplacement pour aller chercher les composants constitue une part importante du temps sans valeur ajoutée, et doit par conséquent être réduit, dans un souci d'efficacité.
Dans un contexte d'augmentation régulière de la diversité de composants, le stockage permanent en bord de ligne n'est plus possible (Fansuri et al., 2017), et tend même à être remis en cause par ceux qui en sont pourtant à l'origine, les constructeurs automobiles.

Concernant l'approvisionnement en kitting, la livraison des composants en vrac en caisse ou sur palette, pose également de nombreux problèmes :

- le désordre dans les caisses et sur les palettes pénalise la recherche des composants ;
- les composants encombrants et/ou lourds doivent être manipulés pour être positionnés dans le sens de montage, ce qui pose des problèmes d'ergonomie et créé des risques sécurité ;
- il est impossible pour l'opérateur de s'assurer, en débutant son travail, que tous les composants nécessaires sont présents. Si le kit est incomplet, les ruptures sont détectées au moment où le composant doit être utilisé, entrainant l'arrêt du montage, l'allongement du *lead time*, une baisse d'efficience et une hausse du cout de la main d'œuvre.

Les différents problèmes identifiés ont conduit Manitowoc (notamment au sein du site de Moulins) à repenser sa stratégie d'approvisionnement. Pour ces raisons, le site de Moulins a lancé une approche d'approvisionnement 100% en kitting, s'appuyant sur la conception de conteneurs spécifiques à un composé, permettant la livraison des composants et sous-ensembles en juste-à-temps (JAT), dans des emplacements dédiés.

L'objectif du site de Moulins n'est pas uniquement de se focaliser sur les aspects financiers (place occupée, capital immobilisé, non-valeur ajoutée) mais également de prendre en compte certains facteurs organisationnels et humains pour la mise en œuvre du système Lean kitting. Trois facteurs sont mis en avant : l'apprentissage par le management visuel de type « terrain », la protection des sous-ensembles approvisionnées, et la sécurité et l'ergonomie pour la satisfaction des opérateurs assembleurs.

Pour ce qui est de l'apprentissage par le management visuel de type « terrain », le conteneur est conçu de façon à simplifier la visualisation des différents composants et la compréhension de leur assemblage. En regroupant les composants de manière logique et organisée dans le conteneur, les opérateurs peuvent visualiser facilement les différents composants et les différentes étapes d'assemblage. La *Figure 22* représente un conteneur de contre-flèches. Les composants nécessaires à son assemblage sont regroupés par couleur dans le conteneur, chaque couleur correspondant à un sous ensemble. Cela permet aux opérateurs de visualiser :

- qu'il y a quatre sous-ensembles ;
- les composants de chaque sous ensemble ;
- l'ordre d'utilisation de ces composants, qui est l'ordre de leur rangement.

Cette organisation logique et visuelle réduit les risques d'erreur lors de l'assemblage et facilite l'apprentissage des opérateurs.



Figure 22 : Kitting Lean avec des conteneurs spécifiques pour les contre-flèches

Par ailleurs, pour assurer la protection de la qualité des sous-ensembles approvisionnés, les conteneurs sont conçus de manière à protéger les composants contre les chocs pendant le stockage et le transport, via des inserts et des compartiments qui maintiennent les composants (voir *Figure 22*). Attribuer un emplacement spécifique à chaque composant dans le conteneur, par exemple via des orifices ayant l'empreinte des composants, ou des ombres (voir *Figure 22*), permet au préparateur du kit de détecter des manquants, et donc de garantir que les kits sont livrés complets, mais aussi des erreurs de référence, si la pièce ne rentre pas dans l'empreinte ou n'est pas superposée à l'ombre.

En outre, pour garantir la sécurité et l'ergonomie pour la satisfaction des opérateurs d'assemblage, les conteneurs sont conçus pour que les composants soient à portée de main, et orientés pour une installation facile. La forme de ces conteneurs permet d'éviter aux opérateurs de se pencher ou de faire des mouvements inconfortables pour atteindre les composants. Les bords du conteneur sont arrondis pour minimiser les risques de blessures (*voir Figure 22)*. De plus, les conteneurs sont équipés de roulettes pour faciliter les déplacements, et pouvoir être approchés au plus près de la zone de travail, ce qui réduit la fatigue physique.

Il est important de noter que la transition vers le système Lean kitting a été accompagnée de la mise en place de différents outils Lean complémentaires comme le 5S, standard de travail, Kanban, management visuel. En combinant le système Lean Kitting avec ces outils Lean, le site de Moulins a pu générer des gains significatifs, malgré quelques inconvénients. Le *Tableau 2* résume les principaux avantages et inconvénients du lean kitting.

Tableau 2 : Avantages/Inconvénients du système Lean Kitting chez Manitowoc

Avantages/gains du système Lean kitting	Inconvénients du système Lean Kitting
• Réduction des déplacements des opérateurs	• Investissement initial important : acquisition de conteneurs spécifiques, organisation et mise en place de nouveaux flux de travail, formation des employés
• Élimination des gaspillages liés à la recherche d'une référence dans des étagères complètes	• Augmentation de la charge pour les préparateurs de commande
• Réduction du niveau de stock global et des coûts associés de 54%.	
• Amélioration de la gestion des anomalies : remontée des erreurs de nomenclatures et/ou de pièces défectueuses, réduction des écarts d'inventaire de 87%	
• Réduction du temps de cycle d'assemblage (exemple : passage de 30.4h/unité à 18.1h/unité pour le colis d'orientation)	

La mise en place des conteneurs dédiés a été le premier outil Lean déployé sur le site de Moulins et les bénéfices obtenus vont au-delà de ceux cités précédemment. En effet le déploiement du Lean kitting s'est fait en prenant en compte les besoins de tous les interlocuteurs : opérateurs, magasiniers, conducteurs de train…
Ceci a permis à chacun :

- de pouvoir exprimer ses attentes ;
- de prendre conscience de l'efficacité des actions proposées, une fois celles-ci réalisées ;
- de prendre confiance dans ses capacités ;
- d'augmenter son niveau d'implication ;
- de prendre conscience que le Lean ne consistait pas à améliorer les résultats de l'entreprise au détriment de ses employés, mais à mettre en place des pratiques gagnant / gagnant ;
- d'accueillir avec un regard positif la mise en place des outils Lean qui ont suivi le déploiement du kitting (5S, IA, …) et de favoriser leur réussite.

Le travail d'équipe a été favorisé à travers ce projet, le climat entre la production et la logistique. De conflictuel, il a depuis fait place à une relation client/fournisseur apaisée.

La mise en œuvre des pratiques Lean a apporté des avantages significatifs à Manitowoc, en particulier à travers la transition vers une organisation en flux de valeur et la transformation des approvisionnements internes par le Lean Kitting. Toutefois, cette mise en place n'a pas été exempte de difficultés et de défis, qui seront examinés dans la section suivante, mettant en lumière les limites de certaines pratiques.

II.2.3. Les limites de certaines pratiques Lean sur le site de Moulins

La mise en œuvre du Lean chez Manitowoc n'a pas connu que des succès mais également des échecs dans certaines pratiques clé comme notamment :

- le travail standardisé ;
- l'organisation en ligne d'assemblage ;
- le *heijunka* (voir : I.3.2.1.2 Le Séquencement : lissage quotidien).

II.2.3.1 Le travail standardisé

La fabrication et l'assemblage de produits ultra-personnalisés présentent une grande complexité dans la mise en place des opérations. Cette complexité peut être liée à la très grande variété de produits, aux différences de tâches opérationnelles induites par la personnalisation demandée ou encore à la configuration spécifique des produits finis. L'automatisation complète de ces opérations peut ne pas être la solution la plus adaptée en raison de la nature complexe et variée des produits. Les systèmes entièrement automatisés peuvent offrir une productivité accrue pour la production à haut volume, mais ils peuvent manquer de flexibilité et d'adaptabilité nécessaires pour répondre aux variations constantes des produits personnalisés (Miqueo et al., 2020).

Les humains sont des atouts précieux dans de tels environnements, car leur flexibilité leur permet de répondre aux demandes de production changeantes et de s'adapter aux produits complexes. Cependant, il convient de souligner que ces avantages sont accompagnés par des défis, liés à la variabilité significative et asymétrique des performances individuelles de chaque opérateur (Mor et al., 2019).

Dans le cas de Manitowoc, nous prendrons l'exemple du pendage des EMS sur le convoyeur. Des centaines de références peuvent être pendues sur le convoyeur. Les pendeurs effectuaient cette opération sans standard de pendage. L'absence de standard entrainait des variations importantes dans la manière dont les pendeurs opéraient, conduisant parfois à des pièces mal pendues. Un mauvais pendage peut conduire à :

- un risque sécurité accru (en cas de décrochage de pièce) pour les peintres qui doivent parfois travailler au-dessous des pièces pour les peindre ;
- des zones difficilement accessibles pour les peintres, engendrant un risque qualité ;
- des retards dans la production et une perte de capacité. Si les pièces nécessitent un retour au poste de pendage pour réajustement, le lead time est allongé de 13 heures (un tour de convoyeur), la planification est perturbée.

Pour tenter de remédier à ces problèmes, le service méthode de Manitowoc a procédé en collaboration avec les opérateurs à la documentation des standards de pendage. Un standard de travail représente l'ensemble de tâches qu'un opérateur effectue de façon répétée et cohérente au fil du temps, et vise, en établissant la meilleure méthode pour chaque processus et chaque opérateur :

- à améliorer la sécurité (Mor et al., 2019) ;
- à améliorer la qualité (Mor et al., 2019) ;
- à réduire les temps de cycle et leur variation, ce qui facilite la planification ;
- à faciliter la formation des nouveaux opérateurs (Herlambang et Hidayati, 2019) ;
- à fournir une base pour identifier les opportunités d'amélioration.

Cependant, la grande variété de produits finis du site de Moulins a conduit à la création de centaines de standards de travail, communiqués aux opérateurs sous format papier, rangés dans des classeurs. La difficulté à les maintenir à jour, combinée à la nécessité de fouiller dans de nombreux documents pour trouver le bon standard a rendu la standardisation inefficace et frustrante pour les opérateurs. En conséquence, les standards ne sont souvent pas suivis par les opérateurs, conduisant l'entreprise à compenser ce manque de fiabilité en multipliant le nombre d'opérations de contrôle.

II.2.3.2 La conversion des cellules d'assemblage en ligne d'assemblage

Un système d'assemblage est composé d'opérateurs, ainsi que d'un ensemble de composants et d'équipements utilisés pour monter des produits finis (Bukchin et al., 1997). La performance des systèmes d'assemblage a un impact majeur sur la compétitivité. C'est pourquoi, la conception des

systèmes d'assemblage est une décision stratégique cruciale pour les entreprises (Vallandingham et al., 2018). Généralement, deux modes de conception de systèmes d'assemblage se dégagent dans les entreprises manufacturières (Liu et al., 2021) :

- les lignes d'assemblage ;
- les cellules d'assemblage.

Dans les lignes d'assemblage, les produits se déplacent le long d'une chaîne de montage linéaire. Les opérations d'assemblage sont effectuées à chaque station de travail le long de cette ligne. Les opérateurs sont affectés à des tâches spécifiques sur la chaîne. Les produits suivent une séquence prédéfinie à travers les postes de travail (voir *Figure 23*). Bien que ce modèle soit couramment associé à la production de masse de produits standardisés, il est également utilisé dans des industries telles que l'automobile, où une grande variété de produits est produite en ligne d'assemblage. Les constructeurs automobiles investissent massivement dans des systèmes d'assemblage flexibles pour gérer cette diversité tout en maintenant une haute efficacité et productivité (Vallandingham et al., 2018). Ces investissements sont justifiés par les volumes de production élevés, permettant le développement de lignes d'assemblage sophistiquées. Toutefois, l'entreprise Manitowoc n'atteint pas ces volumes de production, ce qui rend difficile l'implémentation de ligne d'assemblage aussi flexibles et coûteuses.

Concernant les cellules d'assemblage, elles sont responsables de l'assemblage complet d'un sous-ensemble ou d'un produit fini spécifique. Les opérateurs dans ces cellules sont généralement polyvalents et peuvent effectuer différentes tâches (voir *Figure 23*). Les cellules d'assemblage sont conçues pour plus de flexibilité (Yin et al., 2017). Dans ce modèle, la flexibilité de l'assemblage représente l'agilité organisationnelle des usines à réagir rapidement aux changements des demandes des clients avec relativement peu de temps ou de coûts (Upton, 1994).

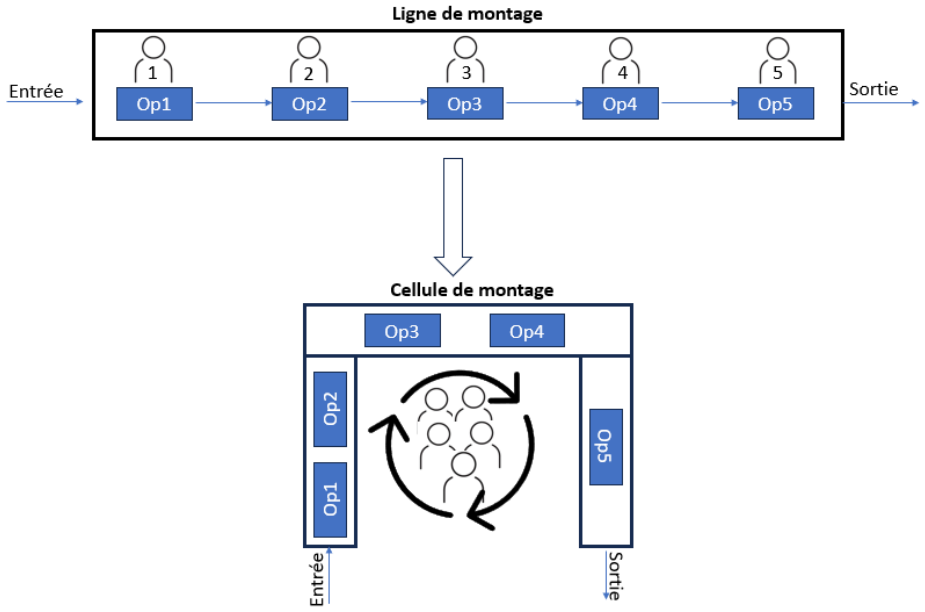


Figure 23 : Conversion d'une ligne de montage en cellule de montage

Compte tenu de la variété des produits et du faible volume de production, Manitowoc opte pour des cellules d'assemblage. Chaque cellule est composée d'une équipe responsable du processus d'assemblage du début à la fin.

Afin d'optimiser le flux de production, Manitowoc a expérimenté la transformation d'une cellule d'assemblage en ligne d'assemblage courte. Dans cette ligne, les opérateurs se voyaient attribuer des opérations spécifiques et répétitives, avant que le produit ne passe à la station suivante de la chaîne, suivant un rythme de production prédéterminé, basé sur la demande client (*takt time)*.

Le site de Moulins a rencontré des difficultés multiples en passant d'une organisation en cellules d'assemblage à une ligne d'assemblage :

- La grande variété des produits se succédant sur la ligne, avec une forte étendue des temps de cycle (de 20 heures à 50 heures), rendait presque impossible l'équilibrage des postes de travail, provoquant quotidiennement des blocages (les pièces attendent avant le poste de travail) et des famines (les opérateurs attendent les pièces).
- Compte tenu de la faible demande client (1 à 1,5 grue/jour) :
    - Le fait de découper le processus en plusieurs postes engendrait :
        - une sous-utilisation des postes de travail;
        - un besoin en m² supérieur à ce qui était disponible.
    - Manitowoc dispose de peu de poids auprès des fournisseurs, et maitrise insuffisamment les délais de livraison. L'indisponibilité de certains composants essentiels entraînait des interruptions importantes de la production.

La dépendance vis-à-vis d'une seule chaîne de montage augmente la vulnérabilité aux aléas de production et entraîne des perturbations coûteuses. Cette organisation en ligne équilibrée est possible dans un environnement de grand volume.

Dans le cas de Manitowoc à Moulins, nous sommes dans un environnement « faible volume grande variété ». L'organisation en ligne d'assemblage n'est pas adaptée, et Manitowoc est retourné vers son organisation initiale, c'est à dire organisation en cellules d'assemblage. Ces cellules représentent de nombreux avantages par rapport au lignes traditionnelle en termes de l'utilisation de l'espace et du lead time (Bukchin et al., 1997), de réactivité et de flexibilité (Yin et al., 2017), d'implication des opérateurs qui facilite la résolution de problème (Zhang et al., 2017). En outre, les opérateurs sont également encouragés à être très autonomes dans le prise de décision face aux aléas (Liu et al., 2021).

II.2.4 Conclusion

L'évolution des systèmes de production adoptés par l'entreprise Manitowoc a été présentée. Ce parcours a traversé différentes phases, débutant par le Fordisme, puis intégrant le Manitowoc Operating System (MOS) qui limitait le Lean à une simple boîte à outils. Finalement l'entreprise a évolué vers un nouveau système « the Manitowoc Way », où le Lean est considéré comme une approche stratégique. Ce changement marque une transition significative, mettant l'accent sur la transformation culturelle et organisationnelle, impliquant tous les niveaux de l'entreprise.

Cette évolution a été suivie par une analyse approfondie des succès et échecs de certaines pratiques Lean dans l'environnement spécifique de l'usine Manitowoc (site de Moulins) :

- grande variété des produits ;
- personnalisation des produits ;
- faible volume de production ;
- saisonnalité de la demande ;
- variabilité des temps de cycle ;
- dépendance vis-à-vis des fournisseurs.

Les échecs rencontrés lors de la mise en œuvre de certaines pratiques Lean suscitent des interrogations sur sa compatibilité avec les environnements HMLV. Par conséquent, une analyse approfondie de la littérature sur la mise en œuvre du Lean dans ces contextes spécifiques est essentielle pour éclairer les décisions des entreprises souhaitant adopter cette approche.

II.3. Analyse du Lean dans le contexte HMLV

Depuis plusieurs années, le Lean Manufacturing est largement reconnu et diffusé comme l'un des modèles modernes les plus efficaces et les plus aboutis dans le secteur manufacturier (Saurin et al., 2021). Il se concentre sur l'élimination des gaspillages et des activités sans valeur ajoutée. Le but est d'améliorer la productivité et l'efficacité des opérations, en impliquant pleinement les salariés, afin de développer un avantage concurrentiel (Tortorella et al., 2018 ; Danese et al., 2018 ; Sartal et al., 2022).

Le Lean Manufacturing a d'abord été diffusé et adopté par de nombreuses industries du secteur de l'automobile (Toyota avec son cadre de production très répétitif en est le précurseur majeur). Il s'est progressivement répandu dans d'autres environnements et secteurs de fabrication (Jünge et al., 2023 ; Schulze et Dallasega, 2023). Initialement, le Lean Manufacturing était étroitement associé à des environnements de production répétitifs et à haut volume (grande série), où les processus sont standardisés et les produits fabriqués en grande quantité avec peu de variabilités. Cependant, au fil du temps, son succès dans ces environnements a encouragé son adoption dans des contextes de production plus diversifiés et de manière universelle (Antony et al., 2021). Le Lean Manufacturing devient de plus en plus utilisé au sein d'environnements de fabrication spécifiques où les clients commandent des produits très variés, personnalisés et en faible volumes (Schulze et Dallasega, 2023).

Malgré les possibilités d'application du Lean Manufacturing dans les environnements HMLV, il est important de reconnaître que ces environnements diffèrent considérablement du secteur automobile et des environnements de production répétitifs à fort volume. Le *Tableau 3* résume les principales différences en termes de caractéristiques de productions de type TPS et de type HMLV.

Tableau 3 : Différentes caractéristiques entre la production Toyota et la production HMLV (Adapté de Tomašević et al., 2021 ; Adlin et al., 2020 ; Hussain et al., 2020, Irani,2020)

Caractéristique	**Production de type TPS**	**Production de type HMLV**
Volume	• Volume élevé	• Très Faible à unique
Variété	• Faible variété de produits	• Grande variété de produits
Processus	• Unique	• Très variable
Complexité	• Très faible à faible	• Modérée – Extrêmement élevé
Demande	• Stable	• Très variable et imprévisible
Type de fabrication	• Production pour stock	• Production à la demande
Temps de cycle	• Fixe	• Variable
Changement de produits	• Simple, perte de temps	• Complexe, perte de temps et de matière (changement de couleur par exemple)
Polyvalence des employés	• Hautement spécialisés pour des tâches spécifiques.	• Polyvalents pour s'adapter aux différentes tâches et produits
Fondements	• Standardisation et stabilité	• Flexibilité et dynamise

La complexité et la variabilité de l'environnement peuvent considérablement influer sur la performance de la mise en œuvre du Lean Manufacturing dans une industrie HMLV. La plupart de la littérature sur la mise en œuvre du Lean Manufacturing est axée sur la production répétitive et MTS, caractérisée par une demande généralement stable de volumes élevés de produits similaires (Chaple

et Narkhede, 2017 ; Braglia et al., 2019 ; Tomašević et al., 2021). Cependant, il existe un manque d'études empiriques concernant la mise en œuvre du Lean Manufacturing dans l'industrie non répétitive qui peut être caractérisée par de faibles volumes et des produits personnalisés (Birkie et Trucco, 2016 ; Rossini et al., 2019). Ces lacunes dans la littérature peuvent pénaliser les entreprises qui cherchent à appliquer le Lean Manufacturing dans ces environnements spécifiques.

En outre, La littérature fournit des points de vue variés et parfois contradictoires sur la compatibilité du Lean Manufacturing avec les environnements HMLV. Alors que de nombreux chercheurs affirment que ce modèle est applicable à tout type d'industrie (Womack et Jones, 1997), y compris au sein des environnements de type HMLV, d'autres réfutent cette vision, et sont plus sceptiques quant à la possibilité d'appliquer le Lean Manufacturing en dehors des contextes à haut volume de fabrication ou stables (Bevilacqua et al., 2017 ; Anthony et al., 2021). Enfin, certains chercheurs considèrent que le Lean Manufacturing a le potentiel d'être appliqué dans des environnements de type HMLV, mais cela nécessite des ajustements et des adaptations spécifiques (Sartal et al., 2022).

L'objectif de cette deuxième partie est de passer en revue les différentes études empiriques disponibles dans la littérature scientifique concernant l'application du Lean Manufacturing dans les environnements de type HMLV. Cette revue permettra de répondre à deux questions de recherche :

- Question n°1 : ***Que dit la littérature sur la compatibilité du Lean Manufacturing avec la typologie HMLV ?***
- Question n°2 : ***Comment les différentes définitions et interprétations du Lean Manufacturing peuvent-elles influer sur sa compatibilité avec les environnements de type HMLV*** ?

La réponse à ces questions permettra de fournir un aperçu complet et nuancé de la compatibilité du Lean Manufacturing avec les environnements de type HMLV, en se basant sur des preuves empiriques plus solides.

Les sections suivantes seront dédiées à cette analyse de la littérature, suivant le plan ci-dessous (voir *Figure 24*).

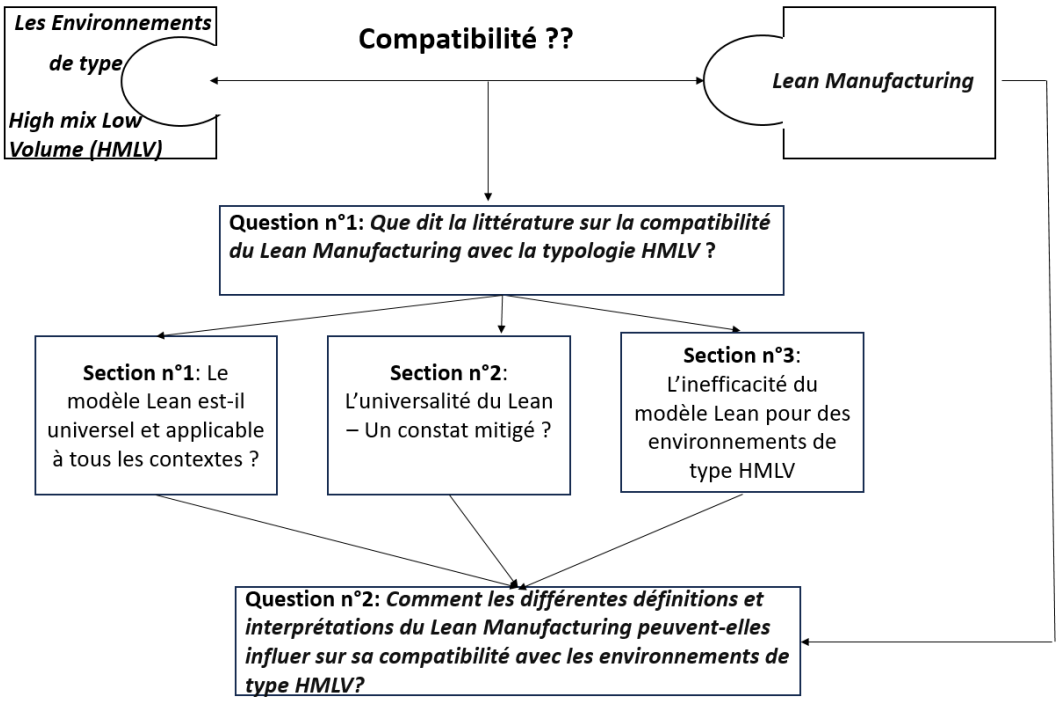


Figure 24 : Le plan de la partie état de l'art

II.3.1 Le modèle Lean est-il universel et applicable à tous les contextes ?

Inspiré par le succès du Lean au sein de l'entreprise Toyota, ce modèle productif a été adopté dans un large panel de secteurs et de contextes différents comme par exemple : l'aérospatiale (Amrani et Ducq, 2020 ; Benkarim et Imbeau, 2022), la construction (Powell et al., 2021), les industries de transformation alimentaire (Maalouf et Zaduminska, 2019), les soins de santé (Antony et al., 2019), l'éducation (Alves et al., 2021), les services (Perdomo-Verdecia et al., 2022) et le textile (Prasad et al., 2020).

La réussite du Lean dans ces industries aux particularités diverses a renforcé l'affirmation que le Lean est un système de production universel (Pearce et al., 2018 ; Antony et al., 2021). En effet, de nombreux chercheurs suggèrent que le Lean peut être appliqué avec succès dans toutes les industries (Womack et Jones, 1997 ; Birkie et al., 2017 ; Yadav et al., 2019 ; Belvedere et al., 2019). Cette proclamation s'étend même aux industries de type HMLV, ainsi qu'à toutes les fonctions et services d'une organisation (Magnani et al., 2019). Ce constat est soutenu par diverses implémentations réussies des outils et pratiques Lean dans le contexte HMLV (Hussain et al., 2020 ; Powell, 2018).

Plusieurs applications opérationnelles ont prouvé que le Lean conviendrait aux environnements de fabrication de type HMLV. Par exemple, l'étude menée par (Kjersem et al., 2015) illustre le cas d'un constructeur naval qui a adopté et mis en œuvre des principes et des outils Lean dans le processus de la construction de navires hautement personnalisés. Cette initiative a impliqué la réalisation de plusieurs projets d'amélioration dans divers départements de l'entreprise, en utilisant des outils Lean tels que le *PLAN-DO-CHECK-ACT* (PDCA), le *Kanban*, le *Takt time*, et l'*encours standard* (ConWIP). Les résultats de l'étude ont montré une meilleure circulation des composants et sous-ensembles des navires et une amélioration de la planification du processus d'assemblage. En conséquence, le *Lead time* des unités de production a été réduit de 74%. Des avantages similaires ont été constatés par la mise en œuvre du *Takt time* planning (amélioration du rythme de séquencement) dans une entreprise de construction de bâtiments, avec une réduction d'environ 50% du *Lead time*, comme l'ont indiqué (Yassine et al., 2014).

Une autre étude menée par (Slomp et al., 2009) a également illustré une mise en œuvre réussie du Lean dans une entreprise de fabrication de produits électriques dans un contexte de type HMLV. Dans ce cas, le modèle Lean a également conduit à une réduction du *lead time*, une nette amélioration du niveau de service, et des meilleures livraisons dans les temps en utilisant par exemple des pratiques comme le Kanban et le flux tiré.

De plus, le Lean a montré son efficacité dans une entreprise de fabrication de machines-outils, caractérisée par un environnement HMLV, et un système de production mixte Engineer-To-Order (ETO)/Make-To-Order (MTO) (Ricondo Iriondo et al., 2016). Les chercheurs ont confirmé que la mise en œuvre du Lean se traduit par une augmentation de l'efficacité de la production, une amélioration de la fiabilité des délais de livraison et une augmentation de la productivité. L'analyse a présenté un autre avantage notable concernant les opérateurs qui est passée d'une orientation vers les tâches à une autre orientation vers les objectifs, grâce à la mise en place des indicateurs de performance (KPI). La conséquence est l'introduction d'une culture d'amélioration continue au sein de l'entreprise.

Une autre recherche s'est penchée sur l'implémentation du Lean dans un environnement d'assemblage de cartes de circuits imprimés (Arasanipalai Raghavan et al., 2014). L'objectif de cette recherche était d'améliorer les processus d'assemblage existants et l'aménagement des installations. Pour ce faire, les chercheurs ont mis en œuvre un système de flux tiré, conformément aux principes Lean, tout en examinant la gestion des composants et la disposition des installations. Il a été démontré

que les temps de cycle des produits ont été réduits de 40% et que les défauts ont été réduits de 10 à 30% (en fonction des différents processus d'assemblage).

D'autres chercheurs ont étudié l'applicabilité du Lean dans un environnement HMLV complexe (Seth et al., 2017). Ils ont utilisé diverses méthodes Lean, dont le *Gemba walk* et la *cartographie des flux de valeur* (VSM) pour améliorer les performances opérationnelles dans un atelier de fabrication de transformateurs de puissance industriels. Les résultats de l'étude ont montré une réduction d'environ 30 % des activités sans valeur ajoutée et une baisse d'environ 17 % du temps de cycle. Les chercheurs ont conclu que le Lean peut être appliqué avec succès non seulement dans des environnements de fabrication simples, mais aussi dans des environnements plus complexes tels que les environnements HMLV. De même, (Chaple et Narkhede, 2017) ont utilisé l'outil *VSM* dans une organisation de fabrication des produits électriques HMLV pour élaborer une feuille de route pour un ensemble de projets d'amélioration continue. Les résultats de l'étude ont permis d'observer une réduction de 61 % des en-cours, une réduction de 59 % des délais de livraison et une amélioration de 138 % du ratio VA/NVA (valeur ajoutée/non-valeur ajoutée).

Les travaux de recherche exposés ci-dessus sur le caractéristique universel du modèle Lean concordent avec ceux de (Hussain et al., 2020) et de (Birkie et al., 2017). En effet, (Birkie et al., 2017) ont étudié deux entreprises de fabrication de biens d'équipement caractérisées par un environnement HMLV. Ces entreprises avaient une forte implémentation Lean dans leurs ateliers de production depuis plus de 10 ans. Les résultats de cette étude ont illustré des améliorations significatives de la performance opérationnelle. Par exemple, la première entreprise a pu augmenter le respect des délais de livraison de 57 % à 80 % au cours de la période étudiée, tandis que la seconde a amélioré ses délais de livraison de fabrication de 75 % à 93 % et un taux de satisfaction client qui est passé à 98,5 %.

Malgré plusieurs travaux et études scientifiques qui pourraient laisser croire que le modèle Lean peut être universel et applicable dans un large éventail de contextes différents et spécifiques, (Pearce et al., 2018) ont conclu qu'il existe un taux d'échec de déploiement du Lean de 60 à 90 % qu'ils ont observé au fil des années. Pour de nombreux chercheurs qui considèrent que le Lean est un système universel, l'insatisfaction ou l'échec du déploiement du Lean est généralement attribué au contexte dans lequel il est mis en œuvre, plutôt qu'à la méthodologie et les outils associés au Lean. Les facteurs d'échec et les freins, en particulier dans les entreprises caractérisées par un environnement HMLV, sont souvent attribués à de multiples raisons. Le *Tableau 4* résume les exemples de freins à l'implémentation du Lean, et qui sont sources d'échec.

Tableau 4 (partie 1) : Freins à la réussite du Lean

Freins à la réussite du Lean	Auteurs
• Le manque de confiance et la conviction que le Lean est réservé à l'industrie automobile.	• (Pearce et al.,2018).
• Le manque d'engagement des salariés et la résistance au changement.	• (Abu et al., 2019; Bayhan et al., 2019; Pearce et al., 2018; Cherrafi et al., 2017).
• Le manque d'engagement et de soutien de la direction.	• (Bayhan et al., 2019; Pearce et al., 2018; Cherrafi et al.,2017; Zhang et al., 2017b).
• Le manque du management.	• (Pearce et al., 2018 ; Zhang et al., 2017b).
• La communication inefficace au sein de l'entreprise, notamment le non-partage des résultats d'amélioration et les objectifs de l'entreprise avec les salariés.	• (Bayhan et al., 2019).

Tableau 4 (partie 2) : Freins à la réussite du Lean

• Le manque de planification ou de vision à long terme.	• (Dora et al., 2016).
• Le manque de main d'œuvre qualifiée et d'un savoir-faire interne.	• (Abu et al., 2019; Dora et al., 2016)
• Le manque de formation des salariés.	• (Abu et al., 2019; Cherrafi et al., 2017; Zhang et al., 2017b; Dora et al., 2016).
• La réduction du projet Lean à une simple application d'outils sans prise en compte de la culture.	• (Abu et al.,2019 ; Pearce et al., 2018 ; Cherrafi et al.,2017).
• Le manque de ressources financières allouées à la mise en place du Lean.	• (Tezel et al., 2020 ; Bayhan et al., 2019 ; Pearce et al.,2018 ; Cherrafi et al.,2017 ; Dora et al., 2016).

Afin de minimiser les sources d'échecs, il est essentiel que les organisations évaluent leur capacité à adopter le Lean avant de l'appliquer (prise en compte des freins potentiels), afin de garantir leur réussite à long terme (Jamil et al., 2020).

Un autre courant trouvé dans la littérature adopte une position mitigée en reconnaissant à la fois l'universalité du Lean et ses limitations dans les environnements HMLV. Selon cette perspective, certaines pratiques Lean peuvent être appliquées avec succès, tandis que d'autres peuvent nécessiter une adaptation. Ce courant sera exploré dans la section suivante.

II.3.2 L'universalité du Lean – Un constat mitigé ?

Il existe une diversité d'opinions parmi les chercheurs et les praticiens concernant l'applicabilité des pratiques Lean, notamment dans des environnements HMLV. Certains auteurs scientifiques estiment qu'il existe des pratiques Lean qui sont universellement applicables à toutes les industries. D'autres chercheurs pensent que certaines pratiques peuvent nécessiter des adaptations ou ne pas être appropriées dans ces environnements spécifiques.

Les entreprises qui cherchent à mettre en œuvre le Lean s'efforcent souvent d'adopter les mêmes méthodes et pratiques qui ont contribué au succès de Toyota. Toutefois, il est crucial de reconnaître que les entreprises évoluant dans un environnement HMLV sont confrontées à des défis spécifiques. La nature de leur production rend l'application du Lean plus complexe (Buer et al., 2018 ; Schulze et Dallasega, 2020).

L'un des défis majeurs auquel sont confrontés les managers est la difficulté de choisir les outils et pratiques Lean qui correspondent le mieux à leur environnement, tout en prenant en considération les besoins et les compétences de leur équipe, dans le but d'améliorer la productivité et la qualité (Rossini et al., 2021 ; Possik et al., 2022). Le choix inapproprié d'un ensemble d'outils peut contribuer à l'apparition de nombreux problèmes dans un environnement de travail donné, même si ces mêmes outils ont donné de bons résultats dans d'autres contextes (Leksic et al., 2020 ; Zhang et al., 2020). Par conséquent, les managers ne doivent pas se baser uniquement sur leur propre expérience ou leur jugement subjectif, ni se contenter de copier les outils et méthodes mis en œuvre chez Toyota ou dans d'autres contextes.

Les outils et pratiques Lean offrent des avantages significatifs pour améliorer l'efficacité opérationnelle, réduire les coûts et optimiser les processus. La réussite de La mise en œuvre du Lean dans des environnements HMLV exige une compréhension approfondie des spécificités de la production, une évaluation minutieuse des bénéfices et des limites de chaque outils/pratique Lean. Les gestionnaires et praticiens doivent donc être conscients de la nécessité de personnaliser l'approche Lean en fonction des caractéristiques particulières de leur environnement de production. Adopter

aveuglément des outils/pratiques qui ont fonctionné dans d'autres contextes peut entraîner des problèmes opérationnels plutôt que des améliorations.

Le expose de manière non exhaustive un ensemble d'outils et de pratiques Lean, présentant à la fois leurs avantages et leurs limites à l'universalité, avec les références bibliographiques associées. Bien que cette liste ne soit pas exhaustive, les outils mentionnés ont été choisis en raison de leur pertinence pour l'étude, notamment en ce qui concerne l'environnement HMLV étudié chez l'entreprise Manitowoc. La colonne "Bénéfices" détaille les avantages spécifiques de chaque outil ou pratique Lean, tandis que la colonne "Limites à l'universalité" souligne les défis lors de leur application dans les environnements HMLV. Les références bibliographiques associées sont répertoriées dans la colonne "Auteurs", permettant aux lecteurs de consulter les sources pour des informations plus approfondies sur chaque outil ou pratique Lean.

Un autre courant trouvé dans la littérature, nie totalement l'universalité et l'adaptabilité du Lean et attribue l'échec de la majorité des entreprises à l'incompatibilité intrinsèque de la méthodologie avec l'environnement HMLV. Ce courant sera exploré dans la section suivante.

Tableau 5 (partie 1) : Bénéfices et limites à l'universalité de certains outils/pratiques

Outils et pratiques Lean	Bénéfices	Limites à l'universalité	Auteurs
5S	• Amélioration de l'efficacité ; • Réduction des coûts liés aux gaspillages ; • Sécurité améliorée ; • Motivation des employés.	• Aucune limite citée.	• (Cannas et al., 2018 ; Braglia et al., 2019 ; Amrani et Ducq, 2020 ; Irani, 2020 ; Lane, 2020 ; Possik et al., 2022).
Poka-Yoké	• Réduction des taux de défaut ; • Simplification des processus ; • Prévention des erreurs humaines.	• Aucune limite citée.	• (Cannas et al., 2018 ; Irani, 2020 ; Amrani et Ducq, 2020 ; Possik et al., 2022).
Kaizen	• Favorisation de l'amélioration continue; • Implication des employés ; • Amélioration de la qualité et de la productivité ; • Réduction du gaspillage, du temps de cycle, et du lead time.	• Manque de standardisation du processus de mise en œuvre ; • Besoin d'une vision globale, difficile à atteindre dans les environnements caractérisés par une complexité élevée ; • Inadaptation à des environnements spécifiques.	• (Liker, 2004 ; Cannas et al., 2018 ; Babalola et al.,2019 ; Villar-Fidalgo et al., 2019 ; Cherrafi et al., 2019 ; Rossini et al., 2021 ; Schulze et Dallasega, 2020).
JIT (Juste-à-Temps)	• Amélioration de l'efficacité opérationnelle ; • Réduction des coûts de stockage ; • Meilleure gestion des ressources.	• Difficultés de synchronisation entre la production et la demande réelle en cas d'une variabilité importante ; • Instabilité des processus ; • Prévisions de demande extrêmement précises requises ; • Nécessite une collaboration étroite avec les fournisseurs ; • Gestion des flux de production complexe en cas de grande variété de produits.	• (Bortolotti et al., 2013 ; Birkie et Trucco, 2016 ; King, 2019 ; Braglia et al., 2020).
Kanban	• Visualisation du travail en cours ; • Optimisation des processus. • Réduction des stocks ;	• Sensibilité à la variabilité de la demande ; • Sensibilité à l'instabilité des processus ;	• (Ohno, 1988 ; Crute et al., 2003 ; Matt et Rauch, 2014 ; Leonardo

Tableau 5 (partie 2) : Bénéfices et limites à l'universalité de certains outils/pratiques

	• Amélioration de la synchronisation entre la production et la demande réelle.	• Inefficacité en présence d'une grande variété de produits.	et al., 2017 ; Dallasega et al., 2019 ; Irani, 2020).
VSM	• Visualisation du flux de valeur; • Identification des goulets d'étranglement ; • Encouragement d'une culture d'amélioration continue.	• Processus Manuel « Stylo et Papier » et fastidieux ; • Représentation statique dans un environnement dynamique ; • Non-prise en compte de la variabilité ; • Difficulté d'application dans des environnements non répétitifs.	• (Matt et Rauch, 2014 ; Bertolini et al., 2017 ; Romero et al., 2017 ; Chouiraf et Chafi, 2018 ; Buer et al., 2018 ; Lugert et al., 2018 ; Duggan et al., 2018 ; Tortorella et al., 2020 ; Miqueo et al., 2020 ; Tomašević et al., 2021).
SMED	• Réduction du temps de changement de série ; • Réduction des stocks inter-opératoires ; • Réduction des coûts et augmentation de la productivité.	• Impact négatif sur le *Lead Time* en cas de variabilité de la demande ; • Inefficacité en présence d'une grande variété de produits ; • Nécessité d'une stabilité des processus pour fonctionner efficacement.	• (Bortolotti et al., 2013 ; Wang et al., 2019 ; Amrani et Ducq, 2020 ; Irani,2020 ; Possik et al., 2022).

II.3.3 L'inefficacité du modèle Lean pour des environnements de type HMLV

De nombreuses études, publiées dans la littérature scientifique, indiquent que la réussite du modèle Lean présente, dans les contextes particuliers de type HMLV, des taux d'échec allant de 60 à 90 % (Pearce et al., 2018). Une étude récente de (Lopes et al., 2023) démontre que moins de 10 % des organisations HMLV parviennent à maintenir les initiatives Lean de manière pérenne et performante. Ces chiffres reflètent que la mise en œuvre du modèle Lean présente encore des problèmes qui génèrent un taux d'échec très élevé dans les environnements HMLV (Schulze et Dallasega, 2023).

Certains chercheurs annoncent que le modèle Lean rencontre des difficultés à s'adapter à l'évolution actuelle de la demande du marché (Hong et al.,2019 ; Groten et Gallego-García, 2021). En effet les clients ne se contentent plus de rechercher des produits de qualité supérieure avec des prix de plus en plus bas, mais ils souhaitent désormais une personnalisation importante des produits et la volonté d'une livraison encore plus rapide et agile (Yusoof et al., 2022). La gestion de la demande dans ce type de contexte est complexe. Les organisations industrielles qui évoluent dans cet environnement (marché ainsi que les activités de production) doivent développer des processus dynamiques dans un milieu incertain et complexe (Siong et al. ,2018). La *Figure 25* résume ce contexte et milieu.

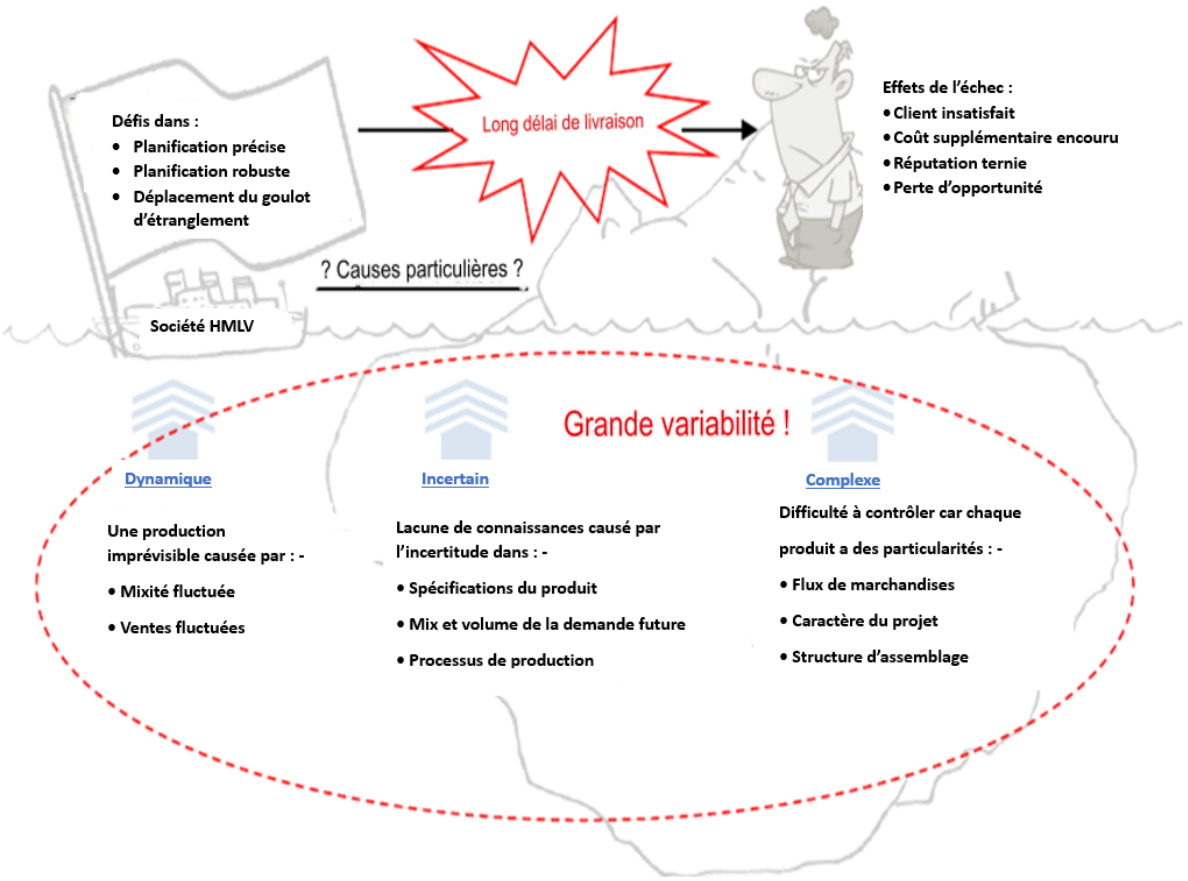


Figure 25 : Défis des environnements HMLV, tiré de (Siong et al., 2018)

Ces éléments multidimensionnels et contextuels peuvent créer des difficultés (notamment au niveau de la maîtrise de certaines variabilités) pour les organisations industrielles œuvrant dans un environnement de type HMLV comme par exemples :

- Des goulets d'étranglement changeants (Tomasevic et al., 2021) ;
- Des difficultés de planification et d'ordonnancement (Gan et al., 2023) ;

- Des problèmes de séquencement, des retards de production et une surcharge des ateliers qui entraînent le non-respect des dates d'échéance promises (Siong et al., 2018).

Dans le cadre de ses difficultés, certaines pratiques Lean, comme le *Takt Time* ou *Heijunka*, ont été conçues et avaient comme promesse d'éliminer la variabilité des opérations et des processus industriels, et ainsi d'améliorer les flux dans les processus de production (Suri et al., 2010).

Cependant, dans les environnements de type HMLV, la variabilité prend deux formes distinctes :

- La variabilité dysfonctionnelle : Il s'agit de la variabilité non souhaitée ou perturbatrice qui peut résulter d'erreurs, de systèmes inefficaces, de machines défectueuses, etc. ;
- La variabilité stratégique : Contrairement à la variabilité dysfonctionnelle, la variabilité stratégique est intentionnelle et planifiée. Elle est introduite de manière délibérée pour répondre aux besoins imprévisibles et aux préférences spécifiques des clients.

Le modèle Lean a comme but de réduire la variabilité dysfonctionnelle. Cependant, il ne convient pas aux environnements de type HMLV, car la variabilité stratégique est une caractéristique clé de ces environnements et est valorisée par les clients (Tomasevic et al., 2021). Par conséquent, les entreprises opérant dans ce type d'environnements doivent adopter une stratégie pour gérer efficacement cette variabilité stratégique pour répondre aux besoins uniques de leurs clients (Suri et al., 2010 ; Siong et al., 2018).

L'étude menée par (Nambiar, 2010) a souligné que, bien que les pratiques Lean présentent des avantages indéniables dans des environnements de marché stables, elles se portent essentiellement sur l'élimination des gaspillages et l'amélioration de la qualité. Cependant, selon cet auteur, ces avantages montrent des limites en termes de flexibilité et de réactivité lorsqu'ils sont confrontés à des imprévus et à la variabilité qui caractérisent le marché actuel. (Filho et al., 2016) ont également constaté que le modèle Lean rencontre des lacunes importantes lorsqu'il s'agit de gérer une grande diversité de produits, en particulier dans les environnements de type HMLV. Dans ces conditions, il peut être difficile pour le modèle Lean de s'adapter rapidement aux évolutions du marché (Yusoof et al., 2022).

De nombreux chercheurs soulignent que les outils et méthodes Lean traditionnels ont été conçus pour trouver une solution applicative dans des environnements de production répétitifs principalement centrés sur le produit, caractérisés par une demande stable pour de grands volumes de produits (Hussain et al., 2020 ; Braglia et al., 2020 ; Jünge et al., 2023 ; Schulze et Dallasega, 2023). Bien que le modèle Lean ait connu des succès notables dans quelques environnements de type HMLV, certaines preuves de son efficacité sont souvent basées sur des études de cas individuelles et sont relativement faibles (Schulze et Dallasega, 2023). Une analyse systématique de la littérature menée par (Adlin et al., 2020) sur l'adoption du modèle Lean chez des fabricants de petits lots dans des pays à coûts élevés a révélé qu'il existe peu d'études empiriquement validées sur la manière de mettre en œuvre le modèle Lean dans la fabrication de type HMLV. De plus, il manque encore des descriptions théoriques, des mesures et des pratiques Lean vérifiées empiriquement pour être généralisables dans différents contextes en dehors de la production de masse (Rossini et al., 2019). De ce fait, il n'est pas surprenant que l'adoption du modèle Lean soit complexe et incertaine à maintenir à long terme (Amrani et Ducq, 2020). Dans le même sens (Aljubiri, 2019) et (Psarommatis et al., 2020) soulignent que les méthodes utilisées par Toyota se sont avérées inapplicables ou moins efficaces pour de nombreuses organisations industrielles travaillant dans un environnement de type HMLV.

Le modèle Lean est réputé pour ses pratiques organisationnelles, en plus de ses pratiques techniques, telle que la standardisation du travail, la formation des employés et la coopération entre la direction et les employés. Ces pratiques sont souvent considérées comme cruciales pour le succès de ce modèle, car elles contribuent à instaurer une culture d'amélioration continue et à mobiliser les employés dans la quête de l'excellence opérationnelle (Rossini et al., 2019). Une revue systématique de la littérature effectuée par (Selimović, 2022) a révélé que même ces pratiques n'ont pas échappé à la critique. Cette étude a révélé que certaines critiques ont porté sur la standardisation du travail, pour son potentiel de réduire l'autonomie des employés et centraliser la prise de décision au sommet de l'organisation. De plus, bien que la formation soit un élément clé de ce modèle pour améliorer les compétences des salariés, elle est également perçue comme une pression supplémentaire. L'augmentation des responsabilités et des attentes peut créer des situations stressantes pour les salariés, ce qui peut nuire à leur satisfaction au travail et à leur développement. Enfin, certaines critiques considèrent que la coopération entre la direction et les employés est superficielle, et que les entreprises Lean ne permettent pas aux salariés de participer correctement à la prise de décision. Par conséquent, (Selimović, 2022) suggère que les temps modernes exigent une nouvelle approche de la pensée, en remettant en question l'approche Lean dite « traditionnelle ».

Par conséquent, il est devenu impératif d'explorer et d'adopter des stratégies et des outils plus récents et plus sophistiqués pour relever les défis posés par les environnements de fabrication à forte variabilités (Psarommatis et al., 2020). Une autre étude récente menée par (Groten et Gallego-García, 2021), a comparé différentes méthodologies, notamment le Lean, le 6 Sigma, la Théorie des Contraintes (TOC), la Fabrication à Réponse Rapide (QRM) et la Fabrication Agile (FA), qui sont parmi les méthodes les plus populaires dans la littérature universitaire (Gómez et Filho, 2017 ; Gallego-Garcia et al., 2022). Ils ont conclu que le modèle Lean n’est pas la méthodologie la plus prometteuse dans le cadre d’une forte variabilité de la demande du marché. (Gromova et al., 2020) confirment que dans les environnements de type HMLV, le modèle Lean devient moins pertinent et cède la place à des paradigmes plus compétitifs comme par exemple la fabrication à réponse rapide (QRM : Quick Response Management) et la fabrication agile (FA) (Gromova et al.,2020).

II.3.4 Conclusion sur la compatibilité du Lean avec les environnements HMLV : impact des différentes définitions

L'analyse des différentes définitions et interprétations du Lean Manufacturing met en lumière une divergence significative quant à la perception de sa compatibilité avec les environnements de type HMLV. Les diverses perspectives varient du Lean en tant qu'approche stratégique, système de management, système socio-technique, ou philosophie, à sa vision en tant que boîte à outils ou ensemble de pratiques et de techniques.

Comme illustré dans le *Tableau 6*, la majorité des auteurs qui adoptent une vision holistique du Lean, le considérant comme une approche stratégique, système de management, un système socio-technique, ou une philosophie, s'inclinent soit vers une vision universelle du Lean, soit vers un point de vue mitigé, soulignant la nécessité d'adaptations au contexte HMLV. Cette perspective reconnaît l'origine spécifique du Lean dans l'industrie automobile (Toyota) et suggère une adaptabilité plutôt qu'une application rigide dans des environnements différents.

En revanche, la vision du Lean en tant que boîte à outils ou ensemble de pratiques et de techniques met l'accent sur la standardisation, ce qui peut conduire à une perception d'incompatibilité avec les environnements HMLV, où la variabilité des produits est une caractéristique prédominante.

En résumé, la conceptualisation du Lean influe directement sur sa compatibilité avec les environnements de type HMLV. Une approche plus holistique, reconnaissant à la fois les principes universels du Lean et la nécessité d'ajustements contextuels, est essentielle pour maximiser son efficacité dans des environnements de type HMLV, tout en capitalisant sur ses principes fondamentaux.

Tableau 6 : L'impact des différentes définitions du Lean sur sa compatibilité avec les environnements HMLV

Compatibilité du Lean / Diverses définitions	**Le modèle Lean est universel**	**L'universalité du Lean – Un constat mitigé**	**Le modèle Lean est inefficace pour les environnements de type HMLV**
Philosophie	• Womack et al., 2007; • Slomp et al., 2009 ; • Arasanipalai Ra gava et al., 2014 ; • Chaplet et Narkhede., 2017 ; • Belvedere et al., 2019.	• Braglia et al., 2019 ; • Cherrafi et al., 2019 ; • Amrani et Ducq, 2020 ; • Babalola et al., 2020 ; • Braglia et al., 2020 ; • Hussain, 2020 ; • Irani, 2020 ; • Lane, 2020 .	• Gromova et al., 2020 ; • Selimović, 2022.
Système socio-technique	• Birkie et al., 2017 ; • Magnani et al., 2019.		
Système de management	• Seth et al., 2017.		
Approche Stratégique	• Yadav et al., 2019.	• Cannas et al., 2018 ; • Powell, 2018 ; • Rossini et al., 2019; • Rossini et al.,2021; • Rossini et al., 2023; • Schulze et Dallasega, 2023.	• Tripathi et al., 2022.
Boite à outils	• Yassine et al., 2014 ; • Ricondo Iriondo et al., 2016.		• Suri et al., 2010; • Aljubiri, 2019; • Hong et al., 2019; • Psarommatis et al., 2020; • Yusoof et al., 2022.
Ensemble de pratiques et de techniques		• Possik et al., 2022.	• Filho et al., 2016; • Siong et al., 2018; • Groten et Gallego-García, 2021.

II.4. Analyse du Lean dans le périmètre d'étude

Au sein de l'usine Manitowoc de Moulins, l'étude de terrain a mis en évidence les limitations des outils de planification actuellement mis en place. Parmi les causes apparentes figurent l'éloignement des postes de travail, l'absence de remontée d'informations en temps réel et la rigidité du système de

convoyage. En conséquence, ces problèmes combinés entraînent une obsolescence fréquente du séquencement établi.

Pour mieux cerner ces difficultés, nous avons modélisé le processus de production et le flux d'information via une VSM. Cette démarche a permis de cartographier l'ensemble du processus de production et de mettre en évidence les problèmes rencontrés à chaque étape, indiqués en rouge sur la *Figure 26*. Ces problématiques engendrent des erreurs potentielles, des retards, des perturbations dans la chaîne de production et allongent le *Lead time*.

Comme cela a été souligné dans le chapitre 1, l'objectif primordial de Manitowoc est de satisfaire le besoin client, en livrant les colis en temps et en ordre voulu avec la meilleure rentabilité possible. Les difficultés opérationnelles identifiées mettent en évidence la nécessité d'aborder en priorité les problèmes qui rendent obsolètes les séquencements et les planifications établis.

Dans ce contexte, certains des défis identifiés présentent des opportunités d'amélioration significatives (les problèmes surlignés en jaune sur la *Figure 26*), notamment par le biais de l'application du Lean. Cette approche, réputée pour son efficacité dans l'optimisation des processus, peut jouer un rôle essentiel dans la résolution de certains problèmes opérationnels existants.

L'objectif de cette partie est d'analyser dans un premier temps la compatibilité de certaines pratiques Lean dans le périmètre d'étude, en tenant compte de la variabilité des produits, des contraintes de production, et des particularités du système de convoyage rigide. Dans un deuxième temps des expérimentations de ces pratiques (qui semblent prometteuses) ont été réalisées et évaluées. Enfin, une discussion approfondie sera menée pour présenter les limites de ces pratiques Lean dans notre environnement spécifique afin de mieux caractériser les mesures visant à maximiser les bénéfices de ces pratiques.

II.4.1. Le Lean : Une efficacité conditionnelle et contextuelle

L'usine de Moulins est confrontée à des défis majeurs pour maintenir un séquencement optimal de sa production, impactant directement la satisfaction des clients. Ces défis comprennent des ***difficultés de remontée d'informations*** dus à la dispersion géographique des postes de pendage, ***un manque de travail standardisé*** dans le chargement des palonniers, des ***difficultés de synchronisation entre le pendage et le magasin***. Dans cette section, nous examinerons ces défis en détail et évaluerons la pertinence de l'approche Lean pour y remédier.

II.4.1.1 Problème d'information : Les difficultés de la remontée d'information

La dispersion géographique des postes de pendage crée des difficultés dans la remontée d'information. Cette dispersion est due à la présence de deux postes de pendage distincts dans l'usine, chacun étant associé à une zone de stockage spécifique. Le pendage interne s'occupe du pendage des EMS fabriqués. Tandis que le pendage externe est dédié au pendage des EMS achetés. Ces postes sont essentiels au bon déroulement de la production. En effet, ils doivent suivre le bon séquencement pour assurer la préparation des composants nécessaires à l'assemblage.

Le problème émerge lorsqu'il y a un manque d'espace dans la zone de stockage interne. Cette conséquence entraîne un stockage externe d'un EMS initialement destiné à rester à l'intérieur de l'usine. Cette information n'est pas remontée au pendeur externe pour la prise en charge du pendage des EMS concernés. Aujourd'hui, cette communication n'a lieu que le lendemain lors de l'analyse des problèmes de la veille.

Cette situation a des répercussions significatives. Tout d'abord, elle compromet le maintien du séquencement préétabli. La conséquence, est la création de retards dans l'acheminement des

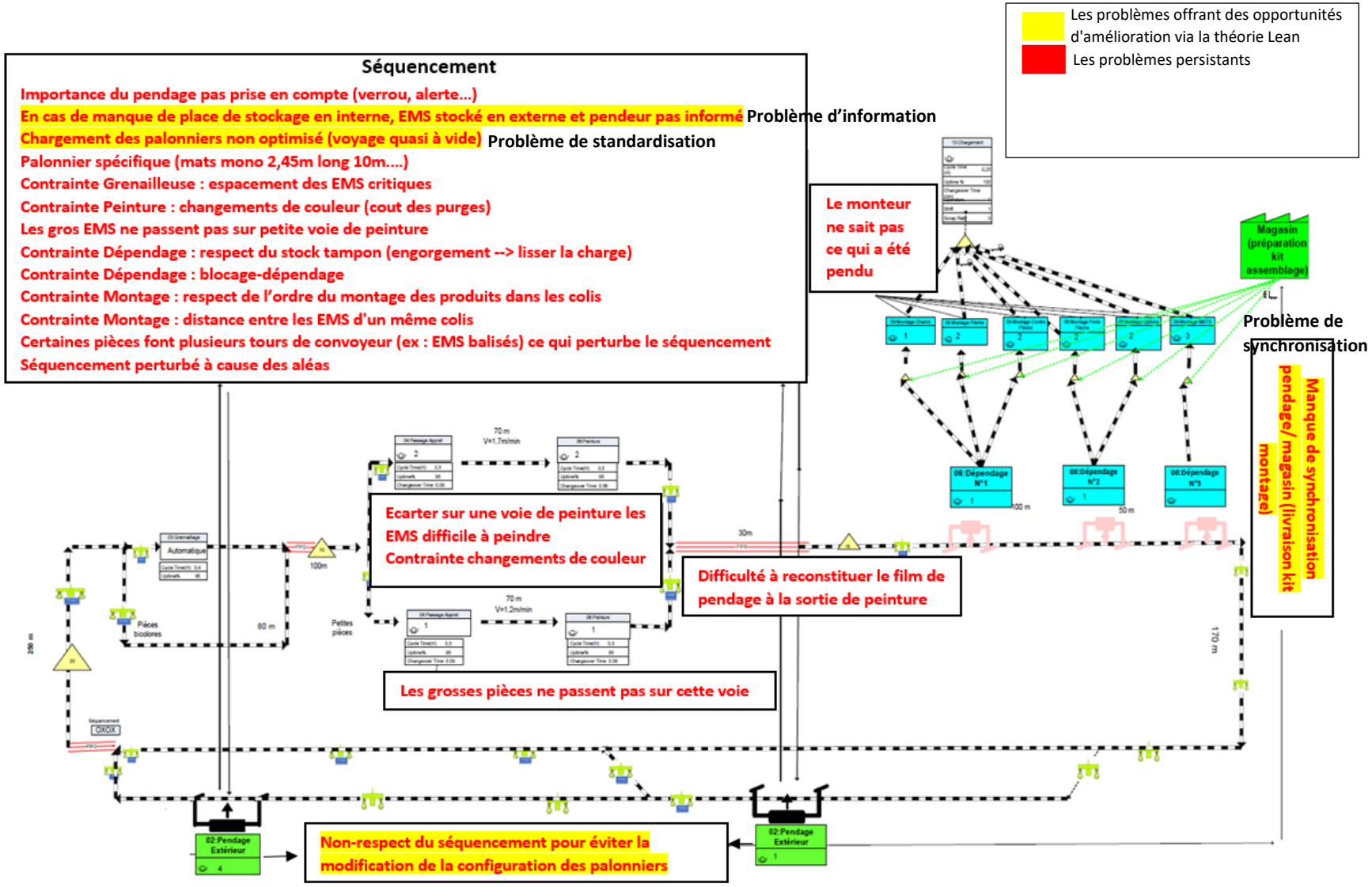


Figure 26 : Différents problèmes identifiés sur la chaîne de production

composants essentiels au montage. De plus, elle engendre une perturbation globale du flux de travail, impactant la coordination et l'efficacité opérationnelle du site.

Le Lean, axé sur la communication en face à face (sur le terrain) et la résolution rapide des problèmes, se heurte à des difficultés lorsque les équipes sont dispersées géographiquement. Dans ce contexte, l'animation quotidienne de la performance devient difficile et entraîne par conséquent des dégradations potentielles dans le processus de résolution de problèmes et de prise de décisions.

II.4.1.2 Problème de standardisation : Le manque de travail standardisé dans le chargement des palonniers

Un palonnier peut être chargé par plusieurs EMS selon leurs caractéristiques. Actuellement, la méthode de chargement des palonniers repose sur le libre choix de l'opérateur, guidé par son expérience personnelle. Cette approche présente deux problèmes principaux :

D'une part, lors du chargement de petits EMS, l'opérateur n'optimise pas toujours l'espace disponible sur le palonnier, ce qui entraîne des palonniers partiellement remplis. Cela augmente le *lead time* en raison des voyages presque à vide.

D'autre part, la difficulté pour l'opérateur de choisir les supports de pendage appropriés, exacerbée par la forte diversité des EMS et l'accès limité aux standards de pendage, complique le processus de chargement et entraîne une utilisation excessive des palonniers, augmentant ainsi le stock en cours et générant du gaspillage d'énergie et de ressources.

Le recours à des méthodes traditionnelles de travail standardisé, réalisé à l'aide d'outils « *stylo et papier* », présente des limitations significatives lorsque nous sommes confrontés à une grande variété de produits. La recherche manuelle à travers des milliers de documents de type papier pour trouver les bons standards devient fastidieuse et chronophage, ce qui génère des retards dans la prise de décision et l'exécution des tâches. De manière notable, l'expérience au sein de l'usine avec les standards de travail sur papier souligne que ces documents sont souvent délaissés par les pendeurs et demeurent malheureusement rarement à jour.

II.4.1.3 Problème de synchronisation : Les difficultés de synchronisation des flux entre le pendage et le magasin

La contrainte liée au manque d'espace est fréquemment rencontrée dans l'atelier de montage. Les postes sont alimentés à la fois par le pendage, par le convoyeur aérien, et le magasin qui fournit les kits d'assemblage par petit train. L'approvisionnement des kits s'effectue manuellement, en se basant sur le séquencement prévisionnel. Cependant, la date de livraison des EMS (qui proviennent du pendage) varie considérablement, en raison du non respect du séquencement initial.

Les postes de montage sont souvent confrontés à une désynchronisation des flux entre le pendage et le magasin. Ceci entraîne des rendez-vous manqués entre les kits approvisionnés et les composants à assembler. Une indisponibilité momentanée d'un kit d'assemblage peut provoquer un arrêt temporaire du travail sur un poste d'assemblage. Tandis que des kits livrés en avance entraîne une accumulation au poste en bord de ligne, créant ainsi des encombrements.

Le manque d'informations en temps réel sur la séquence réelle envoyée à l'atelier de montage complique davantage l'application efficace de la synchronisation entre le pendage et le magasin. Cette absence de visibilité en temps réel crée des difficultés dans la synchronisation des opérations, accroissant ainsi les risques d'arrêts de production.

Pour remédier à cette problématique sur la chaine de valeur globale, le Lean, centré sur un pilier appelé le Juste à Temps, se présente comme une solution potentielle. Selon le Lean, le Juste à Temps contient un principe clé : le Flux Tiré/Lissé. Ce principe a comme objectifs de réduire le *lead time* et d'augmenter la flexibilité. Ce principe expose deux pratiques opérationnelles : le Système Kanban et le Système SMED. Le Système Kanban offre une gestion visuelle du séquencement, permettant aux

opérateurs de suivre et de prioriser les étapes de production de manière claire. En parallèle, le Système SMED réduit le temps de changement de série, encourageant la flexibilité et facilitant l'adhésion au séquencement établi. Ces deux systèmes semblent en théorie prometteurs pour résoudre le problème du **non-respect du séquencement**. Ils seront explorés dans la section suivante à travers une étude de cas sur le terrain.

II.4.2. Expérimentation de deux pratiques Lean dans le périmètre d'étude

II.4.2.1. Exploration du Kanban

II.4.2.1.1 Le *Kanban*

Le mot *Kanban* tire son origine du mot japonais kanji qui signifie « signe » ou « instruction ». Il fait référence à un mécanisme de contrôle du flux de pièces, régulant ainsi la quantité appropriée et le moment précis de la production des produits nécessaires (Mohamad et al., 2023). Le système kanban est un outil fondamental du juste à temps afin de réapprovisionner les composants ou sous-ensembles qui ont été consommés (Powell, 2018). L'idée centrale du système Kanban est que toute production et tout mouvement de pièces tout au long des étapes de fabrication doivent être basés uniquement sur leur utilisation (Ahmad et al., 2018 ; Pekarcikova et al., 2021).

Le système *Kanban* révèle être un outil efficace pour superviser la production dans des environnements à forte mixité et de faible volume (Powell, 2018).
Les trois axes clés du système Kanban peuvent être décrits comme :

- La matérialisation du flux d'informations ;
- La visualisation du flux de travail ;
- Le management visuel des encours standard (Work In Process).

II.4.2.1.2 Expérimentation du Kanban

Les pendeurs reçoivent un séquencement (voir *Figure 27)* dont l'horizon couvre la journée. Ce séquencement donne l'ordre de pendage des EMS pour les trois équipes de production (matin, soir et nuit). La gamme d'EMS est vaste, 1700 références avec des caractéristiques diverses. Ces EMS sont stockés dans différents emplacements au sein d'un parc occupant une superficie totale d'environ 5000 m². La photo de la *Figure 28* montre une vue partielle du parc. Les pendeurs ont pour responsabilité de récupérer les EMS, souvent avec l'aide du grutier, pour ensuite les suspendre au palonnier conformément à l'ordre établi par le séquencement prévisionnel. Le temps de cycle de pendage varie entre 10 minutes et 90 minutes en fonction de l'emplacement de chaque EMS dans le parc et du processus de pendage.

Souvent, plutôt que suivre l'ordre prédéfini par le séquencement prévisionnel, les pendeurs choisissent les EMS plus simples à pendre (le palonnier est déjà équipé des bons supports) et les plus proches (plus facile à aller chercher dans le parc). Cette autonomie décisionnelle fait que les pendeurs vont aller chercher des EMS plus loin dans le séquencement prévisionnel, perturbant ainsi le séquencement établi. Ce mode de fonctionnement conduit à des performances globales insatisfaisantes par rapport aux résultats attendus et à de nombreux dysfonctionnements dans le processus de production.

SEQUENCEMENT DU **23/06/2020**

PENDAGE INTERIEUR	NUMERO Cdes	MODELE	PENDAGE EXTERIEUR	Temps : 0H
MAT K447A2	JAUNE 92			1
	PR	MDT	PDS R40A	2
SUIVANT FAB INTERNE	5300016568	PR RAL 3020	PF NU 33349	3
	5300017132	PR	BLOC LEST R-51	4
MAT K447C2	JAUNE 92			5
	5300017015	PR	VERROU Q-52	6
SUIVANT RECEPTION	300203705	MDT289	CHS KIT ERGO	7
SUIVANT RECEPTION	300202089	JAUNE 92	MAT RAC K40K40	8
	5300017136	PR	TIRANT BRIDAGE	9
	300199008	MR418	CHR MOUFLE+ACCESS	10
SUIVANT RECEPTION	300203702	MDT	CHS COLISAGE	11
COLIS 30	300202868	MD569	FL COLISAGE	12
MAT KMT449A2	JAUNE 92		MAT KMT449A2	13
SUIVANT RECEPTION	300202853	MDT249	OR POTENCE	14
	4400051785	PR	TRIANGLE CAGE	15
	300195786	MDT389	CF DERIVES G+D	16
COLIS 70	300202868	MD569	FL 5M 76144	17
COLIS 70	300202868	MD569	FL 5M 76147	18
MAT K449A2	JAUNE 92			19
	300197584	MDT	OR SUP CAB 387	20
MAT KM447E2	JAUNE 92		MAT KM447E2	21

Figure 27 : Le séquencement journalier

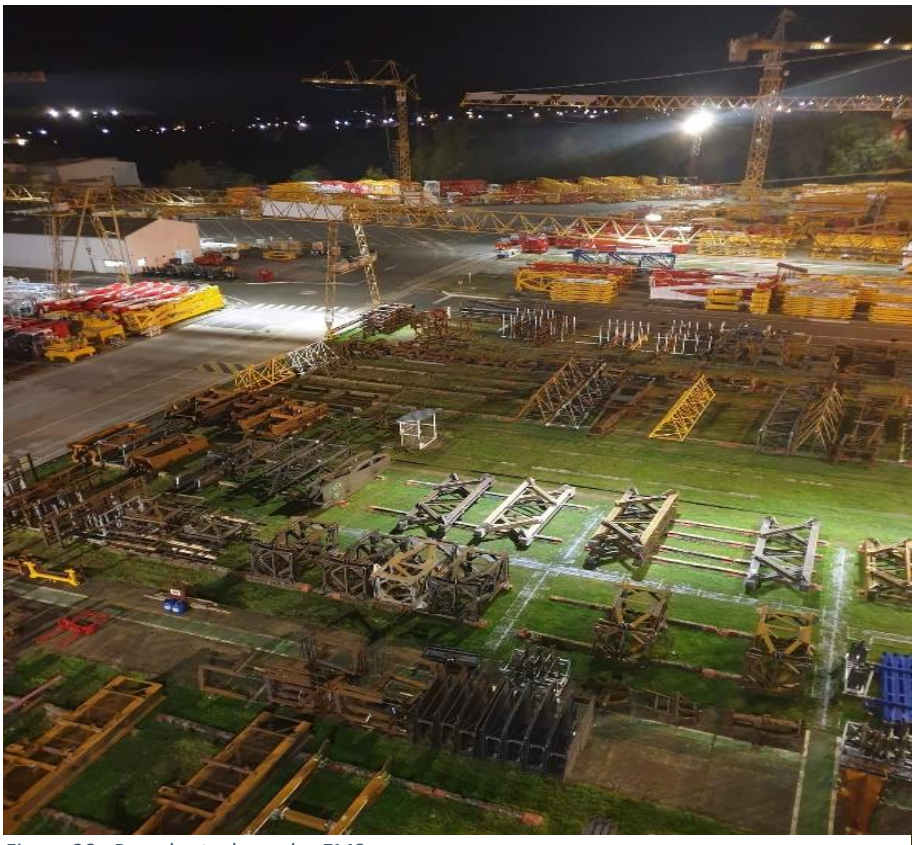


Figure 28 : Parc de stockage des EMS

Afin de remédier à cette situation, le site de Moulins a opté pour une approche Lean, en explorant l'utilisation de techniques basées sur le système Kanban. L'objectif essentiel de la mise en œuvre du système Kanban est de restreindre la visibilité des pendeurs sur les EMS à venir, afin de garantir un meilleur respect du séquencement. En limitant délibérément le champ de visibilité des pendeurs, l'entreprise cherche à éviter toute anticipation excessive du pendage d'EMS par rapport au séquencement planifié. Plutôt que d'afficher l'intégralité du séquencement pour la journée, un tableau Kanban mis en place avait comme but de créer une file d'attente qui correspond à la colonne « à faire » dans la *Figure 29.* Seuls les pendages à court terme sont visibles par les pendeurs qui correspondent à la colonne « en cours » dans la *Figure 29*.

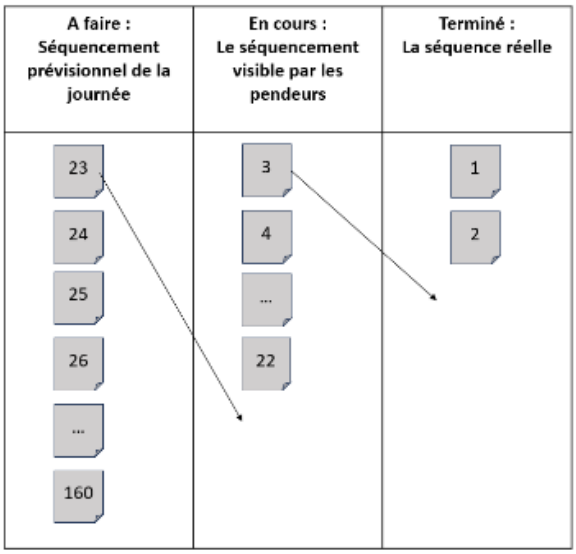


Figure 29 : Tableau Kanban pour le pendage

Basé sur le principe des encours standard, le tableau Kanban doit limiter le nombre d'EMS visibles à 20, chiffre calculé en fonction du temps de cycle moyen. Dans notre exemple (voir *Figure 29*), lorsque le pendeur termine le pendage de l'EMS n°3, celui-ci est déplacé vers la colonne « Terminé », permettant à l'EMS 23 (qui en attente de pendage) d'être tiré automatiquement vers l'état « En cours ». L'objectif de ce processus est de réduire les risques d'anticipation non planifiée afin de favoriser le respect du planning prévisionnel de pendage.

II.4.2.1.4 Résultat et discussion

Les résultats présentés dans le *Tableau 7* sont issu d'une expérimentation sur deux semaines. *Ils* révèlent que l'introduction du système Kanban a légèrement amélioré le taux de respect du séquencement. En revanche, une dégradation de la productivité de 22% a été constatée.

Tableau 7 : Résultats de mise en œuvre du Kanban

Equipe	Taux de respect du séquencement Pré-kanban	Taux de respect du séquencement Post-kanban	Nombre de palonniers effectués Pré-kanban	Nombre de palonniers effectués Post-kanban
Matin	34%	42%	66	49
Après midi	30%	40%	46	42
Soir	45%	48%	46	38

La restriction de la visibilité des EMS pour les pendeurs a entraîné une augmentation des déplacements dans le parc pour transporter individuellement les EMS, faute de pouvoir optimiser le

transport en regroupant plusieurs EMS lors d'un seul déplacement. Ce temps perdu a impacté directement la productivité du pendage, entraînant ainsi des arrêts et des aléas pour les postes avals (peinture, montage). Cette façon de faire s'est aussi heurtée à la gestion particulière de certains palonniers. En effet, certains types d'EMS exigent des palonniers spécifiques pour être suspendus (standard de pendage spécifique). Le manque de visibilité journalière sur le séquencement n'a pas permis aux pendeurs d'utiliser les bons palonniers au moment de leur passage. La conséquence est que ces palonniers repartaient souvent à vide. Si l'EMS en question apparaissait dans le film de pendage après que son palonnier spécifique soit passé, le pendage pouvait être retardé jusqu'à 13 heures, temps nécessaire pour que le palonnier effectue un tour complet et soit à nouveau disponible.

En conclusion, bien que le système Kanban puisse être un outil efficace dans des environnements stables et prévisibles, il devient moins efficace dans des contextes caractérisés par une personnalisation élevée des produits et une grande variabilité des temps de cycle. Dans de telles situations, l'application du système Kanban peut entraîner une dégradation de la productivité. Ces conclusions concordent avec la littérature existante, soulignant que le système Kanban peut être inadapté aux environnements HMLV (Ohno, 1988 ; Crute et al., 2003 ; Matt et al., 2014 ; Dallasega et al. 2019 ; Irani, 2020).

II.4.2.2. L'exploration du SMED.

II.4.2.2.1 Le *SMED*

SMED (**S**ingle **M**inute **E**xchange of **D**ies) est une méthode Lean connue pour réduire le temps nécessaire pour effectuer un changement d'équipement, à moins de 10 minutes, « mettant l'accent sur minute à un chiffre » (Shingo, 1985).

C'est l'un des outils les plus largement reconnus de la philosophie Lean par les entreprises du monde entier (Junior et al., 2022 ; Braglia et al., 2023).

(Van Goubergen et Van Landeghem, 2002) ont indiqué trois raisons principales pour lesquelles les initiatives de réduction des temps de changement de configuration peuvent convenir à toute entreprise :

- Accroître la flexibilité : les environnements HMLV exigent une réactivité accrue du fait d'une production en petits lots, entraînant inévitablement la nécessité de réduire les temps de changement de série ;
- Augmenter la capacité de production du goulet d'étranglement : une machine est définie comme un goulet d'étranglement lorsque sa capacité de production est inférieure à celle des autres, et limite la capacité de production de l'ensemble du système. Souvent, les temps de changement de série élevés contribuent à la faible capacité de production du goulet d'étranglement ;
- Réduire les coûts : une diminution des temps de changement de série a également un impact positif sur le coût unitaire du produit, donc sur la marge.

II.4.2.2.2 Expérimentation du SMED dans le périmètre d'étude.

Les EMS sont pendus sur des palonniers (voir *Figure 30)* à l'aide de supports spécifiques à chaque EMS, comme des transversaux. Face à la grande variété d'EMS, les palonniers ne sont pas standardisés. Si la configuration du palonnier qui se présente au poste de pendage n'est pas adaptée à l'EMS à pendre, donné par le séquencement, le pendeur doit effectuer un changement de configuration du palonnier (enlever, déplacer ou remettre des accessoires de pendage).

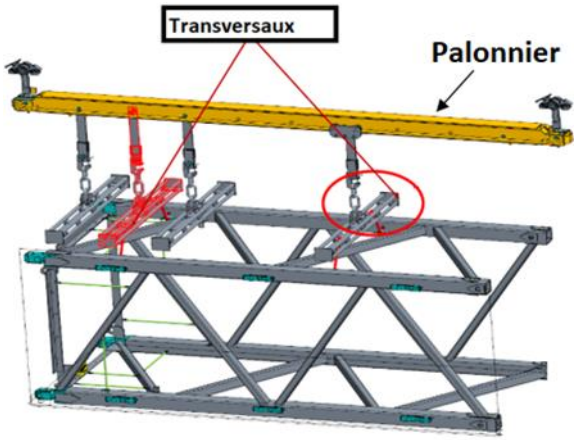


Figure 30 : Pendage d'un EMS

Cette opération de changement d'équipements est indispensable. Elle nécessite du temps et se révèle parfois peu ergonomique. C'est pourquoi, les pendeurs préfèrent souvent modifier le séquencement des EMS pour éviter un changement de configuration de palonnier. Ils choisissent des EMS qui s'adaptent plus facilement à la configuration du palonnier présent. Mais cette modification du séquencement impacte fortement l'efficacité globale du système de production.

Dans cette optique, une mise en œuvre réussie du SMED devrait permettre de réduire les temps de changement de configuration du palonnier, et ainsi de garantir que ce changement ne constitue plus un obstacle au respect du séquencement préétabli. L'entreprise Manitowoc a suivi les recommandations préconisées par la littérature pour la mise en œuvre du SMED, et a suivi les cinq étapes suivantes :

Étape 1 *: Observer et filmer la procédure de changement de série existante*

Cette étape consiste à cartographier toutes les activités liées au changement de série pendant le temps de mise en place. Un film permet d'identifier les tâches, d'établir leur séquence et leurs durées respectives (voir *Figure 31*).

Time Observation Form - SMED

I : machine à l'arrêt
E : machine en marche

Etape	Operation	Début	Fin	Durée	I/E
1	va chercher la table à roulette, la positionne sous le palonnier	00:00:00	00:00:10	00:01:40	I
2	se déplace vers la commande de la table	00:00:10	00:00:30	00:20	I
3	descend le transversaux sur la table	00:00:30	00:01:45	01:15	I
4	se déplace vers la table, enlève les crochets, les range	00:01:45	00:02:14	00:29	I
5	descend le transversaux sur la table	00:02:14	00:02:36	00:22	I
6	déplacement vers la table à roulette	00:02:36	00:02:45	00:09	I
7	enlève goupille de sécurité, lève la tige, dégage la chaine	00:02:45	00:02:56	00:11	I
8	déplacement de la table à roulette sous la nouvelle bielle A	00:02:56	00:03:04	00:08	I
9	Fixation du transverseaux: enlève goupille de sécurité, lève la tige de la bielle A, engage la chaine sur la bielle A, refixe tige puis goupille sur bielle A, refixe tige et goupille sur bielle B	00:03:04	00:03:33	00:29	I
10	se déplace vers la commande de la table	00:03:33	00:03:45	00:12	I
11	remonte la station	00:03:45	00:04:50	01:05	I
12	se déplace vers la table à roulettes	00:04:50	00:04:58	00:08	I
13	va ranger la table à roulette en T29	00:04:58	00:06:05	01:07	E
14	retourne vers la commande de la table	00:06:05	00:06:50	00:45	E
			Temps de cycle :	0:08:20	

Figure 31 : Changement de configuration avant SMED

Étape 2 : Analyser l'ergonomie des opérations

Le but de cette étape est d'identifier les opérations présentant un risque élevé sur le plan ergonomique. Le film met en lumière la difficulté à positionner la table à roulette sous le palonnier, car le pendeur sollicite intensément ses membres supérieurs pour pousser la table avec une charge excédant les 100 kg (voir *Figure 32*). De plus, la fixation des transversaux nécessite une posture inconfortable des membres supérieurs, bras tendus et positionnés au-dessus du niveau du cœur (voir *Figure 33*). Ces observations soulignent la nécessité d'apporter des améliorations sur ces opérations afin de réduire les risques potentiels de troubles musculo-squelettiques.



Figure 32 : Posture forcée des membres supérieurs



Figure 33 : Posture inconfortable des membres supérieurs

Dans cette optique une nouvelle table a été conçue :

- Plus basse de 20 cm ;
- Comportant une ouverture pour faciliter l'accès à l'opérateur, évitant ainsi la nécessité de se pencher vers l'avant (voir *Figure 34*);
- Munie de 2 roues fixes et 2 roues mobiles (versus 4 roues mobiles) pour faciliter son déplacement.

Ces aménagements ont permis de minimiser les mouvements inutiles, d'améliorer l'accessibilité, et de réduire la fatigue physique, créant ainsi un environnement de travail plus favorable pour l'opérateur lors du changement d'équipements des palonniers.

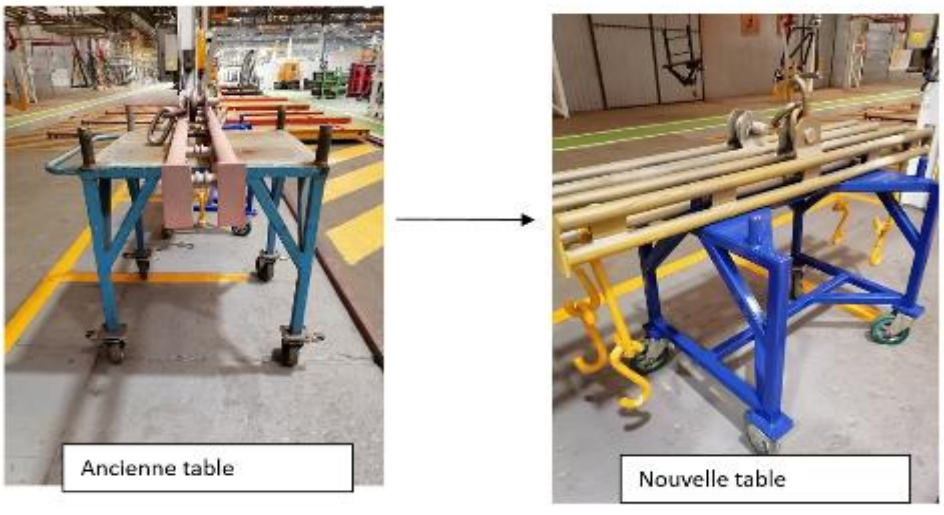


Figure 34 : Conception d'une nouvelle table pour atténuer les postures inconfortables

Étape 3 : Distinguer les opérations internes et externes

Les opérations internes doivent être effectuées avec la machine arrêtée, tandis que les opérations externes peuvent être exécutées lorsque machine est en marche (voir *Figure 31*), et donc en temps masqué, permettant ainsi de réduire le temps de changement de série.

Étape 4 : Convertir les opérations internes en opérations externes

Chaque opération a été analysée, pour voir si elle peut être effectuée pendant que le convoyeur est encore en fonctionnement. Il a été constaté qu'aucune opération interne ne pouvait être transformée en opération externe.

Étape 5 : Optimiser les opérations internes et externes

Dans cette étape, l'attention s'est principalement portée sur le déplacement de la table à roulette :

- Initialement positionnée loin du poste de travail ;
- Elle a été repositionnée à proximité du poste de travail, les emplacements de stockage et d'utilisation ont été zonés selon le principe du 5S.

II .4.2.2.3 Résultats et discussion

La mise en œuvre du SMED a entraîné une réduction significative du temps de changement de série, passant de 8,34 min à 5,64 min en moyenne (voir *Figure 35*), représentant une réduction de 32%.

Au moment de l'étude, le *Takt Time* pour l'opération de pendage est de 15.9 min par palonnier. Le temps de cycle de pendage est de 8.4 min par palonnier. Ainsi, le temps nécessaire pour le pendage, en envisageant un changement de série pour chaque palonnier, est calculé en additionnant le temps de cycle de pendage et le temps de changement de série. Avant le *SMED* le temps de pendage avec modification de configuration était de 16,74 min (8 ,40 + 8,34) par palonnier (supérieur au *Takt Time*), il est maintenant de 14,04 min (8,40 + 5,64).

Avant l'implémentation du *SMED*, le changement de série à chaque palonnier n'était envisageable, car le temps nécessaire dépassait le *Takt Time*, créant ainsi un potentiel goulet d'étranglement. En revanche, avec la mise en place du *SMED*, le changement de série est devenu possible : le temps nécessaire ne dépassant plus le *Takt Time*. Cette transformation a joué un rôle crucial dans l'amélioration globale de l'efficacité opérationnelle, permettant des changements de série plus rapides et éliminant un obstacle potentiel à la productivité.

Cependant, les améliorations apportées au plan ergonomique n'ont réussi qu'à atténuer la pénibilité physique. Les pendeurs ont exprimé leur insatisfaction à plusieurs reprises, soulignant une charge supplémentaire notamment due à la fréquence accrue des changements de série. Parallèlement, l'observation directe sur le terrain, qui a suivi la mise en œuvre du *SMED*, a révélé d'autres aspects sur les conditions de travail. En effet, la modification systématique du palonnier a été identifiée comme une source de stress au travail par les pendeurs.

Dans la littérature, plusieurs études discutent de la mise en œuvre intégrée du Lean et la prise en compte de l'ergonomie dans divers secteurs, mais seulement trois portent sur le système SMED, (Brito et al., 2017 ; Boran et Ekincioğlu, 2017 ; Afonso et al., 2022). A notre connaissance, aucune étude dans la littérature n'intègre les capacités physiques et psychologique de l'opérateur lors de la mise en œuvre du système *SMED*.

Time Observation Form - SMED

I : machine à l'arrêt
E : machine en marche

Etape	Operation	Durée	I/E
1	va chercher la table à roulette, la positionne sous le palonnier	00:00:30	I
2	se déplace vers la commande de la table	00:10	I
3	descend le transversaux sur la table	01:15	I
4	se déplace vers la table, enlève les crochets, les range	00:29	I
5	descend le transversaux sur la table	00:22	I
6	déplacement vers la table à roulette	00:09	I
7	enlève goupille de sécurité, lève la tige, dégage la chaine	00:11	I
8	déplacement de la table à roulette sous la nouvelle bielle A	00:08	I
9	Fixation du transverseaux: enlève goupille de sécurité, lève la tige de la bielle A, engage la chaine sur la bielle A, refixe tige puis goupille sur bielle A, refixe tige et goupille sur bielle B	00:29	I
10	se déplace vers la commande de la table	00:12	I
11	remonte la station	01:05	I
12	se déplace vers la table à roulettes	00:08	I
13	va ranger la table à roulette dans sa nouveau emplacement	00:00:20	E
14	retourne vers la commande de la table	00:10	E
	Temps de cycle :	0:05:38	
	Gain :	32%	

Figure 35 : Changement de configuration après SMED

II.4.3 Conclusions sur le Lean dans le cadre du périmètre d'étude et proposition d'une issue complémentaire et synergétique

Bien que le Lean soit reconnu pour ses pratiques éprouvées visant à maximiser l'efficacité opérationnelle, son application dans des environnements spécifiques, comme celui de l'usine de Moulins de Manitowoc, se heurte à des problèmes significatifs.

Premièrement, la génération manuelle d'un séquencement quotidien pour l'approvisionnement des postes de montage, à l'aide de la méthode Lissage/Fractionnement *(Heijunka*) est complexe. Cette approche ne prend pas en compte les multiples contraintes et objectifs souvent en conflit, ne permettant pas une solution adaptée à l'échelle de l'entreprise. De plus, l'absence d'informations en temps réel constitue une difficulté majeure, impactant la capacité à fournir un séquencement optimisé.

Deuxièmement, les problèmes opérationnels identifiés à différents endroits de la chaine de production perturbent régulièrement le séquencement préétabli, le rendant souvent obsolète. L'étude de terrain a mis en évidence l'impératif d'éliminer ou d'atténuer ces problèmes avant de se concentrer sur l'optimisation de ce dernier.

Le Lean semblait être prometteur pour résoudre certains problèmes identifiés. Cependant, le contexte actuel du site industriel montre des limites importantes de certaines pratiques.

Principalement, les principes Lean, axés sur la communication en face à face, rencontrent des difficultés lorsque les équipes sont dispersées géographiquement. De plus, la personnalisation de masse et la grande variété des produits compliquent l'application uniforme du travail standardisé, en particulier avec des méthodes traditionnelles reposant sur des documents « papier ». Ainsi, l'absence d'informations en temps réel constitue une limitation majeure pour le Juste à Temps entre le pendage et le magasin.

Dans le même sens, l'expérimentation du *Kanban* et du *SMED* a révélé leur inefficacité dans un contexte caractérisé par une forte personnalisation des produits et une variabilité importante des temps de cycle. Le Système *Kanban* a entraîné une dégradation de la productivité et des niveaux de service insatisfaisants. De plus, malgré le rôle joué par la pratique *SMED* dans la réduction du temps

de changement de série, il a représenté des limites et le rejet d'un point de vue ergonomique et mental pour les pendeurs.

Ainsi, les opérationnels disposent d'une certaine autonomie dans leurs tâches. Toutefois, cette autonomie est mal utilisée, avec une priorité donnée à l'allégement de leurs propres contraintes plutôt qu'à la satisfaction des besoins du client. Cette mauvaise utilisation a limité l'efficacité des initiatives Lean. Plutôt que de retirer cette autonomie, l'entreprise Manitowoc souhaite repenser son approche pour la rendre plus productive.

En conclusion, bien que le Lean ait initialement semblé prometteur pour remédier à certains défis identifiés sur la VSM. Aujourd'hui, les problèmes identifiés en rouge sur la VSM (voir *Figure 37)* persistent. L'utilisation des outils Lean dans le contexte actuel de l'entreprise apporte des gains limités. Il est donc nécessaire de s'interroger sur leur adaptation. La littérature nous montrant que des outils bien adaptés au contexte peuvent se monter efficaces.

Dans ce contexte complexe et très spécifique, le recours à la digitalisation est une piste intéressante afin de pallier certaines limites du Lean. En intégrant des outils de communication, des systèmes de gestion électronique des documents et des technologies en temps réel, la digitalisation pourrait surmonter ces obstacles. Cette transition digitale permettrait d'enrichir certaines pratiques Lean, comme par exemple :

- en permettant la remontée d'information malgré la distance pour un meilleur processus de résolution de problèmes et pour une amélioration de la qualité des prises de décisions ;
- en rendant le travail standardisé plus adaptable et confortable pour les pendeurs ;
- en fournissant des informations en temps réel pour une meilleure synchronisation entre les opérations ;
- en optimisant la gestion des flux entre le pendage et le magasin pour mieux approvisionner le secteur montage.
- en préservant l'autonomie des opérationnels tout en les responsabilisant davantage, pour leur permettre de mieux répondre aux attentes de leurs clients.

La synergie entre les pratiques Lean et celles découlant de la digitalisation pourrait transformer les défis actuels en opportunités d'amélioration continue et d'efficacité opérationnelle de la chaîne de valeur globale et donc contribuer à l'amélioration de la satisfaction des clients.

Parallèlement, les techniques issues de la digitalisation pourraient ouvrir une nouvelle voie à l'exploration de solutions alternatives pour assurer le respect du séquencement. Ces solutions innovantes permettraient de résoudre la contradiction entre le besoin d'un séquencement centralisé et un séquencement décentralisé.

Cette approche sera explorée en détail dans le chapitre 3 qui représente une nouvelle vision stratégique du site industriel de Moulins de Manitowoc pour répondre à sa complexité opérationnelle spécifique (voir *Figure 36*).

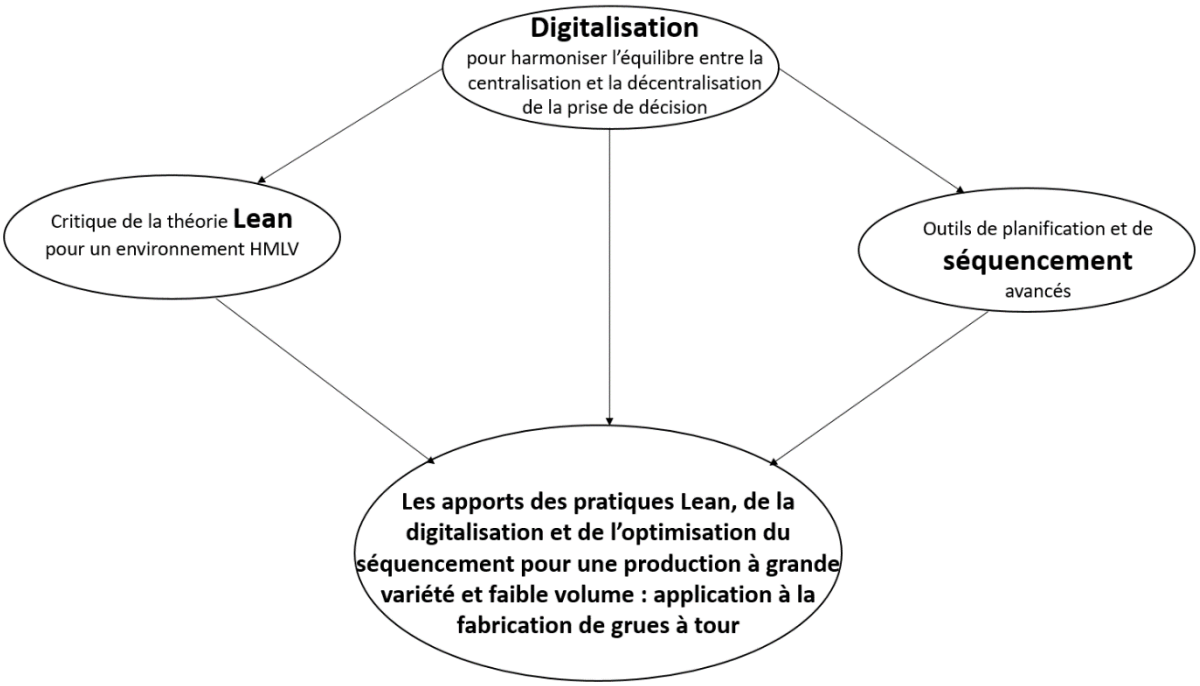


Figure 36 : Les contributions de la thèse

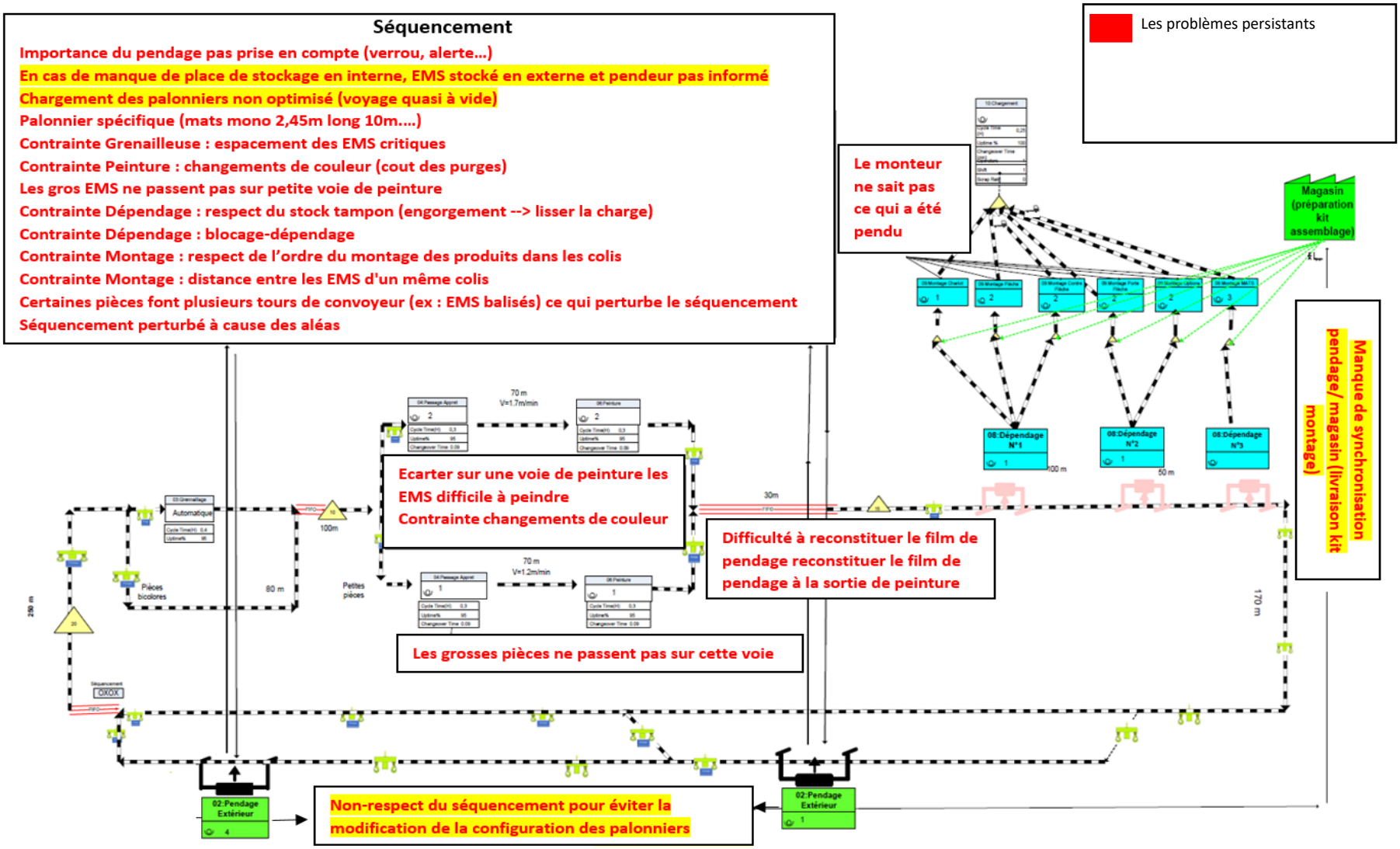


Figure 37 : VSM : Problèmes persistants et limites du Lean

Chapitre III : La digitalisation pour faciliter l'équilibre entre la centralisation et la décentralisation de la prise de décision

III.1 Introduction et objectifs

Un système de production permet la réalisation d'un produit, afin de satisfaire la commande d'un client. Il implique des flux physiques tels que l'approvisionnement en matières premières, la circulation des composants et des sous-ensembles et le déplacement du personnel, ainsi que des flux d'information essentiels pour suivre le processus de production (Messaoudene & Gramdi, 2007). Une bonne coordination entre ces flux physiques et d'information est cruciale pour le bon fonctionnement du système. C'est là qu'intervient le système de pilotage qui prend les décisions nécessaires à l'organisation de la production.

Le processus de prise de décision repose souvent sur une structure centralisée, au sein de laquelle un centre de décision unique supervise l'ensemble de la production. Il coordonne les ressources et prend des décisions sur la planification et l'exploitation des installations en considérant l'ensemble du système. L'approche est séquentielle : avant de commencer la production, la fabrication est planifiée, puis ensuite, le système est exploité (Caggiano et al., 2019). Cette approche offre des avantages, notamment la capacité à tendre vers une optimisation globale. Mais, il n'est totalement efficace que dans le cas de systèmes stabilisés, ne présentant que peu ou pas d'aléas (ElMaraghy et al., 2019). Dans le cas contraire, la planification et cette exploitation séquentielles dirigées par des experts deviennent insuffisantes face à la complexité et à l'imprévisibilité des systèmes de production (Morariu et al., 2020). Cette approche est souvent confrontée à des défis tels que la rigidité dans la prise de décision et une difficulté à s'adapter rapidement à des imprévus, à des dysfonctionnements ou à une complexité interne importante.

C'est pourquoi, l'évolution vers des processus de décisions décentralisées et dynamiques suscite l'intérêt des industriels par leur capacité à répondre aux exigences de réactivité du marché (Filz et al., 2023). Dans cette approche, les acteurs locaux ont la liberté de prendre des décisions autonomes en fonction de leurs contraintes spécifiques, favorisant des optimisations locales (Marques et al., 2017). Cependant, la décentralisation des décisions peine à converger vers une optimalité globale des solutions mises en œuvre, entraînant parfois un manque de cohérence ou des conflits d'objectifs.

La tension entre la centralisation et la décentralisation de la prise de décision reflète le dilemme entre l'optimisation globale et la réactivité locale. Les entreprises industrielles sont donc confrontées à la nécessité de prendre des décisions globales (Marques et al., 2017), c'est-à-dire de penser globalement tout en agissant de manière économiquement compatible avec les contraintes locales.

La digitalisation avec les technologies de l'industrie 4.0 associées offrent une opportunité pour combiner plus efficacement ces deux structures de pilotage. Il apparaît donc pertinent de coupler les avantages d'un système centralisé et prédictif, permettant d'assurer les fonctions tactiques de planification de la production, à un système décentralisé et réactif d'exécution de la production, pilotant les flux physiques en temps réel. Cette synergie vise à atteindre un bon équilibre entre la centralisation et la décentralisation dans le processus de prise de décision.

Ce couplage nécessite cependant de définir, développer et déployer des outils pour assurer la cohérence des décisions prises sur le terrain, à la fois entre elles et avec les cadres fixés de manière optimisée par le système centralisé. Les outils numériques sont au cœur de cette réflexion. Aujourd'hui, il y a encore un manque de recherches approfondies sur l'impact de la digitalisation sur la prise de décision et comment adapter ces technologies pour en tirer pleinement parti (Nouinou et al., 2023). L'enjeu réside non seulement dans l'adoption des technologies numériques, mais surtout dans la manière dont elles vont être utilisées pour accroître la qualité des décisions prises.

Ce chapitre est structuré en quatre parties. La première partie est un état de l'art approfondi qui explore l'impact de la digitalisation sur le processus de prise de décision. La deuxième partie explique comment, chez l'entreprise Manitowoc sur le site de Moulins, la digitalisation est utilisée pour construire un séquencement centralisé et optimisé, mettant en lumière ses bénéfices et ses risques potentiels dans la coordination globale. Ensuite, la troisième partie se penche sur les bénéfices et les risques potentiels des décisions décentralisées intégrés au séquencement centralisé, en particulier dans un environnement aligné avec le modèle Lean. Enfin la dernière partie, montre la mise en œuvre d'un outil développé pour Manitowoc, conçu pour tirer parti des avantages des deux approches (centralisée et décentralisée), dans le but d'atteindre un bon équilibre dans le processus de prise de décision, et un fonctionnement optimisé du système de production.

III.2. La digitalisation au service de la prise de décision

Les exigences changeantes des clients et les évolutions constantes du marché ont suscité un intérêt croissant envers la digitalisation en tant que tendance majeure. Elle est récemment devenue un moyen d'obtenir des avantages concurrentiels et de différencier l'entreprise (Ferreira et al., 2019). Cette évolution vers la digitalisation n'est pas seulement motivée par la concurrence. Elle offre également un moyen essentiel de transformer la manière dont les décisions opérationnelles sont prises au sein de l'entreprise pour une meilleure performance.

Le terme « digitalisation » est défini de manière très diverse dans la littérature. La définition que nous retenons, et qui correspond bien au contexte de notre étude, est que « *la digitalisation fait référence aux changements dans la nature du travail, des rôles et des activités à la suite de l'adoption des technologies numériques dans une organisation ou dans l'environnement opérationnel d'une organisation* » (Parviainen et al., 2017 ; Thun et al., 2022). La digitalisation consiste donc à repenser les opérations actuelles à partir de nouvelles perspectives rendues possibles par la technologie numérique (Parviainen et al., 2017). Ce qui ouvre la voie à de nouvelles opportunités de création de valeur pour les clients (Eller et al., 2020 ; Ferreira et al., 2019).

Les prémices de la digitalisation remontent à l'avènement de l'informatique, dans les années 1950 et 1960, avec l'émergence des premiers ordinateurs. L'adoption généralisée d'internet dans les années 1990 est souvent considérée comme un catalyseur de la transformation numérique, conduisant à une connectivité mondiale sans précédent. Cette interconnexion favorise la fluidité des échanges, la collaboration et l'accès instantané aux données, éléments clés dans le contexte actuel de la transformation digitale des organisations. L'émergence de l'industrie 4.0, également connue sous le nom de quatrième révolution industrielle, a marqué une révolution grâce à l'intégration de technologies avancées telles que l'Internet des objets (IoT), l'intelligence artificielle (IA) et le Big Data permettant d'améliorer la production et éclairer la prise de décision (Soori et al., 2023).

Dans la suite de cette partie, nous explorerons comment la digitalisation peut servir de support à la prise de décision optimisée. Par ailleurs, nous examinerons la question cruciale de savoir si la digitalisation peut être efficace pour gérer les tensions entre la centralisation et la décentralisation dans le processus de prise de décision.

III.2.1. Comment la digitalisation sert de support à la prise de bonnes décisions

III.2.1.1 La complexité de la prise de décision dans un environnement HMLV

La prise de décision, dans les entreprises qui doivent répondre à des demandes fluctuantes dans un environnement de production HMLV, est une tâche extrêmement difficile. Une mauvaise planification entraine des conséquences négatives, qui se répercutent immédiatement sur les clients. Ainsi, des réponses justes doivent être trouvées dans un réseau complexe d'options interdépendantes (Gödri et al., 2019). Cette complexité dans la prise de décision est exacerbée par deux impératifs contradictoires : la nécessité croissante de flexibilité pour répondre aux variations du marché et aux attentes des clients, et la pression constante pour atteindre des objectifs de productivité et de performance de livraison (Johansen et al., 2021 ; Klöber-Koch, 2017).

Ces deux objectifs cibles conflictuels (cités ci- dessus) ne sont qu'insuffisamment pris en compte par la nature statique des systèmes de production classiques, en particulier dans les environnements HMLV. La variabilité élevée des exigences pour chaque produit complexifie davantage la prise de décision. Ce qui nécessite un échange intensif de données entre les différentes parties prenantes (les décideurs, les superviseurs d'atelier et les opérateurs). Pour parvenir à une décision optimisée, il est impératif d'effectuer de nombreuses investigations approfondies, des analyses détaillées et des calculs, rendant ainsi le processus long et fastidieux (Dewa et al., 2018).

En outre, le caractère manuel du processus, basé sur des données terrain papier, souvent incomplètes, inexactes et décalées du temps réel, engendre des inefficacités dans le processus de prise de décision (Zhong, 2013). La nécessité de reprogrammer devient évidente pour mettre à jour le planning de production en cas de changement dans l'état du système de fabrication, rendant le planning proposé irréalisable ou inefficace (Ma et al., 2018). Les décisions prises en fonction de ces données ne parviennent pas à prendre pleinement en compte la réalité dynamique et changeante du terrain (Li, 2022). Par ailleurs, les pratiques industrielles montrent que ces systèmes deviennent progressivement insuffisants pour faire face aux perturbations et aux incertitudes fréquentes dans les environnements HMLV, sans données précises et en temps réel sur l'état des ateliers (Zhong et al., 2013). En conséquence, la gestion se transforme fréquemment en une lutte contre les incendies, avec des retards dans l'adaptation aux changements rapides au niveau de l'atelier et une diminution générale de l'efficacité opérationnelle. Afin de relever ces défis, les besoins d'efficacité, de flexibilité et de réactivité se font sentir dans le secteur manufacturier (Klöber-Koch, 2017).

III.2.1.2 : La digitalisation comme remède aux lacunes

Pour remédier à ces enjeux, la digitalisation s'impose comme une nécessité. Elle est préconisée pour remédier aux lacunes dans la collecte, l'analyse et l'utilisation des données (Cifone et al., 2021). Grâce à l'émergence des technologies de l'information et de la communication (TIC), telles que l'Internet des objets (IoT) et les dispositifs connectés, la digitalisation transforme fondamentalement la manière dont les informations sont collectées, traitées et utilisées dans le processus de prise de décision (Villalonga et al., 2021). Cela ouvre la voie à un nouveau concept de « *prise de décision basée sur les données* » (Colombari et al., 2023).

Tout d'abord la digitalisation permet d'automatiser la collecte de données, provenant de diverses sources hétérogènes. Elle intègre les données opérationnelles, incluant souvent des informations sur les ressources, les commandes, les stocks et d'autres aspects liés aux opérations quotidiennes, issues des systèmes ERP de l'entreprise tels que SAP. Elle intègre également les données de processus provenant de l'atelier de production grâce à la mise en place des dispositifs connectés (QR code, des capteurs IoT, etc.). Cette automatisation fournit aux décideurs des informations fiables, rapides et en

temps réel, éliminant ainsi les erreurs et les retards associés à la saisie manuelle des données (Bevilacqua et al., 2020).

En intégrant ces données hétérogènes, la digitalisation crée une vue holistique de l'ensemble des opérations de l'entreprise grâce à la représentation numérique du monde physique. Elle combine les données opérationnelles avec les détails spécifiques des processus de production, offrant ainsi aux décideurs une vision précise de la situation réelle du système de production. Cette synergie cohérente des données accroît considérablement la visibilité des opérations et des performances, fournissant une compréhension plus fine et immédiate des systèmes. C'est pourquoi, elle facilite la prise de décisions en temps réel en fonction du contexte de l'usine (Alexopoulos et al., 2018 ; Bevilacqua et al., 2020). Cela conduit à une efficacité et une productivité accrues (Aazam et al., 2018). Les données recueillies sont mises en œuvre dans divers scénarios d'analyse de données en utilisant des techniques telles que l'exploration de données, la simulation et l'analyse visuelle (Filz et al., 2023).

Dans le contexte de la production, les algorithmes peuvent rapidement analyser d'importants ensembles de données. Ils peuvent identifier des tendances, anticiper les problèmes potentiels et suggérer des ajustements. Par exemple, la détection de modèles de dégradation ou d'inefficacité cachés dans les machines ou les processus de fabrication peut conduire à des décisions pertinentes et efficaces. Ces décisions peuvent inclure des replanifications performantes pour éviter la formation de goulets d'étranglement et minimiser les temps d'arrêt imprévus. La simulation permet également aux décideurs d'évaluer l'impact de différentes décisions sur le système.

La digitalisation permet aussi d'exploiter des outils d'analyse avancés tels que les tableaux de bord interactifs, les rapports personnalisés, et les visualisations graphiques. Ces outils visuels facilitent la compréhension des données complexes, contribuant à explorer les évolutions clés et de prendre des décisions précises en fonction d'une compréhension approfondie de la situation.

En synthèse, la digitalisation joue un rôle crucial en facilitant la collecte, l'analyse et l'utilisation des données, agissant ainsi comme un soutien efficace à la prise de décision. En libérant les décideurs des tâches opérationnelles répétitives, elle les oriente vers des responsabilités plus stratégiques et créatives au sein de l'entreprise. Ce qui entraîne une amélioration notable de l'efficacité et de la rapidité des décisions (Pinzone et al., 2017). Il a été avancé que les entreprises qui fondent leurs décisions stratégiques ou opérationnelles sur des données et l'analyse, plutôt que l'intuition et l'expérience obtiennent des performances supérieures (Colomabari et al., 2023). La digitalisation agit ainsi comme un puissant support à la prise de la bonne décision en transformant la collecte, l'analyse et l'utilisation des données pour une résolution performante des problèmes.

III.2.2. La digitalisation peut-elle aider à gérer les tensions entre centralisation et décentralisation de la prise de décision?

III.2.2.1 Centralisation de la prise de décision facilitée par la digitalisation

La digitalisation se positionne comme un levier essentiel pour la centralisation de la prise de décision en remodelant la gestion des données au sein des entreprises. Elle instaure un système d'entreprise unifié en connectant les données générales issues de l'ERP et les données d'exécution du Manufacturing Execution System (MES) (Helu et al., 2017), surmontant ainsi les limitations des systèmes informatiques de de centralisation qui, bien qu'indispensables, ne suffisent plus (Zhong, 2013).

Ce système unifié élimine les barrières des silos d'information, permettant une communication fluide entre les différents systèmes. La digitalisation facilite la collecte des données via des capteurs ou des interfaces utilisateur appropriés. Elle peut également traiter et agréger les données acquises.

Celles-ci peuvent ensuite être communiquées via le réseau (Klöber-Koch et al., 2017). Cette approche offre aux décideurs un accès à une source unique et complète d'information, provenant des employés, départements, clients, fournisseurs, etc. (Schniederjans et al., 2020). Par exemple, dans une entreprise manufacturière, les systèmes numériques peuvent recueillir des données en temps réel sur la disponibilité des matières premières, les performances des machines et les commandes en cours.

Cette centralisation des données crée un environnement propice à une coordination améliorée des opérations. Les décideurs bénéficient d'une représentation numérique de la réalité de toutes les facettes des opérations, simplifiant et renforçant la qualité des décisions prises au niveau central (Voigt et al. 2021). En tirant parti de ces données centralisées, les décideurs peuvent optimiser l'utilisation des ressources et ajuster les priorités de production de manière agile, garantissant ainsi le respect des objectifs stratégiques de l'entreprise. Toutefois, dans des environnements de production très variables, la centralisation totale peut entraver la flexibilité et la réactivité nécessaires pour s'adapter aux conditions changeantes et aux perturbations.

III.2.2.2 Décentralisation de la prise de décision soutenue par la digitalisation

La digitalisation soutient également la décentralisation de la prise de décision en fournissant aux acteurs locaux, tels que les responsables de lignes de production, les opérateurs, des données fiables en temps réel et les outils nécessaires pour prendre des décisions autonomes. Cette approche adoptée par de nombreuses organisations, permet des opérations indépendantes ainsi que des décisions autonomes par le biais de divers composants d'un système plutôt que d'un système centralisé, ce qui permet la flexibilité et l'adaptabilité (Gilchrist et al., 2016).

Avec la diffusion des technologies informatiques, la décentralisation et l'autonomie émergent comme des caractéristiques clés des futures usines intelligentes (Napoleone et al., 2020). La digitalisation favorise l'autonomie des employés et renforce leur implication dans l'amélioration continue des processus. Les opérateurs, équipés de données en temps réel, étant en contact encore plus direct avec les opérations, sont mieux positionnés pour ajuster les processus locaux pour optimiser la production et résoudre des problèmes opérationnels sans attendre des directives centrales (Colomabari et al., 2023). Cela peut conduire à une plus grande flexibilité opérationnelle, à une meilleure réactivité aux changements inattendus de la production, et à une amélioration continue plus dynamique. Cette approche s'aligne avec les principes du Lean Manufacturing, qui attribue un rôle central à l'implication des opérateurs dans le processus de prise de décision, facilitant ainsi la gestion de l'incertitude (Rossini et al., 2021).

Cette décentralisation présente des avantages significatifs, car les opérateurs n'interviennent que lorsqu'un problème survient, consacrant ainsi leur temps à des activités plus productives, améliorant l'efficacité globale de la réponse aux commandes individuelles et personnalisées (Tantik et al., 2017). Cependant, les décisions prises localement peuvent être incohérentes ou contradictoires avec les objectifs globaux de l'entreprise. Ce constat souligne l'importance d'une coordination entre les niveaux central et local pour éviter la fragmentation des efforts, les inefficacités opérationnelles et la perte de cohérence.

III.2.2.3 Rôle médiateur de la digitalisation pour résoudre les tensions entre la centralisation et la décentralisation de la prise de décision

La digitalisation agit alors comme un médiateur efficace pour résoudre les tensions entre la centralisation et la décentralisation de la prise de décision. En facilitant la collecte rapide et le partage transparent des données, elle élimine les obstacles à la communication entre les différentes unités décisionnelles, qu'elles soient centralisées ou décentralisées (Klöber-Koch et al., 2017). Cela élimine les retards liés à la transmission manuelle des informations, assurant ainsi que toutes les décisions

sont basées sur des informations actualisées et précises (Bevilacqua et al., 2020). Les outils de communication numériques et les plateformes collaboratives offrent un espace où les équipes dispersées géographiquement au sein du système de production peuvent travailler de manière cohérente, favorisant une prise de décision collective en encourageant la collaboration entre les équipes centralisées et décentralisées (Cifone et al., 2021).

Mais le partage de l'information permis par la digitalisation ne suffit pas à coordonner les décisions centralisées et les décisions locales. Ces décisions doivent converger vers un même objectif, la performance globale du système de production. Pour cela, les indicateurs de performance clés (Key Performance Indicator – KPI) jouent un rôle essentiel en mesurant la performance par rapport aux objectifs globaux, assurant l'alignement des décisions locales avec les objectifs centraux. Ils favorisent la transparence, en offrant une visibilité sur la performance à tous les niveaux, facilitant ainsi une communication cohérente et une compréhension mutuelle (heli, 2019). Les KPI servent de base à la prise de décision performante au niveau local, réduisant le risque de divergence avec les décisions centrales. En assurant un suivi de l'efficacité des processus locaux, les KPI permettent l'identification des axes de progrès, renforçant la responsabilisation et l'engagement envers les objectifs communs.

III.3. La digitalisation pour un séquencement centralisé

Le service de planification joue un rôle essentiel en établissant le planning de production à partir des objectifs stratégiques de l'entreprise, assurant ainsi l'alignement entre la demande des clients et la capacité de production du site. Les responsabilités principales de ce service englobent le séquencement de la production, le suivi de l'état d'avancement des opérations, et l'ajustement du séquencement en cas de perturbations.

Dans ce contexte, le planificateur est souvent confronté à des difficultés qui perturbent le processus de planification, entraînant le plus souvent une augmentation du lead time du produit et une diminution de la productivité. Actuellement, ces difficultés sont entre autres :

- Des données peu fiables et un suivi de production décalé du temps réel ;
- Un processus de planification et de séquencement de la production manuel ;
- Une communication fragmentée, où chaque service a une vision limitée à sa propre commande, sans visibilité globale sur l'ensemble de l'activité ;
- Une difficulté à maintenir une visibilité en temps réel sur l'état de la production.

Dans cette perspective, prendre le virage de la digitalisation est devenu clairement un objectif pour l'entreprise Manitowoc. Cette transformation numérique vise à améliorer le processus décisionnel de l'entreprise, en mettant l'accent sur l'amélioration de la qualité du séquencement centralisé et la prise de décision décentralisée et proactive.

Dans la suite de cette section, nous explorerons comment la collecte, l'analyse, et la centralisation des données peut être améliorée grâce à la digitalisation sur le site de Moulins. Par ailleurs, nous mettrons en lumière comment l'automatisation des processus récurrents peut contribuer à une gestion plus efficace et proactive. Enfin, nous aborderons les obstacles et les limites associés à un séquencement centralisé, et surtout à sa mise en application effective dans le système de production.

III.3.1. Collecte, analyse et centralisation des données pour un séquencement proactif

III.3.1.1 Contexte initial et vulnérabilités du processus de séquencement

Chez Manitowoc du site de Moulins, le processus de collecte et d'analyse des données pour la planification et le séquencement de la production est un processus manuel, réalisé par les salariés, chronophage et à l'origine d'erreurs. Cette façon de faire implique souvent une navigation entre

différents systèmes et documents pour rassembler les données pertinentes, créant ainsi des difficultés significatives pour la qualité du processus de prise de décision.

Premièrement, le planificateur doit collecter les informations nécessaires depuis le système ERP de l'entreprise « SAP », telles que la nomenclature de la commande, la date de livraison, le client, le mode de transport, etc. Ces informations sont ensuite consignées sur des cartes "T" (fiches cartonnées) disposées sur des panneaux dans le bureau du planificateur (Voir *Figure 38*). De plus, pour des données complémentaires non gérées dans l'ERP, telles que la couleur de chaque pièce, gérée dans des fichiers Excel, le planificateur doit les ressaisir manuellement sur des listes distinctes appelées « listes à servir » (Voir *Figure 38*) en vue d'une transmission ultérieure aux opérateurs.

Deuxièmement, le planificateur doit également récupérer les feuilles de suivi de l'état d'avancement de la production de la veille pour mettre à jour les cartes T affichées sur les panneaux de suivi (voir *Figure 38*). Cela implique souvent des retards dans la disponibilité des informations, car ce processus manuel prend du temps, compromettant la réactivité nécessaire à une prise de décision proactive.

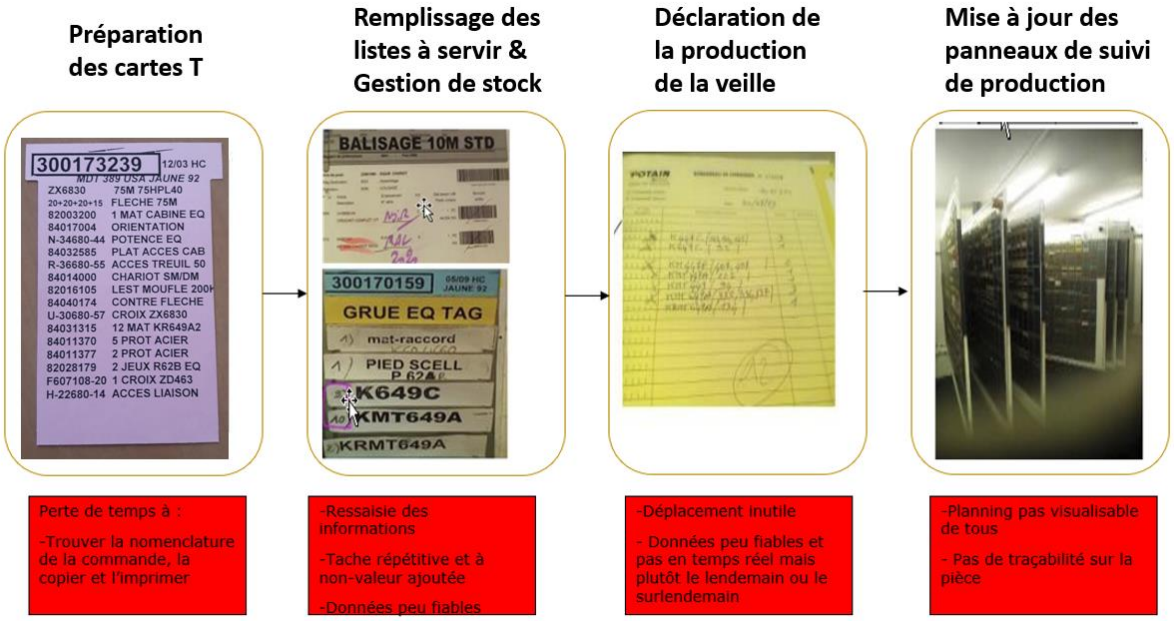


Figure 38 : Processus de collecte de données

Cette situation contraint le planificateur à consacrer une part significative de son temps, environ la moitié de sa journée de travail, exclusivement à la collecte d'informations. De plus, cette pratique complexifie le processus de planification et de prise de décision pour les raisons suivantes :

- La saisie manuelle des données expose le processus à des risques d'erreurs ;
- Les mises à jour manuelles limitent la disponibilité en temps réel des informations, entravant la capacité à obtenir une vue instantanée de l'état de la production. Cela réduit la capacité du planificateur à anticiper les problèmes potentiels, à identifier les opportunités d'optimisation et à ajuster le séquencement en conséquence ;
- Les inefficacités opérationnelles résultant du processus manuel réduisent l'efficacité globale du séquencement, impactant ainsi sa crédibilité et son respect par les utilisateurs.

La dispersion des données sur différents supports physiques et la nécessité de transmettre manuellement les informations aux opérateurs engendrent une communication fragmentée et un manque d'intégration. En effet, les informations nécessaires risquent de ne pas être transmises correctement à toutes les parties concernées. Cela génère des silos d'information non connectés. D'un côté, les opérateurs peuvent ne pas disposer de toutes les informations nécessaires à l'exécution de leurs tâches. D'un autre côté, le planificateur ne connait l'état d'avancement de la production en temps réel que si les personnes se déplacent jusqu'à son bureau.

III.3.1.2 Transition intégrale avec Easy Planning : Le rôle crucial de la digitalisation

Face à ce constat, le site de Moulins a souhaité digitaliser l'essentiel des informations devant circuler au sein du système de production. Le noyau de cette solution repose sur le développement d'un système unifié et automatisé nommé *Easy Planning*. Son objectif est de collecter et de centraliser les données opérationnelles venant de différentes sources (ERP, Excel) ainsi que les données de suivi du processus dans l'atelier (actuellement en version papier).

Tout d'abord, l'automatisation de la collecte dans *Easy planning* des données opérationnelles depuis l'ERP s'appuie sur l'utilisation d'interfaces de programmation d'applications (API). Ces API établissent des protocoles standardisés, permettant ainsi au système *Easy planning* de récupérer automatiquement des informations. Grâce à des requêtes automatisées, ces données sont extraites directement de l'ERP et d'autres sources telles que des applications spécialisées pour consulter les plans des pièces, des fichiers Excel, etc. Cette approche élimine toute saisie manuelle. Ce qui réduit significativement le risque d'erreurs. Elle génère également des gains de temps significatifs. La *Figure 39* illustre le processus d'automatisation de l'importation d'une commande dans *Easy Planning*, démontrant ainsi la réduction drastique du temps nécessaire, passant de trois heures à seulement dix-sept secondes.

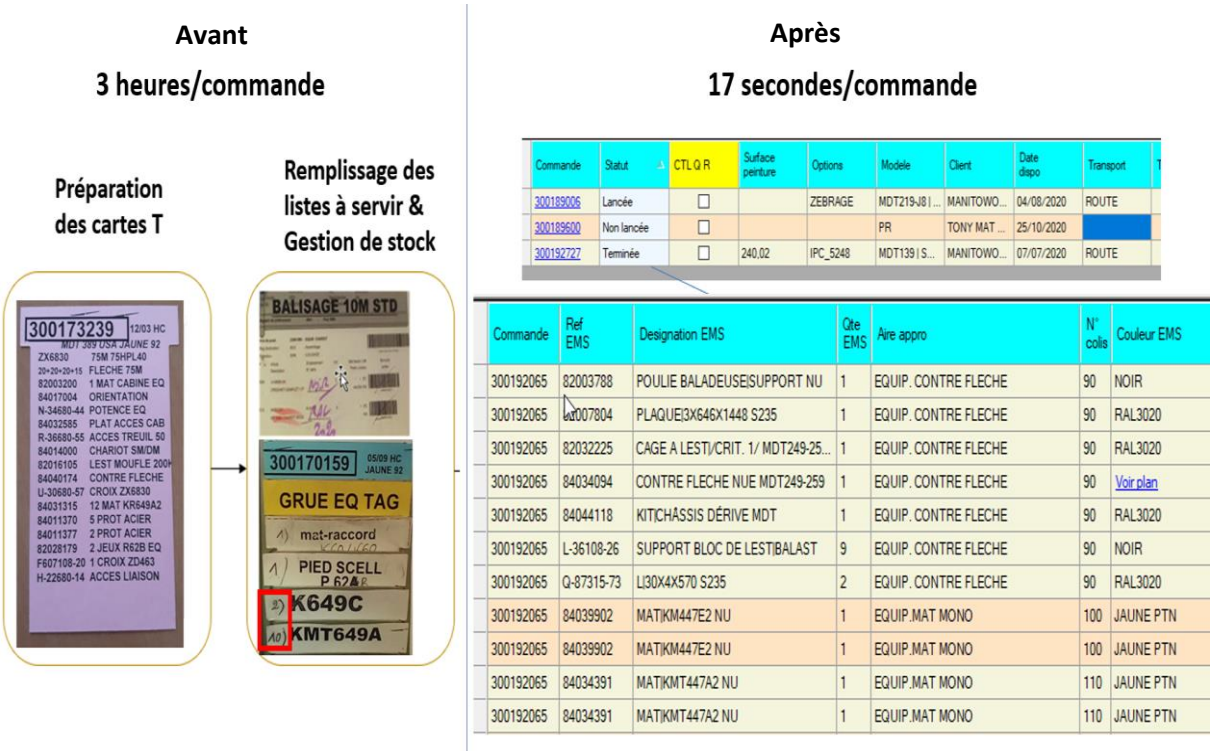


Figure 39 : Automatisation de l'importation d'une commande dans Easy Planning

D'autre part, pour automatiser la collecte des données en provenance de l'atelier, l'entreprise a décidé de déployer des capteurs IoT à des emplacements stratégiques. Ces capteurs enregistrent en temps réel des données fondamentales telles que la présence ou l'absence d'objets, les dates

d'événements, etc. Ces informations brutes servent ensuite de base, permettant au système Easy Planning de calculer des indicateurs plus sophistiqués, notamment le temps de cycle et les niveaux de stock en-cours, offrant ainsi une indication précise de l'état d'avancement de la production. Par exemple, un capteur positionné à la sortie de la cabine de peinture signale que la pièce est peinte et envoyée par le convoyeur à l'atelier suivant.

Là où l'installation de capteurs s'avère impossible, l'entreprise a équipé les opérateurs de tablettes et de PC. Ces dispositifs sont dotés d'interfaces utilisateur intuitives, spécialement développées pour permettre aux opérateurs d'interagir simplement avec le système central et de déclarer en temps réel l'état d'avancement de la production, ou des problèmes, avec un minimum de saisie. Par exemple si le pendeur ne peut pas respecter l'ordre donné par le séquenceur, il doit remonter le problème rencontré en glissant la pièce dans la case rouge (voir étape 1, *Figure 40*) et indiquer la nature du problème à l'aide d'un menu déroulant. Ces problèmes sont ensuite remontés automatiquement au planificateur (voir étape 2, *Figure 40*). L'objectif de cette démarche est de remonter les problèmes qui empêchent le respect du séquencement et les mettre en évidence sur un indicateur (voir étape 3, *Figure 40*). L'analyse Pareto de l'ensemble des problèmes rencontrés permet ensuite de lancer des chantiers d'amélioration continue.

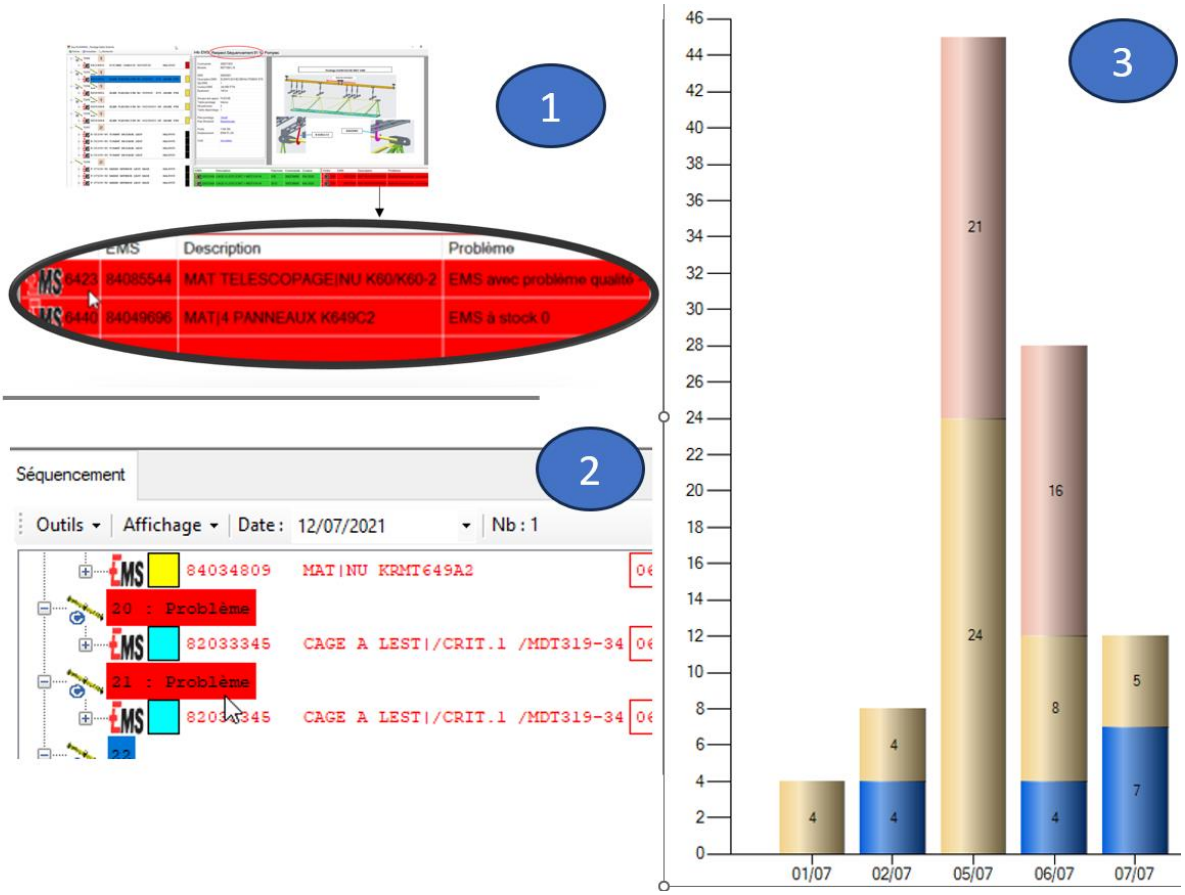


Figure 40 : Remontée des problèmes perturbant le séquencement

Les données issues de l'ERP et d'autres systèmes ainsi que du processus de production sont collectées et centralisées dans une base de données unique, limitant les risques de silos d'information

Easy Planning offre au planificateur des données de meilleure qualité et en temps réel, améliorant ainsi son processus de prise de décision. En effet, La disponibilité immédiate des informations permet au planificateur d'obtenir une vue en temps réel de l'état de la production. Cela favorise une plus

grande réactivité. En centralisant toutes les données pertinentes dans un emplacement unique, *Easy Planning* élimine les silos d'informations. Cette intégration favorise une communication fluide et une cohérence dans les informations partagées entre les différentes parties prenantes. Ces éléments combinés permettent de prendre des décisions plus éclairées et de favoriser un séquencement proactif pour une gestion plus agile et efficiente de la production.

III.3.2. Automatisation des processus récurrents, et utilisation d'algorithmes avancés

L'introduction de l'automatisation des processus et l'utilisation d'algorithmes avancés ont considérablement renforcé l'efficacité opérationnelle de l'entreprise. Un algorithme avancé est une méthode sophistiquée et optimisée pour résoudre des problèmes complexes. Contrairement aux algorithmes simples qui traitent des tâches basiques, les algorithmes avancés intègrent des concepts mathématiques et des techniques de calcul plus élaborées. Cette amélioration se manifeste particulièrement dans trois activités importantes du processus de décision :

- la gestion de la modification des commandes ;
- la fiabilisation des délais de livraison promis par les fournisseurs ;
- la facilitation de l'automatisation du séquencement.

III.3.2.1 Gestion de la modification des commandes

L'entreprise permet à ses clients de modifier leurs commandes, éventuellement dans la période figée, période où les modifications des commandes sont généralement non autorisées. Auparavant, le planificateur devait traiter ces modifications par le biais de communications par e-mail initiées par le département manufacturing, l'informant des modifications apportées à la commande. Ce processus implique une analyse manuelle détaillée de chaque commande. Le planificateur est alors engagé dans des tâches répétitives, ajustant manuellement les panneaux de suivi de production, ajoutant, modifiant ou supprimant des cartes "T". Ensuite, il doit se déplacer physiquement dans l'atelier pour mettre à jour les instructions opérationnelles (listes à servir), assurant ainsi que les opérateurs sont informés des changements.

Après le déploiement d'*Easy Planning* et l'intégration d'algorithmes avancés, le planificateur est désormais libéré de ces tâches répétitives. L'algorithme personnalisé développé en interne implique l'incorporation de méthodes sophistiquées dans le système, permettant une automatisation optimale de gestion des commandes.

Dans ce contexte, le processus de modification de commande se déclenche automatiquement en réponse aux demandes des clients. L'algorithme développé analyse rapidement les changements nécessaires et met à jour les informations de manière instantanée, éliminant ainsi la nécessité d'interventions manuelles du planificateur. La *Figure 41* illustre un exemple d'annulation de deux EMS (lignes barrées sur la figure). Ce cas concret met en évidence la capacité du système à gérer les modifications de commande de manière claire et transparente. Il offre également une traçabilité détaillée de la date à laquelle la modification de la commande a été effectuée, assurant une gestion précise et documentée des changements opérés au fil du temps.

Commande	Ref EMS	Designation EMS	Qte EMS	Aire appro	N° colis	Couleur EMS	Date souhaitee
300291680	82025102	PIED C.FLECHE|MD560B / CRIT. 1	1	EQUIP. CONTRE ...	180	MANITOWOC	29/11/2023
300291680	82010247	PIVOT FIXE|STD KR830	1	MONTAGE ORIEN...	200	MANITOWOC	29/11/2023
300291680	82015791	SUPPORT POMPE GRAISSAGE	1	MONTAGE ORIEN...	200	MANITOWOC	29/11/2023
300291680	84112531	PIVOT TOURNANT NU / MD569-689	1	MONTAGE ORIEN...	200	MANITOWOC	29/11/2023
300291680	84115207	SUPPORT|CAISSE RESISTANCE	1	MONTAGE ORIEN...	200	MANITOWOC	29/11/2023
300291680	84029085	MAT NU|KRMT849C2	1	EQUIP. MATS	210	MANITOWOC	29/11/2023
300291680	T-61442-60	TRAVERSE COLISAGE ORIENT MD48...	2	EQUIP. MATS	220	MANITOWOC	29/11/2023
300291680	84083450	MAT TELESCOPAGE NU|K84/K84-2	1	EQUIP. MATS	220	MANITOWOC	29/11/2023
300291680	84073566	MAT NU|K85/KR84R2	1	EQUIP. MATS	240	MANITOWOC	29/11/2023
300291680	84060858	[illegible]	1	EQUIP. MATS	250	MANITOWOC	29/11/2023

OF supprimé (pas de réaffectation à faire) le 31/10/2023

Figure 41 : Modification des commandes

L'algorithme ne se contente pas seulement de mettre à jour les informations, mais il va au-delà en offrant des suggestions pertinentes au planificateur pour optimiser davantage la gestion des modifications de commandes. Par exemple, en cas d'annulation d'un élément déjà fabriqué, l'algorithme propose des alternatives en suggérant une réaffectation à une commande similaire.

Cette automatisation élimine les erreurs humaines, assure une réactivité immédiate et réduit les gaspillages associés aux modifications manquées ou mal exécutées. Cela permet d'optimiser de manière significative le processus global de gestion des commandes.

III.3.2.2 Fiabilisation des délais de livraison promis par les fournisseurs

Auparavant, une réunion quotidienne entre le planificateur et les approvisionneurs visait à renforcer la fiabilité des promesses de livraisons. Le planificateur se base sur ces informations pour planifier la production et établir le séquencement de la production.

Cependant, un problème majeur persiste, et il réside dans le fait que le planificateur se retrouve souvent à élaborer un séquencement difficile à réaliser en raison de la non-disponibilité des EMS au moment prévu. Ce problème découle principalement du manque de fiabilité des promesses de livraison, en partie dû au fait qu'elles étaient uniquement visibles sur les cartes « T ». Cette limitation engendre des complications pour le planificateur sans que les approvisionneurs ne soient directement impliqués dans le processus.

Les approvisionneurs ne remontent malheureusement pas systématiquement l'information des modifications de dates au planificateur, qui ne peut pas ajuster le séquencement en conséquence. Cela crée une divergence entre le plan établi lors de la réunion et la situation réelle, conduisant potentiellement à un séquencement irréalisable.

Pour résoudre ce problème, Easy Planning propose un accès direct pour les approvisionneurs, leur permettant de visualiser la date de livraison souhaitée de l'EMS et facilitant la remontée des informations sur les dates prévisionnelles de mise à disposition (voir *Figure 42*). Ainsi un système de suivi des délais de livraison et des mises à jour est mis en place (voir *Figure 42*), intégrant des workflows automatiques. Ces workflows agissent comme des rappels pour les approvisionneurs, les informant des EMS prévus pour la livraison et les incitant également à agir pour ceux nécessitant une date prévisionnelle, comme illustré sur la *Figure 43*.

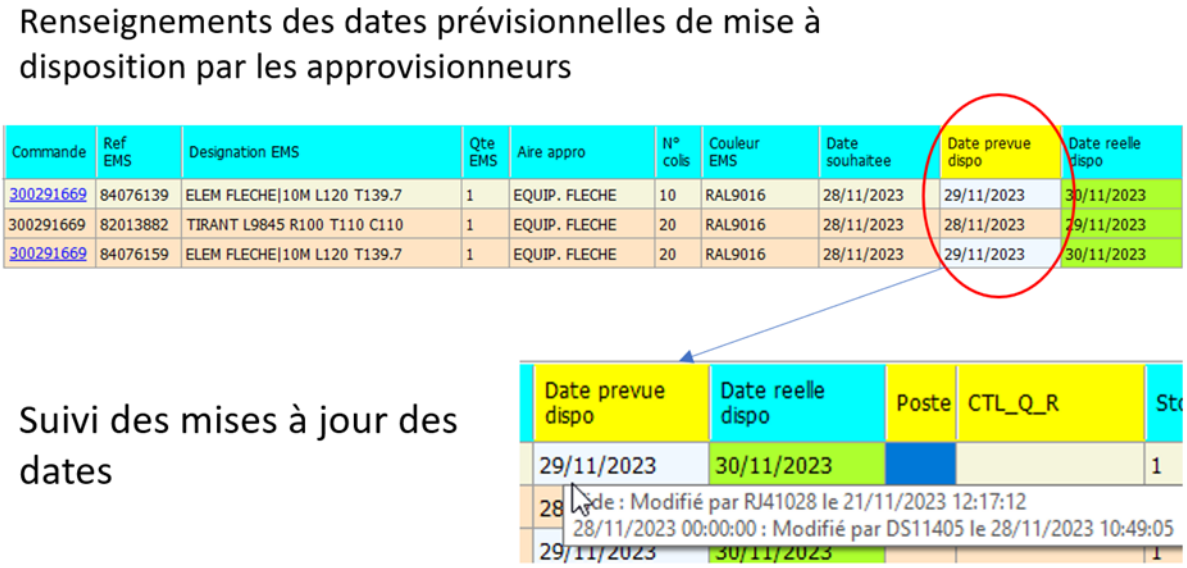


Figure 42 : Fiabilisation des délais de livraison



Figure 43 : Relance automatique pour les approvisionneurs

En cas de report de la date prévisionnelle de livraison, le système analyse automatiquement si l'EMS concerné est déjà séquencé pour le pendage, alertant le planificateur sur les EMS qui seront disponibles trop tard pour le pendage, afin qu'il ajuste son séquencement en conséquence (voir *Figure 44*). Cette réactivité accrue permet d'aligner le séquencement sur la réalité opérationnelle.

Easy PLANNING **Anomalies**

E EasyPlanning
À [redacted]

EMS disponible trop tard pour le pendage :
- 300263486 * 84102770 * MAT|4 PANNEAUX KR849A * 130
- 300263486 * 84102770 * MAT|4 PANNEAUX KR849A * 130
- 300263486 * 84102770 * MAT|4 PANNEAUX KR849A * 130
- 300263486 * 84102770 * MAT|4 PANNEAUX KR849A * 130
- 300280844 * 84028244 * MAT NU|KRMT849A2 * 150
- 300291257 * 84081730 * MAT RACCORD|K80/KR60-2 NU * 280

Figure 44 : Alerte sur les retards de livraison

Par ailleurs, des indicateurs de taux de respect des délais de livraison sont instaurés (voir *Figure 45*). Ces indicateurs, calculés automatiquement, peuvent être intégrés, par la direction de l'entreprise, dans les objectifs annuels de chaque approvisionneur ou service fournisseur. Ceci vise à stimuler la responsabilisation de la part des opérationnels. En combinant ces initiatives, l'entreprise cherche à synchroniser de manière plus efficace les délais de livraison avec le séquencement, réduisant ainsi les écarts entre la planification prévisionnelle et l'exécution opérationnelle.

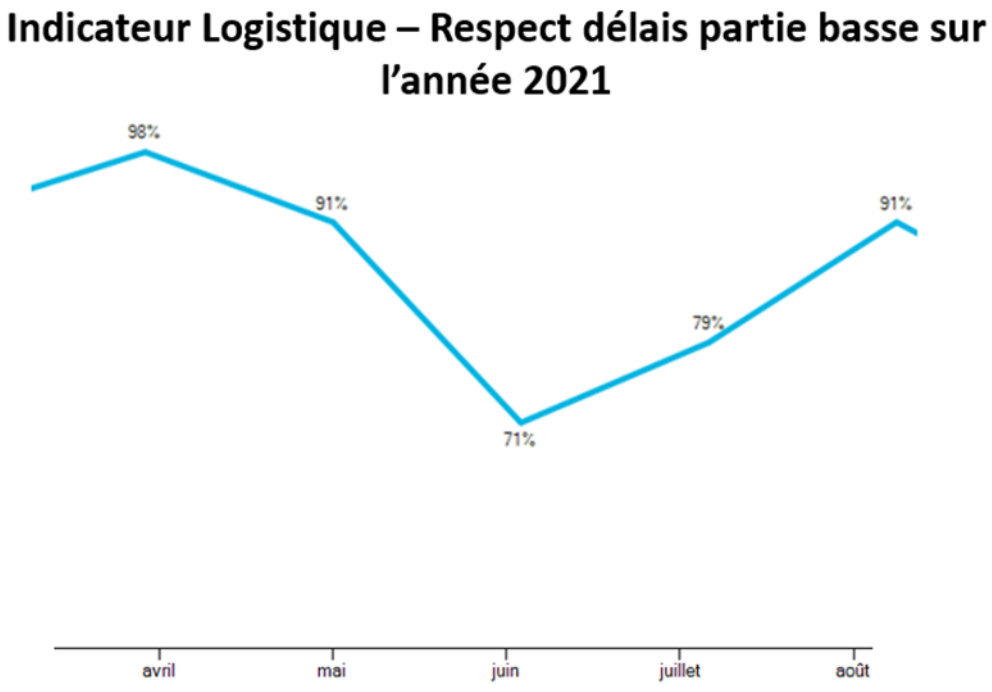


Figure 45 : Taux de respect des délais de livraison

III.3.2.3 Faciliter l'automatisation du séquencement

Le processus de séquencement actuel repose sur une approche manuelle où le planificateur se fie à son expérience et à son intuition pour établir le séquencement prévisionnel des pièces. Il tente de prendre en compte des objectifs conflictuels tels que le respect de l'ordre du montage, la réduction du nombre de purges en peinture. Cette approche manuelle, du fait de la complexité du problème, ne

permet pas de prendre en compte efficacement ces objectifs contradictoires. La nécessité de mettre en place un outil d'optimisation pour aider à la prise de décision est apparue.

La digitalisation fournit les fondations nécessaires pour l'automatisation du séquencement :

- en facilitant la collecte, le traitement et l'analyse des données opérationnelles ;
- en créant un environnement numérique où les algorithmes d'optimisation peuvent opérer de manière efficace et dynamique.

Notre approche se concentre sur l'intégration d'une brique d'optimisation au sein d'*Easy Planning*, fournissant ainsi un outil d'aide à la décision. Les détails sur les méthodes seront exposés de manière exhaustive dans le chapitre 4 : Etude heuristique empirique pour le problème de séquencement d'un flowshop hybride.

III.3.3. Les obstacles et les limites associés au séquencement centralisé

Même si la digitalisation, par le biais d'*Easy Planning*, permet d'envisager une bonne optimisation du séquencement, son efficacité demeure limitée dans notre contexte pour plusieurs raisons. Parmi elles, trois sont décrites dans les sous-sections suivantes : certaines caractéristiques des palonniers, la structure de l'atelier de peinture, et les considérations de logistique interne et externe.

III.3.3.1 La non-flexibilité de certains palonniers

C'est le cas, lorsqu'un palonnier non flexible (dédié au pendage d'une pièce particulière) se présente au poste de pendage et ne correspond pas à la pièce à pendre. L'exécution du séquencement prévisionnel, nécessitera l'envoi de palonnier à vide et l'attente de la réception du palonnier correspondant, ce qui donne des résultats généralement loin d'être optimaux.

III.3.3.2 La présence de deux lignes de peinture

Il existe également une difficulté majeure lié à la présence de deux lignes de peinture ayant des caractéristiques différentes de taille et de vitesse. Ces différences introduisent des complexités majeures, notamment des contraintes de capacité inégales entre les lignes, compliquant ainsi la gestion équilibrée de la production. De plus les opérations manuelles impliquées dans le processus peinture ajoutent une couche de complexité supplémentaire. La variabilité dans la durée de ces opérations est difficile à anticiper et à intégrer de manière efficace dans le séquencement centralisé. L'absence d'un opérateur, par nature imprévisible, impacte directement la vitesse d'écoulement du flux de la ligne de peinture concernée.

III.3.3.3 Les Perturbations quotidiennes et imprévues

Il arrive souvent que :

- la monopolisation imprévue de la grue pour décharger un camion fournisseur qui se présente, la rende indisponible pour approcher une pièce de la table de pendage, est une situation quotidienne que le séquencement centralisé ne peut pas anticiper ;
- les pièces soient indisponibles au moment opportun par suite de panne machine, de problèmes qualité, de retard de livraison, etc.

Ces conditions créent des perturbations dans la planification, compromettant la disponibilité des ressources nécessaires à l'exécution du séquencement établi. En conséquence, l'exécution du séquencement centralisé devient irréalisable.

III.3.3.4 Gestion des perturbations opérationnelles : Les limites de l'approche de reséquencemment

La nécessité de reséquencer apporte les corrections nécessaires au programme de séquencement en cas d'aléas. Cependant, cette approche, qui implique l'arrêt du système lors de la détection d'une

perturbation, la remontée de l'information au planificateur pour décider de la réaction appropriée et la génération d'un nouveau séquencement (bien que potentiellement considérée comme une solution pour assurer une optimisation globale), présente des limitations pratiques. Celles-ci se manifestent notamment dans un contexte où le planificateur opère sur un cycle de travail de 8 heures alors que l'atelier fonctionne en trois équipes de 8 heures chacune, rendant cette approche difficilement envisageable.

Face à ces limites, l'adoption d'approches flexibles et réactives, pour la prise de décision en temps réel, devient impérative. Cela permet d'ajuster le séquencement en fonction d'événements imprévus, optimisant ainsi l'utilisation des ressources disponibles dans des conditions opérationnelles changeantes.

III.4. La digitalisation pour un séquencement décentralisé dans un environnement compatible avec le modèle Lean

Au sein de l'entreprise Manitowoc, l'adoption d'un séquencement entièrement centralisé n'est pas facilitée par la complexité opérationnelle qui est caractérisée par des paramètres variés tels que :

- une grande diversité de produits ;
- des spécificités propres à chaque poste de travail ;
- une production à la commande ne permettant pas de séquencer sur stock.

Les aléas de production pourraient entraîner une saturation du système de prise de décision centralisé, compromettant ainsi sa réactivité en temps réel.

Compte tenu de ces contraintes, l'entreprise avait privilégié une approche décentralisée dans l'exécution du séquencement centralisé. L'idée sous-jacente consiste à mettre en place un séquencement centralisé, que l'on s'efforce de suivre au mieux. Cependant, cette approche autorise également des initiatives locales lorsque les conditions ne permettent pas de respecter rigoureusement le séquencement, offrant ainsi une flexibilité nécessaire pour faire face aux aléas opérationnels rencontrés.

Aujourd'hui, les opérateurs se voient confier quotidiennement un séquencement de la production pour la journée, sous format papier. Ce séquencement couvre les trois postes de travail, l'entreprise travaillant en continue sur 24 heures. Les opérateurs ont toutefois une liberté de choix dans leurs décisions pour adapter le séquencement aux spécificités locales et aux contraintes de chaque poste.

Cependant, cette approche décentralisée présente des inconvénients. L'absence de vision globale du système de production constitue une problématique majeure. Les opérateurs peuvent effectivement privilégier leurs objectifs locaux sans nécessairement prendre en compte les répercussions sur l'efficacité globale de la chaîne de production. Cela peut créer un risque de sous-optimisation à l'échelle de l'usine, chaque opérateur prenant des décisions individuelles qui ne contribuent pas aux objectifs globaux.

Les prochaines sections de cette partie exploreront en détail les avantages et les risques liés à cette approche décentralisée dans le contexte spécifique du site de Moulins.

III.4.1. Les avantages d'un séquencement décentralisé

Au sein de l'entreprise, la rigidité du système de convoyeur impose des contraintes importantes en matière de flexibilité. Néanmoins, des possibilités de flexibilité peuvent apparaitre au niveau de deux postes de travail, les postes de pendage et l'atelier de peinture :

- Le pendage est déterminant dans le respect du séquencement. Il est responsable de l'alimentation du convoyeur et dessert l'ensemble de la chaîne de production. Il influe donc directement sur le séquencement transmis par le planificateur.
- Les peintres bénéficient également d'une certaine marge de manœuvre au niveau de l'aiguillage desservant les deux lignes de peinture. Il leur permet d'orienter les palonniers dans la cabine de peinture la plus adéquate, mais cela peut perturber le séquencement prévisionnel.

Ces lieux de flexibilité offrent des opportunités d'adaptation, même si c'est au détriment du respect du séquencement. Ces décisions locales présentent divers avantages que nous détaillerons ci-dessous.

III.4.1.1 Gestion décentralisée au niveau du pendage :

La décentralisation de la prise de décision confère une réactivité accrue aux opérateurs face aux imprévus locaux. Par exemple, c'est le cas lorsque la grue nécessaire pour approcher la pièce demandée au pendage est indisponible. Dans ce cas, le pendeur peut prendre la décision de pendre un EMS disponible, même s'il est placé plus loin dans la séquence prévisionnelle. C'est aussi le cas s'il détecte un problème de qualité sur la pièce demandée. Le pendeur peut alors rapidement informer du problème et ajuster le séquencement en explorant d'autres EMS de la séquence prévisionnelle.

Cette flexibilité permet d'apporter des solutions rapides aux problèmes locaux, assurant ainsi une gestion agile des ressources et évitant des temps d'arrêt inutiles. En prenant des décisions rapides et adaptées, le pendeur peut maintenir la fluidité de la production et garantir un flux continu des pièces pour l'ensemble de la chaîne.

D'un autre côté, l'approche décentralisée permet aussi aux opérateurs d'adapter le séquencement en fonction des particularités et contraintes de leur poste de travail. Cela peut améliorer l'ergonomie et augmenter la productivité.

Par exemple, le pendeur peut adapter le séquencement pour optimiser ses déplacements, et ainsi réduire sa fatigue, créant des conditions de travail plus favorables. Pour cela, les pendeurs peuvent sélectionner, dans le séquencement, la pièce la mieux adaptée à la configuration du palonnier qui se présente au poste. Cela évite un changement de série, c'est-à-dire l'enlèvement des supports inutiles présents sur le palonnier, et la pose des nouveaux supports nécessaires. Cette pratique non seulement réduit les contraintes physiques mais également améliore le confort au travail, entraînant une augmentation significative de la productivité du poste.

III.4.1.2 Gestion décentralisée au niveau de l'atelier de peinture :

D'une part, les peintres ont la liberté de choix quant à l'affectation des pièces sur chacune des deux cabines de peinture. Cette flexibilité permet une répartition équilibrée des tâches entre les peintres. Cela évite ainsi les surcharges ou les périodes d'inactivité. En donnant aux peintres la possibilité d'affecter les pièces de manière adaptée, l'approche décentralisée contribue à une utilisation plus efficace des ressources humaines et à une optimisation de la productivité.

D'autre part, le choix de la cabine de peinture offre au peintre la possibilité d'affecter les pièces de manière à regrouper celles ayant la même couleur. Cela minimise ainsi le nombre de purges nécessaires lorsqu'on enchaine des EMS de couleurs différentes. Cette approche permet non seulement de minimiser les interruptions dans le processus de peinture mais aussi de réduire les coûts liés à la perte de matière, renforçant ainsi la rentabilité de l'ensemble du processus de peinture.

III.4.2. Les risques potentiels des décisions décentralisées

Comme nous l'avons vu plus haut, les décisions décentralisées présentent des avantages. Mais elles ne sont pas exemptes de risques. Deux de ces risques sont présentés ensuite. Il s'agit du manque de coordination entre les étapes du processus et de la baisse de performance globale de l'entreprise.

III.4.2.1 Manque de coordination globale

Le défaut de coordination globale représente un risque significatif lié aux décisions décentralisées, surtout dans un environnement où les postes de travail sont interdépendants. Chaque poste peut privilégier ses propres objectifs et ses adaptations en fonction de ses contraintes, sans mesurer les répercussions de leur choix sur les postes en aval. Ceci est de nature à compromettre le travail des postes en aval et génère l'inefficacité globale de la chaîne de production.

Par exemple, les décisions prises par les pendeurs en vue de réduire leurs contraintes peuvent entraîner des conséquences importantes sur les postes en aval :

- **Grenaillage** : L'envoi successif de pièces complexes (avec un temps de cycle de grenaillage supérieur au *takt time*), peut créer un goulet d'étranglement, engendrant le blocage pour du poste amont (pendage), et des périodes d'inactivité pour le poste aval (peinture).
- **Peinture** : Cette optimisation locale peut se traduire par une gestion inefficace en peinture, en générant potentiellement un nombre excessif de purge par rapport à ce qui était prévu par le séquencement centralisé initial.
- **Montage** : Recevoir les pièces dans un ordre différent de l'ordre de montage, engendre une augmentation des manipulations et des risques associés, et une baisse d'efficience.

Les postes de travail, avec une vision limitée restreinte à leurs tâches spécifiques, sans vue globale de l'ensemble du système, peuvent prendre des décisions décentralisées qui peuvent potentiellement entraîner des arrêts de production à certains postes, des déséquilibres, des goulets d'étranglement, voire des interruptions du flux de production.

III.4.2.2 Risque de sous-optimisation globale

En acceptant une optimisation locale dans la prise de décision, il existe un risque que l'entreprise ne parvienne pas à atteindre une efficacité satisfaisante à l'échelle globale. Les décisions prises localement peuvent ne pas contribuer de manière positive aux objectifs généraux de l'entreprise.

Bien que l'approche décentralisée offre des avantages en termes d'adaptabilité, de réactivité, d'amélioration des conditions de travail, elle nécessite d'être réfléchie pour éviter les risques que nous venons d'évoquer. Il est important de noter que la décentralisation doit être équilibrée entre la nécessité de coordonner les activités pour optimiser l'ensemble du processus et pour donner aux acteurs locaux des marges de manœuvre nécessaire à la bonne exécution de leurs activités.

L'objectif est donc de trouver un juste équilibre entre une centralisation, qui offre une vision globale et une optimisation du fonctionnement général de l'entreprise, et une décentralisation qui permet une adaptation agile aux particularités locales et à la prise en compte d'incertitudes.

III.5. La mise en œuvre d'un outil permettant de combiner les avantages de la centralisation et de la décentralisation pour un bon équilibre du respect du séquencement.

Face aux limites des approches centralisées et décentralisées explorées dans les parties 2 et 3, les industriels explorent de plus en plus une troisième voie. Il s'agit d'intégrer des architectures de séquencement combinant des mécanismes centralisés pour maintenir la cohérence et la vision d'ensemble, et des mécanismes décentralisés, pour garantir la flexibilité et la réactivité. Dans cette

nouvelle approche, le séquencement reste la décision centralisée qui va garantir une optimisation globale du système. Néanmoins, en cas d'aléas, un mode décentralisé de prise de décisions peut s'imposer. Pour ce dernier, les décisions sont prises en temps réel, remettant en cause les décisions planifiées au niveau central, avec pour objectif de revenir rapidement à l'application des décisions prises par le mode centralisé, dès que les conditions le permettent. Cette transition dynamique entre des approches centralisées et décentralisées vise à assurer une flexibilité opérationnelle tout en préservant la stabilité du processus global de séquencement. Tout l'enjeu pour les industriels réside donc dans une réponse efficace à la question suivante : « ***comment concilier ces deux approches en apparence divergentes ?*** »

La digitalisation se présente comme un des leviers, offrant des outils et technologies permettant d'intégrer au mieux les approches centralisées et décentralisées. Le travail de recherche que nous avons mené chez l'entreprise Manitowoc illustre cette quête d'équilibre, par la façon dont le site de Moulins a tiré profit de la digitalisation afin d'exploiter les avantages de chaque approche de pilotage, favorisant la complémentarité entre celles-ci plutôt qu'en les opposant.

Dans la suite de cette partie, nous explorons, d'abord, les actions mises en place chez Manitowoc pour garantir le bon respect du séquencement centralisé. Ensuite, nous montrerons comment l'entreprise accompagne les opérateurs dans la prise de bonnes décisions, en temps réel, lorsque cela est nécessaire ou pertinent, préservant ainsi l'efficacité opérationnelle et la qualité du produit. Enfin, l'impact de la digitalisation sur l'efficacité de l'atelier de montage est également mesuré afin d'offrir une vision complète de la transformation opérée par Manitowoc dans le pilotage de son système de production.

III.5.1. Comment s'assurer que le séquencement centralisé soit bien respecté ?

III.5.1.1 Réduire le champ de visibilité des pendeurs

Aujourd'hui, Le service planning de l'entreprise fournit aux pendeurs un séquencement centralisé sous format papier. Il couvre les activités des trois équipes (matin, après midi et nuit) et comprend environ 150 EMS à pendre, dans un ordre bien défini. Dans la pratique, ce séquencement diverge régulièrement du séquencement initial. En effet, les pendeurs privilégient souvent leurs priorités locales en choisissant dans le séquencement les pièces les plus faciles à pendre (celles s'adaptant le mieux à la configuration du palonnier qui se présente) ou plus proches (celles qui sont stockées au plus près du poste de pendage), même lorsque celles-ci sont séquencées plus tardivement. Cette approche perturbe le séquencement établi et crée des dysfonctionnements pour les postes avals, notamment le montage.

La digitalisation a permis de supprimer ce séquencement papier, et affiche la liste des EMS à pendre sur des écrans. L'entreprise Manitowoc a d'abord tenté de restreindre la visibilité des pendeurs à un horizon de 50 pièces (soit environ un poste de travail), un chiffre qui fut ensuite réduit au fur et à mesure. Cette approche limite la vision sur les pièces à pendre à un horizon temporel de plus en plus court, et réduit aussi les risques d'erreurs et d'omissions. Les opérateurs ne peuvent que se concentrer sur le séquencement court terme sans être perturbés par la vision de l'ensemble de la journée.

La limitation de la visibilité sur la séquence constitue également une barrière contre des choix arbitraires, basés sur des préférences individuelles ou les priorités locales des opérateurs, et contribue à assurer une exécution plus cohérente et alignée avec les objectifs de production.

De plus, cette réduction de l'horizon incite, voire oblige, les opérateurs à agir de manière plus réactive face aux imprévus locaux. En cas de problèmes avec une pièce spécifique ou d'indisponibilité d'une ressource nécessaire à leur pendage, les pendeurs doivent remonter - voire régler - rapidement

le problème pour pouvoir coller au séquencement. Cela contribue à réduire les temps d'arrêt inutiles et à assurer un flux continu des pièces dans l'ensemble de la chaîne de production.

III.5.1.2 Comment un KPI en temps réel assure le respect du séquencement global

Chez Manitowoc, le non-respect du séquencement par les opérateurs de pendage représente un défi majeur. Il compromet l'efficacité globale du processus de production. L'absence de digitalisation a longtemps empêché l'entreprise de contrôler en temps réel le respect du séquencement et de mesurer précisément l'écart entre le séquencement prévisionnel et le séquencement réellement exécuté.

Dans le cadre d'une étude de terrain, nous avons pu réaliser une observation indirecte (sur la base des fichiers de suivi remontés de la production), sur une semaine, pour évaluer à postériori l'écart entre les séquencements prévisionnels et réels. Les résultats ont révélé des taux de respect du séquencement faibles, variant de 43% à 48% (voir *Tableau 8*).

Face à ce constat, nous avons décidé de réaliser une observation directe sur le terrain également sur une semaine. Pour cela, l'observateur a étudié le travail des pendeurs sur leurs postes, afin de comprendre les problèmes qui entravaient le respect du séquencement, que l'observation indirecte ne pouvait pas fournir. Cette observation directe a mis en lumière le fait que, malgré les obstacles entravant le respect du séquencement tels que les retards de livraison, les problèmes de qualité et l'indisponibilité des ressources nécessaires, les trois équipes de pendage étaient en mesure d'atteindre un taux de respect de la séquence de 90% (voir *Tableau 8*). L'analyse de l'écart entre les résultats obtenus (45% via une observation indirecte vs 90% via une observation directe) montre que les pendeurs ajustent leur façon de travailler lorsqu'ils sont observés, un phénomène connu sous le nom ***d'effet Hawthorne*** (Holguin et al.,2023). Cela montre également qu'ils sont en capacité de respecter la séquence prévisionnelle, et ce quel que soit l'ancienneté et l'expérience des opérateurs.

Tableau 8 : Taux de Respect du Séquencement : Observation Indirecte vs Directe chez Manitowoc.

			Taux de respect du séquencement	
Equipe	**Age**	**Expérience**	**Observation indirecte**	**Observation directe**
A	**45-50**	**13 ans**	**44%**	**90%**
B	**45-50**	**10 ans**	**43%**	**93%**
C	**-30**	**1.5 ans**	**48%**	**90%**

Initialement, les pendeurs étaient jugés sur le nombre de palonniers envoyés sur le convoyeur. Face à ces observations, l'entreprise a décidé de mettre en place un indicateur analysant en temps réel la qualité des décisions prises par les opérateurs, et mesurant le taux de respect de la séquence.

L'indicateur du taux de respect du séquencement est maintenant affiché en continu sur l'écran de travail de l'opérateur (Voir *Figure 46*), afin qu'il soit un indicateur de pilotage de leur activité. Celui-ci offre de nombreux avantages :

- **Auto-évaluation continue** : En fournissant en temps réel le KPI mesurant le respect du séquencement, chaque opérateur peut surveiller sa performance et ajuster son comportement selon les objectifs de l'entreprise. Cela encourage la conformité aux procédures et l'amélioration de la performance.
- **Feedback immédiat** : Le KPI en temps réel offre un feedback immédiat sur la conformité au séquencement. Si un opérateur s'écarte du séquencement, il recevra rapidement une notification ou une alerte de son superviseur, l'incitant à corriger son action en temps réel, prévenant ainsi les déviations prolongées.

- **Responsabilisation et implication des pendeurs :** La transparence des données encourage la responsabilisation, montrant comment les actions contribuent au respect global du séquencement. Cela crée une responsabilité individuelle vis-à-vis de l'efficacité globale.
- **Récompenses et reconnaissances :** Cet indicateur sert désormais de critère essentiel dans l'évaluation des performances individuelles lors des entretiens annuels. Les augmentations individuelles liées à la performance mesurée, couplées à la reconnaissance des efforts visant à maintenir un haut niveau de respect du séquencement, contribuent à instaurer une culture de l'excellence opérationnelle au sein de l'entreprise.
- **Défi :** Cet indicateur créé une émulsion saine entre les équipes qui tire les résultats vers le haut.

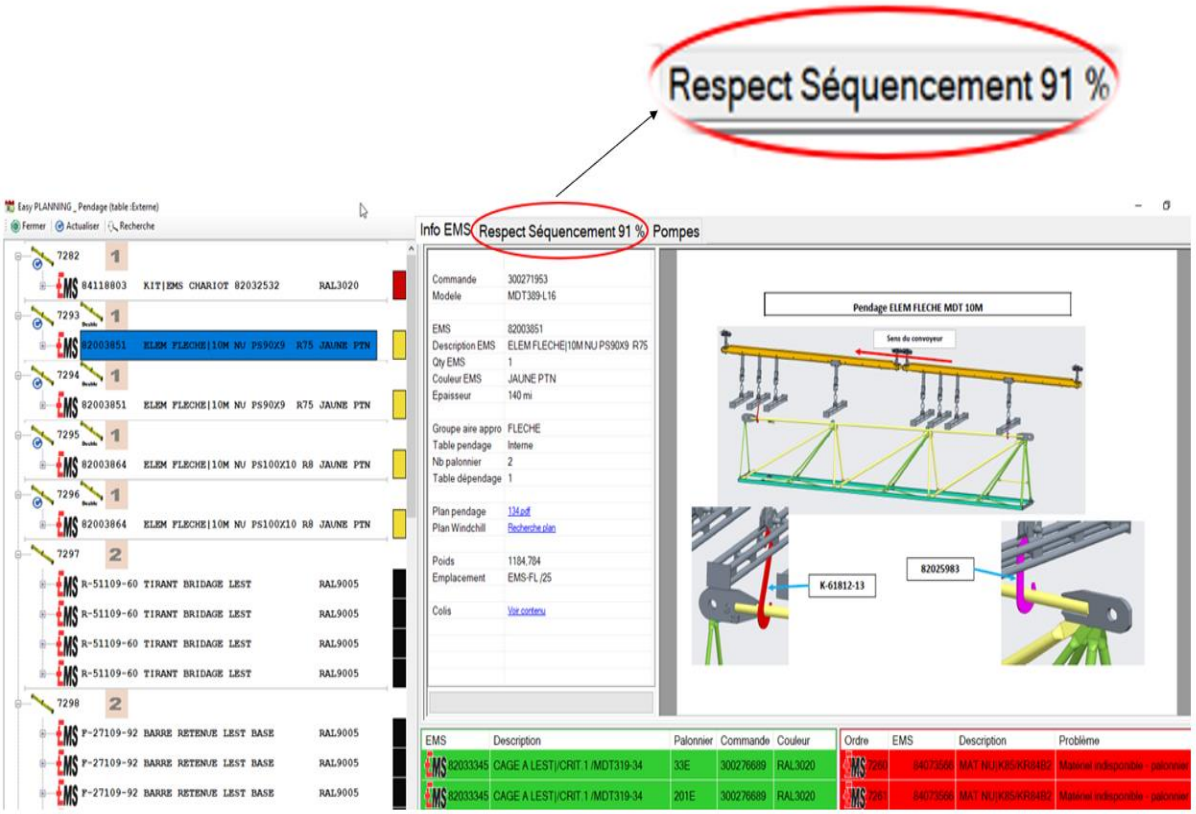


Figure 46 : Taux de respect du séquencement

La mise en place de cet indicateur a conduit à un taux moyen annuel de respect de 88%, en 2023, démontrant son impact essentiel sur l'alignement des opérations avec les objectifs de l'entreprise en termes de séquencement de la production.

III.5.2. Comment aider les opérateurs à prendre les bonnes décisions et à mieux effectuer leur travail ?

III.5.2.1 Vers une décision décentralisée éclairée : Intégration d'un KPI évaluant l'impact des décisions locales sur les performances globales

Bien que Manitowoc incite les opérateurs à suivre autant que possible le séquencement établi au niveau central, l'entreprise a aussi conscience du fait que ce planning n'est que théorique et qu'il est soumis aux aléas quotidiens, il devra souvent être adapté.

Il devient alors nécessaire d'évaluer également l'impact des décisions locales sur les performances globales au moyen de KPI dédiés. Cette approche reconnaît pleinement la capacité des opérateurs à

prendre des décisions adaptées au contexte, en tenant compte des contraintes locales et en étant plus réactifs face aux aléas de production.

Manitowoc a mis en place un ensemble d'indicateurs qui se calcule en temps réel. Ces indicateurs offrent aux opérateurs une vision holistique, procurant une compréhension approfondie de l'impact de leurs décisions et des répercussions en aval de leurs actions, au-delà de leurs contraintes propres.

Par exemple, ce modèle d'indicateurs permet à l'opérateur d'évaluer l'impact de sa décision sur les postes en aval du processus de production :

- Pour la grenailleuse : l'indicateur mesure si la décision « viole » la contrainte au niveau de la grenailleuse, consistant à espacer les EMS complexes. Cette évaluation est représentée par la courbe bleue dans la *Figure 47* ;
- Pour la peinture : l'indicateur mesure si la décision augmente le nombre de purges, ce qui est reflété par la courbe violette dans *Figure 47* ;
- Etc.

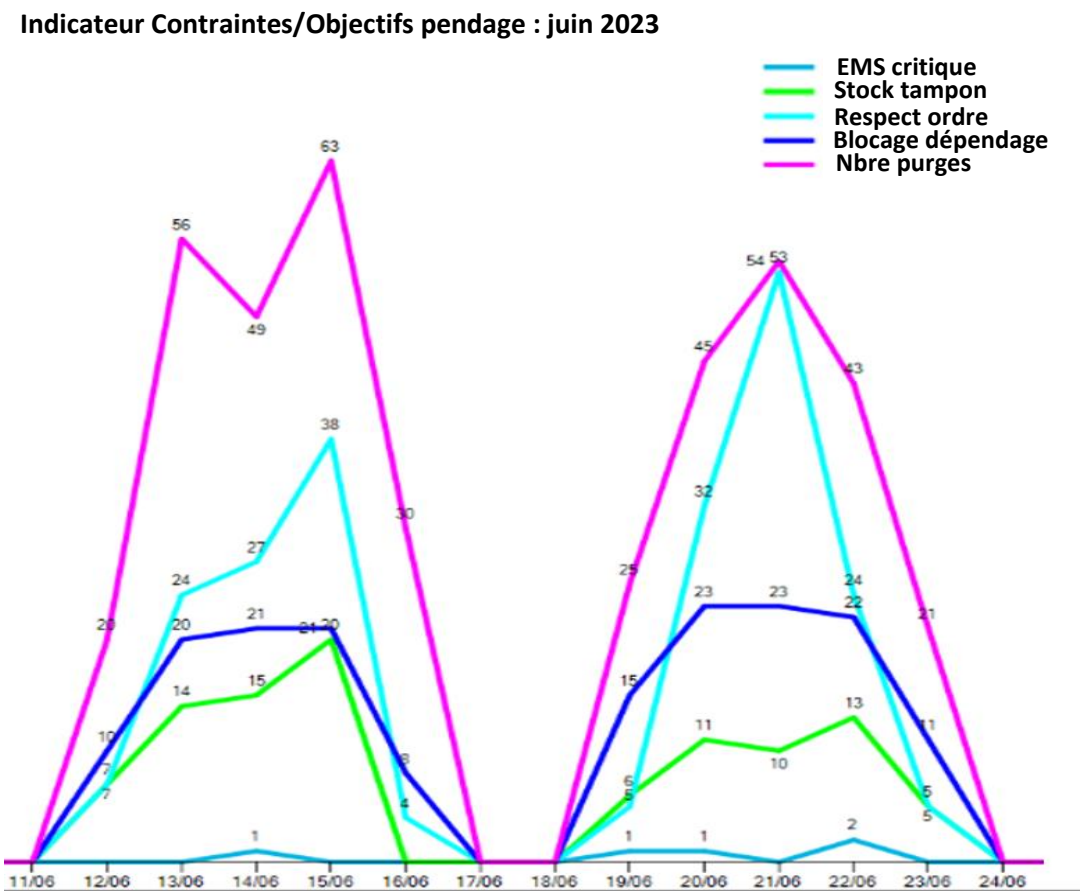


Figure 47 : Impact des décisions locales sur les objectifs/contraintes globaux

Cette approche encourage une prise de décision éclairée, basée sur une compréhension approfondie des causes et des effets, des relations client fournisseur. Plutôt que de contourner simplement les contraintes locales, les opérateurs sont incités à trouver des solutions minimisant les perturbations tout en préservant une efficacité optimale.

En évaluant régulièrement l'impact de leurs décisions, les opérateurs ont l'opportunité d'apprendre et d'ajuster leurs approches, favorisant ainsi un processus d'amélioration continue au sein de l'équipe. Cette compréhension approfondie des interactions entre les actions locales et les objectifs globaux renforce l'alignement des opérations quotidiennes avec la vision tactique de l'entreprise. Ainsi, le site de Moulins s'engage à rendre autonomes les opérateurs pour leur permettre des prises de décisions décentralisées et éclairées afin d'optimiser l'efficacité opérationnelle du système global du convoyeur via leurs actions locales.

III.5.2.2. La digitalisation pour renforcer l'efficacité de certaines pratiques Lean : Le management visuel

L'objectif de cette section est de montrer le rôle crucial du management visuel dans l'amélioration de la qualité au sein de l'entreprise, et comment la digitalisation a permis de le faire.

Avec notre contexte de personnalisation de masse, les opérations sont devenues plus complexes et plus diversifiées. Cette complexité se manifeste par une abondance d'informations spécifiques à chaque produit, mais aussi au fait que des opérations sur une même pièce sont réparties à travers tout le processus de fabrication. Cette situation peut entrainer des problèmes de qualité sur les produits, car elle augmente la variabilité et la complexité du processus de fabrication. La réduction des variations est donc cruciale, car tout écart sur la qualité des produits par rapport aux attentes des clients entraîne des retours et des pertes financières pour l'entreprise.

III.5.2.2.1 Le management visuel vu par la littérature scientifique

Selon la littérature, l'objectif ultime de la mise en œuvre du modèle Lean dans les opérations industrielles est d'augmenter la productivité, d'améliorer la qualité, de raccourcir les délais, et réduire les coûts. Tout cela se traduit par la création de valeur pour le client (Adlin, 2020). Pour répondre à ces défis, les praticiens du Lean ont développé des outils de communication visuelle, tel que le management visuel, pour améliorer les opérations et les processus de communication.

Le management visuel peut être défini comme l'utilisation de l'information d'une manière visuelle à ceux qui exécutent une tâche, de manière à ce que les informations puissent être récupérées en un coup d'œil et être immédiatement utilisables pour l'exécution de la tâche (Womack et Jones, 1997). La disponibilité de l'information n'est généralement pas le problème, surtout si l'on utilise des systèmes d'information digitalisés ; c'est la communication de ces informations qui est le plus souvent inefficace. L'un des avantages du management visuel réside dans l'utilisation d'aides visuelles telles que la lumière, le son, des photos, des tableaux et des graphiques, ainsi que des codes couleur, pour rendre l'information plus visible et lisible (Liker, 2004). Cela améliore les communications en milieu de travail, soutient les opérations des individus et optimise les processus, les rendant plus sûrs, plus efficaces, et finalement moins sujets à des pertes financières.

Certaines recherches concluent que le management visuel est un outil sous-étudié dans la littérature (Beynon-Davies et Lederman, 2017) et encore moins dans les environnements de type HMLV (Cannas et al., 2018). Cette constatation souligne également l'importance d'approfondir la recherche dans ce domaine pour mieux comprendre comment le management visuel peut contribuer à la réalisation des objectifs fondamentaux du Lean, tels que l'amélioration de la qualité, la réduction des délais et des coûts, entre autres.

III.5.2.2.2 L'application du management visuel dans l'entreprise

L'exemple d'application du management visuel dans l'entreprise ci-dessous est significatif, car il met en lumière l'efficacité du management visuel dans la résolution d'un problème spécifique lié au poste de pendage. Cependant, il est essentiel de noter qu'il existe d'autres exemples de mise en place de management visuel au sein de l'entreprise Manitowoc, chacun ciblant des défis opérationnels distincts.

Dans le périmètre du convoyeur, les reprises dues à la non-qualité perturbent de manière conséquente le flux de production, et particulièrement lorsque le défaut n'est détecté qu'en aval du processus. Ce qui est souvent le cas. Pour évaluer cette non-performance, le site de Moulins mesure le nombre de défauts, et cherche à identifier leurs causes racines. La *Figure 48* donne le Pareto des non-conformités remontées tout au long de l'année 2021. Nous voyons que l'erreur de teinte figure en tête de ce diagramme de Pareto. Elle représente la non-conformité majeure à traiter en priorité.

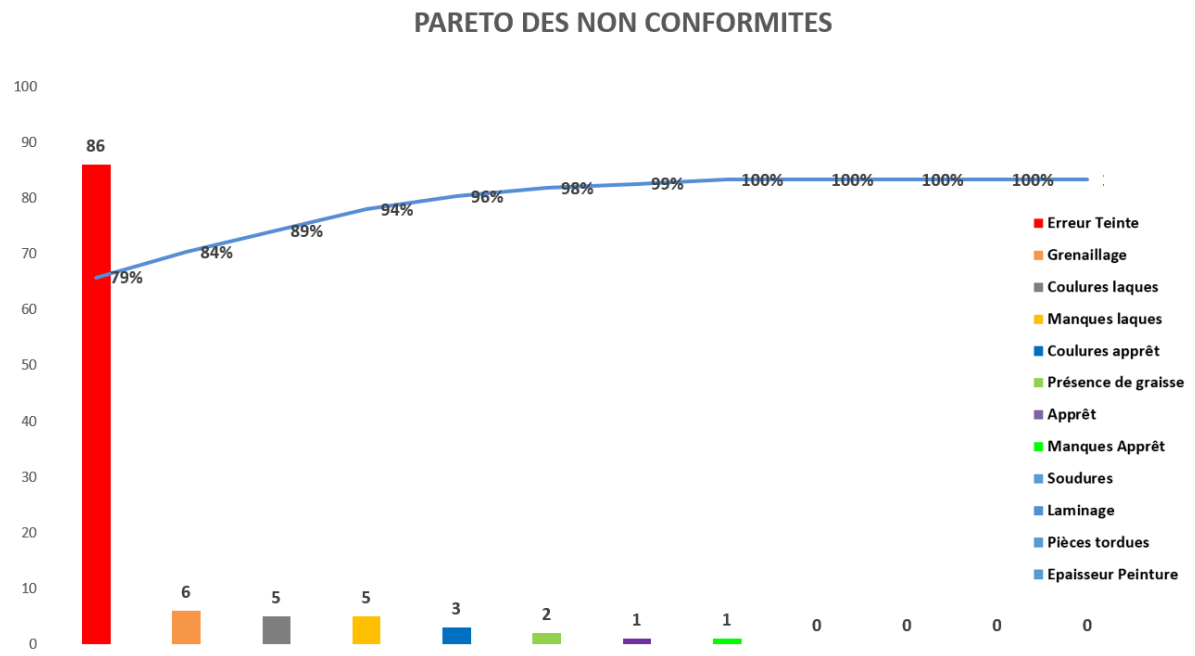
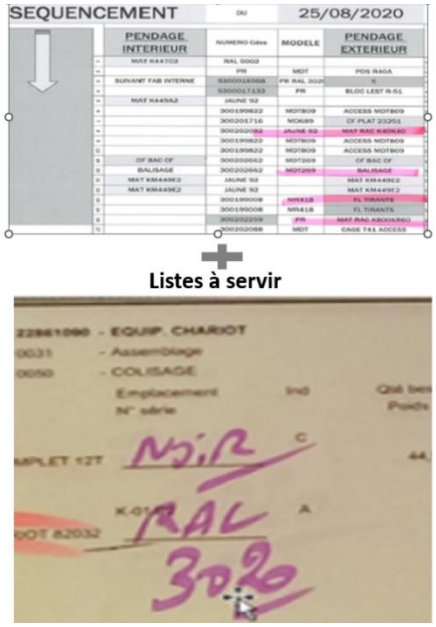


Figure 48 : Pareto des non-conformités

Cette erreur de teinte a des répercussions coûteuses et perturbe le flux de production. Pour corriger cette non-conformité, l'EMS défectueux doit subir une opération de sablage chez un prestataire extérieur, visant à remettre le métal à nu. Cette opération, outre son coût élevé allant jusqu'à 2100€ par EMS, entraîne également un allongement du *lead time* de 4 jours environ. Cette problématique souligne l'importance cruciale de minimiser les erreurs de teinte pour optimiser l'efficacité opérationnelle et réduire les coûts associés aux corrections.

Une analyse approfondie des causes a démontré que l'erreur provient du poste de pendage. Le pendeur, après avoir reçu le séquencement des EMS à pendre, doit consulter les listes à servir pour identifier la couleur correspondante à chaque EMS. Par la suite, il est chargé d'accrocher un repère sur l'EMS, indiquant au peintre la couleur requise. L'analyse a montré que même si le pendeur détient l'information correcte, la communication de cette information sous forme textuelle se révèle peu efficace (voir *Figure 49*). Ce constat s'explique principalement par le processus de recherche dans les listes à servir, qui peut être sujet à des erreurs humaines telles que des oublis ou des permutations entre les EMS successifs. De plus, la nature textuelle de l'information rend la compréhension moins immédiate et plus sujette à des interprétations erronées. Ces éléments combinés accroissent le risque d'attribution incorrecte de repères aux EMS, compromettant ainsi la qualité du produit final.

Avant : Management visuel textuel



Après: Management visuel digitalisé

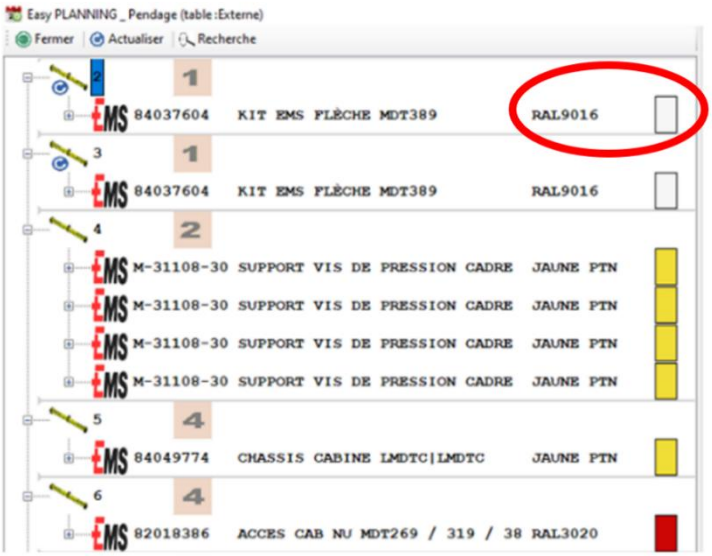


Figure 49 : Transition vers un management visuel digitalisé

La digitalisation a permis la mise en place de deux solutions faisant appel au management visuel plus efficace pour remédier à cette problématique au poste de pendage :

1. La consolidation de toutes les informations nécessaires sur un même écran, accompagnées du code couleur pour chaque EMS. Cela offre une vue centralisée et immédiate, réduisant les risques d'erreurs liés à la consultation de documents multiples. L'utilisation de codes permet d'améliorer la clarté et la rapidité dans la transmission des informations sur la couleur requise pour chaque EMS couleur, éliminant ainsi la dépendance à la communication textuelle (voir *Figure 49*).
2. La mise en place de vérifications supplémentaires à l'entrée des cabines d'apprêt, via un écran qui affiche grâce à des capteurs IOT à l'opérateur les EMS qui va recevoir permettant à l'opérateur de détecter au plus tôt toute attribution erronée de repères, avant que l'EMS n'atteigne la cabine de laque pour l'application de la couleur.

III.4.2.2.3 Résultat et discussion

A la suite de la mise en place de ces outils digitalisés, des observations ont été menées. Les résultats montrent que ces mesures ont un impact significatif sur le respect des teintes. L'étape 1 (transition vers l'utilisation de codes couleur) a permis de réduire le nombre d'erreurs de 85 à 43 par an en moyenne. Ensuite avec l'étape 2 (mise en place d'un écran en amont des cabines peinture) le nombre d'erreurs a été encore réduit, passant de 43 à 13 par an en moyenne, comme le montre la *Figure 50*

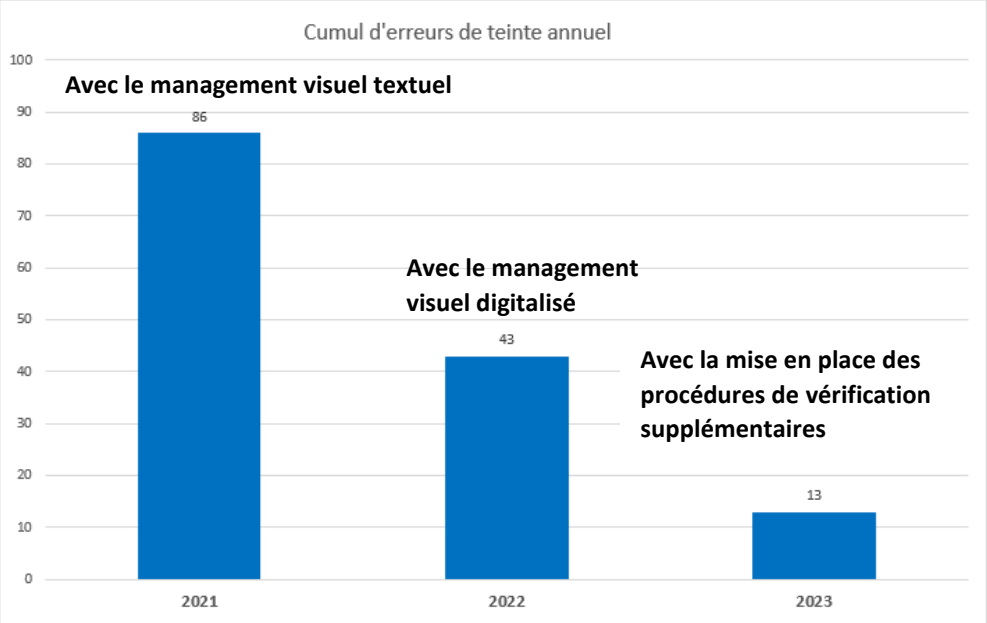


Figure 50 : Historique d'évolution des erreurs de teinte

En résumé, un management visuel s'appuyant sur la digitalisation a permis une communication rapide et efficace de l'information. Les codes couleur ont montré qu'ils sont plus facilement compréhensibles et mémorisables que les informations textuelles, et leur utilisation a permis de réduire significativement les non-conformités. De plus, les informations visuelles sont plus susceptibles d'attirer l'attention, ce qui contribue à maintenir un niveau élevé de vigilance et de conformité aux procédures établies, renforçant la qualité opérationnelle.

III.5.2.3 La digitalisation pour renforcer l'efficacité de certaines pratiques Lean : Le travail standardisé

Comme nous l'avons vu précédemment dans le chapitre 2, la diversité importante des produits finis sur le site Manitowoc de Moulins a imposé l'établissement de standards de travail. Initialement communiqués aux opérateurs sous forme papier, et archivés dans des classeurs, ces standards sont devenus nombreux, complexes à mettre à jour, et difficiles à consulter. La recherche laborieuse à travers une multitude de documents a rendu la standardisation inefficace et a engendré de la frustration parmi les opérateurs. Face à ces obstacles, ces derniers ont abandonné l'utilisation des standards, se fiant à leur savoir-faire et leur mémoire. Cela a entraîné de nombreuses perturbations dans le flux de production et des problèmes de qualité, principalement au niveau du pendage et de la grenailleuse.

En effet, au niveau du pendage, une pièce mal pendue peut conduire à plusieurs problèmes. Tout d'abord, un risque de sécurité accru en cas de décrochage des EMS pour les peintres qui doivent parfois se positionner en dessous des pièces pour les peindre. Toujours au niveau de la peinture, des zones de l'EMS peuvent être difficilement accessibles pour les peintres, ce qui engendre un risque de non-qualité. Enfin, cela peut entrainer des retards dans la production et une perte de capacité. Si les EMS doivent retourner au poste de pendage pour être réajuster, le lead time est allongé de 13 heures car le palonnier doit effectuer un tour de convoyeur. Ainsi, le séquencement de la production est perturbé.

De même, au niveau de la grenailleuse un soufflage incomplet peut entraîner la présence de résidus de grenaille non éliminés. Cela entraine une adhérence insuffisante de la peinture, pouvant causer des problèmes tels que le décollement de la laque, l'écaillage ou des zones non uniformes en terme

de rendu. Cela crée la formation de bulles à la surface de la peinture, créant des imperfections visuelles et potentiellement altérant la protection offerte par le revêtement. Ces non-conformités provoquent des retards de production et une perte de capacité. En effet, la correction des pièces défectueuses demande que le palonnier fasse un tour complet de convoyeur, perturbant le séquencement global et impactant la livraison des produits finis aux clients.

La digitalisation, par le biais de *Easy Planning*, simplifie l'accès aux standards en regroupant l'ensemble des informations de manière centralisée et facilement accessible. Les opérateurs n'ont plus à rechercher parmi des centaines de documents papier, ce qui réduit considérablement la complexité et le temps nécessaire pour consulter les standards de travail. Au niveau du pendage, il suffit à l'opérateur de sélectionner dans le séquencement la pièce à pendre. Le système affiche alors automatiquement le standard de pendage de l'EMS sélectionné. Cette automatisation supprime le temps que les opérateurs passent à chercher manuellement les informations, améliorant ainsi l'efficacité opérationnelle (Voir *Figure 51*).

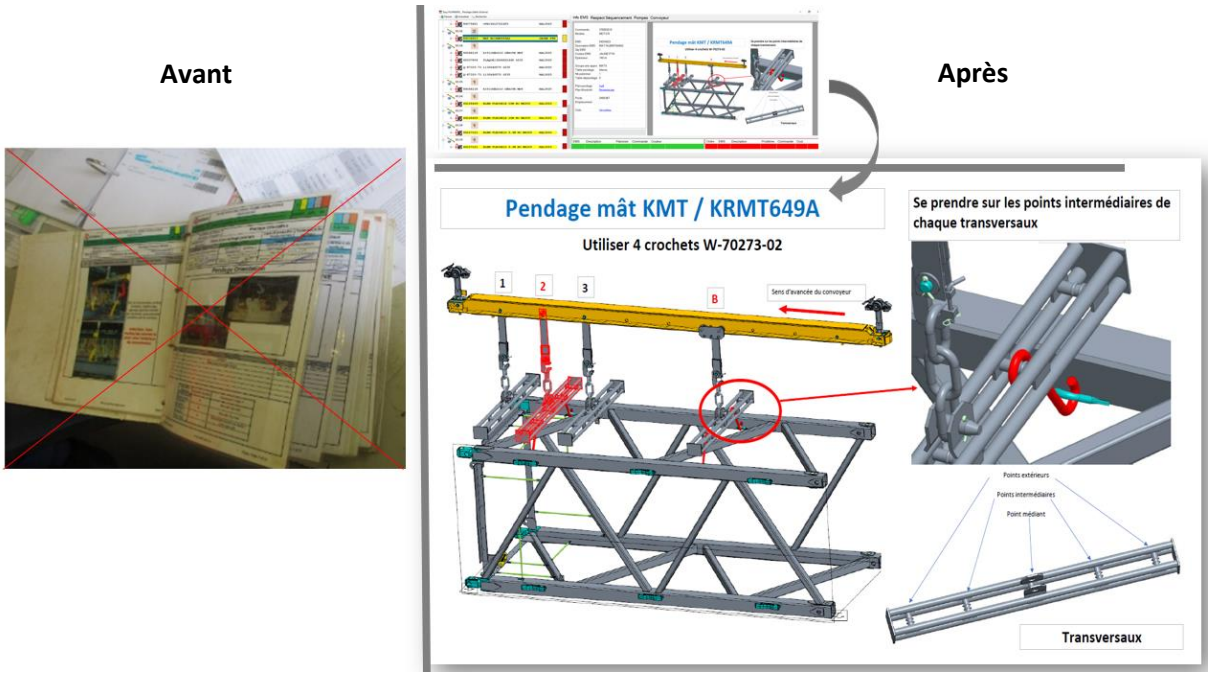


Figure 51 : La digitalisation des standards de travail de pendage

Là où l'implémentation des capteurs IoT est possible, comme au niveau de la grenailleuse, la digitalisation facilite une intégration transparente des standards de travail. Par exemple, à la sortie de la grenailleuse, dès que le capteur détecte la présence de l'EMS, il déclenche instantanément la transmission d'informations à *Easy Planning*, qui affiche automatiquement sur l'écran de l'opérateur le standard de travail associé à l'EMS.

Cette digitalisation facilite l'identification des zones de rétention de la grenaille par l'opérateur (voir *Figure 52*), simplifiant le processus de soufflage de la grenaille résiduelle ou de protection des surfaces usinées avant peinture, tout en réduisant les risques de non-conformités. Ainsi, aucune intervention manuelle n'est nécessaire, accélérant considérablement le processus global.

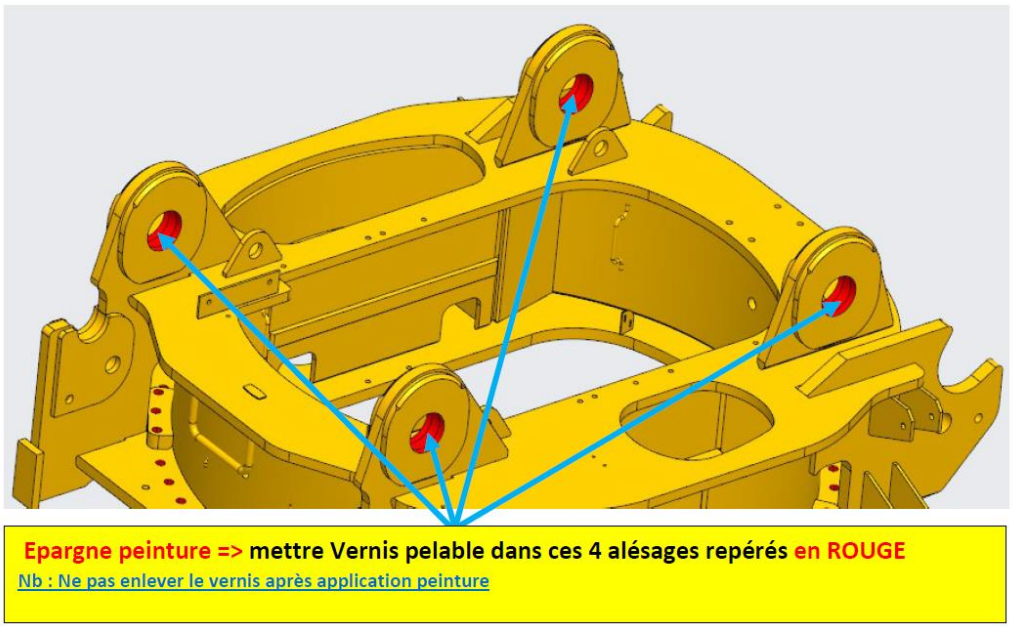


Figure 52 : La digitalisation des standards de travail de l'opération de protection des surfaces usinées

En somme, la digitalisation des standards de travail à Moulins a créé un environnement plus efficace, moins sujet aux erreurs, et a renforcé la qualité opérationnelle. Cette transition vers le digitale s'aligne avec les principes Lean, contribuant ainsi à l'amélioration continue des processus au sein de l'usine.

III.5.3. L'impact de la digitalisation sur l'efficacité de l'atelier de montage

III.5.3.1 Synchronisation des flux entre le pendage et le magasin

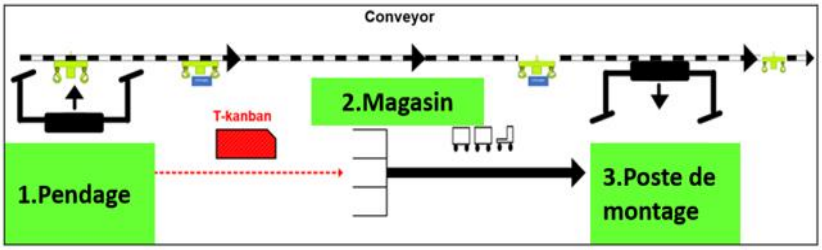
Le manque d'espace est un problème souvent rencontré dans l'atelier de montage. Les postes de montage sont approvisionnés à la fois par le convoyeur, fournisseur d'EMS peints à équiper, et le magasin, fournisseur des kits d'assemblage. Auparavant, à la prise de poste, les opérateurs remontaient le convoyeur pour inventorier les EMS qui allaient leur arriver, afin de pouvoir élaborer le bon de commande des kits pour le magasin, tâche nécessitant une demi-heure par opérateur chaque jour. Ce bon de commande est ensuite transmis au magasin, permettant au conducteur du train logistique de livrer les kits d'assemblage demandés.

Cependant, l'heure de livraison d'un kit peut être décalé en raison des variations dans la séquence de production, entrainant une désynchronisation des flux entre la séquence de pendage et l'approvisionnement du magasin. Ce décalage se traduit par des rendez-vous manqués entre les kits approvisionnés et les EMS à assembler. Or l'indisponibilité d'un kit d'assemblage peut conduire à un arrêt momentané de travail sur un poste d'assemblage. A l'inverse des livraisons anticipées de kits provoquent une accumulation de pièces au poste en bord de ligne, créant des problèmes d'organisation et de gestion de l'espace.

Désormais, les capteurs IoT détectent le pendage de l'EMS ce qui déclenche instantanément la transmission de cette information à *Easy Planning* (étape 1, *Figure 53)* . Ce système génère automatiquement un workflow, envoyant un e-mail détaillé au conducteur du train logistique avec toutes les informations nécessaires pour la livraison du kit, telles que le numéro de commande, le numéro du poste de montage, l'heure de livraison souhaitée (Voir étape 2, *Figure 53)*. le kit arrive au poste de travail avant la pièce chargée sur le convoyeur (Voir étape 3, *Figure 53)*. Le flux des kits est tiré par le flux des EMS.



Avant



Après

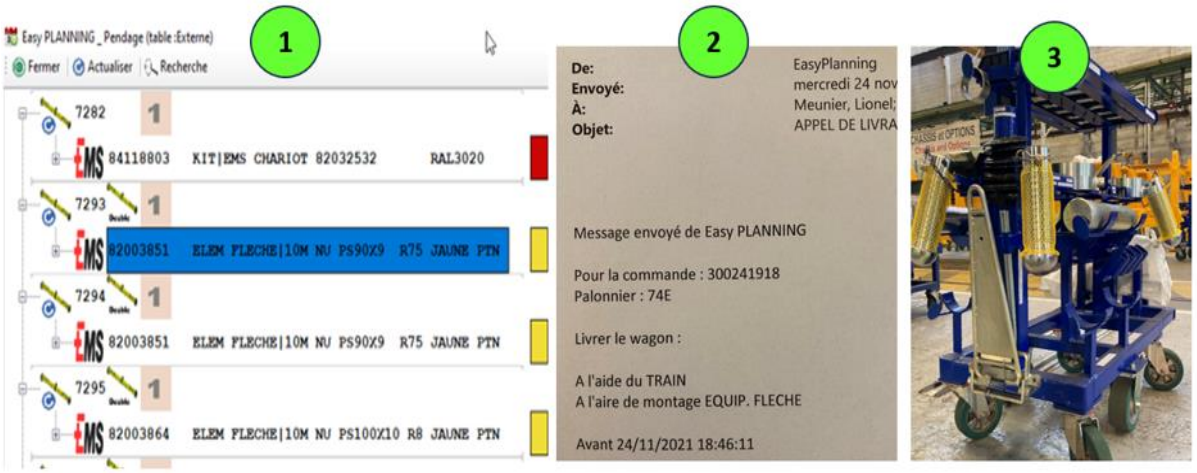


Figure 53 : Synchronisation des flux entre le pendage et le magasin

L'avantage significatif de cette digitalisation, basée sur la séquence réelle plutôt que sur le séquencement prévisionnel, est la garantie de livraisons plus précises : le bon kit, au bon endroit, en juste à temps. Elle permet de supprimer les risques de désorganisation et d'encombrement de l'atelier de montage. En outre, cette intégration des capteurs IoT améliore considérablement la communication entre les équipes distantes de plusieurs centaines de mètres, et réduit la dépendance à l'égard des interventions manuelles. Elle évite que les opérateurs du montage soient perturbés par des questions logistiques sans valeur ajoutée, consolidant ainsi l'efficacité opérationnelle globale de l'atelier de montage.

III.5.3.2 Suivi automatique des en-cours sur le convoyeur

Auparavant, l'inventaire des en-cours sur le convoyeur demandait aux chefs d'équipe un travail laborieux et chronophage. En effet, pour réaliser l'inventaire des pièces en cours de traitement, les chefs d'équipe devaient parcourir le convoyeur en amont des postes de montage, consacrant une

heure chaque jour à cette opération. Cette activité répétitive mais nécessaire se traduisait par cinq heures de travail au total, compte tenu du nombre des chefs d'équipe impliqués.

Au-delà de la perte de temps, un autre problème résidait dans la fiabilité des données collectées. Les chefs d'équipe n'étant pas autorisés à accéder aux cabines de peinture et aux étuves, cela limitait leur capacité à obtenir une vue complète et précise des en-cours sur le convoyeur.

Consécutivement à la mise en place de capteurs IoT couplés à *Easy Planning*, le site de Moulins a équipé chaque poste de montage d'écrans. Ces écrans affichent en temps réel les EMS présents sur le convoyeur et l'heure prévisionnelle d'arrivée au poste de travail (voir *Figure 54*).



Avant

Après

COMMANDE	DESIG - MATS	N°	HEURE DÉP.	COUL.
370003217	MAT NU|KRMT649A2	74	19/12/2023 19:40:11	
300291257	MAT K649A2 4 PANNEAUX NUS	89	20/12/2023 06:36:53	
370003218	MAT NU|KRMT649A2	101	20/12/2023 09:45:04	
300293816	MAT RACCORD|K80/KR60-2 NU	15	20/12/2023 09:45:08	

Figure 54 : Suivi automatique des en-cours sur le convoyeur

Ces informations permettent maintenant aux opérateurs d'être autonomes et proactifs. Ils peuvent anticiper la préparation des outils, détecter les pièces manquantes et gérer l'évacuation des colis pour libérer de l'espace au sol de manière plus efficace. Cette intégration technologique a considérablement réduit les temps d'arrêt et les interruptions sur les postes d'assemblage, renforçant ainsi l'efficacité opérationnelle globale. Couplées aux diverses améliorations, ces avancées ont conduit à une augmentation du taux de service, passant de 86% à 100%. La précision des informations communiquées en temps réel élimine les incertitudes et améliore la qualité de la prise de décision.

III.6 Conclusion

L'évolution vers des architectures de séquencement combinant des mécanismes centralisés et décentralisés se profile comme une stratégie prometteuse pour concilier flexibilité opérationnelle et stabilité globale. La digitalisation émerge comme un outil incontournable dans cette quête d'équilibre, comme le démontre l'étude de cas que nous avons menée dans l'entreprise.

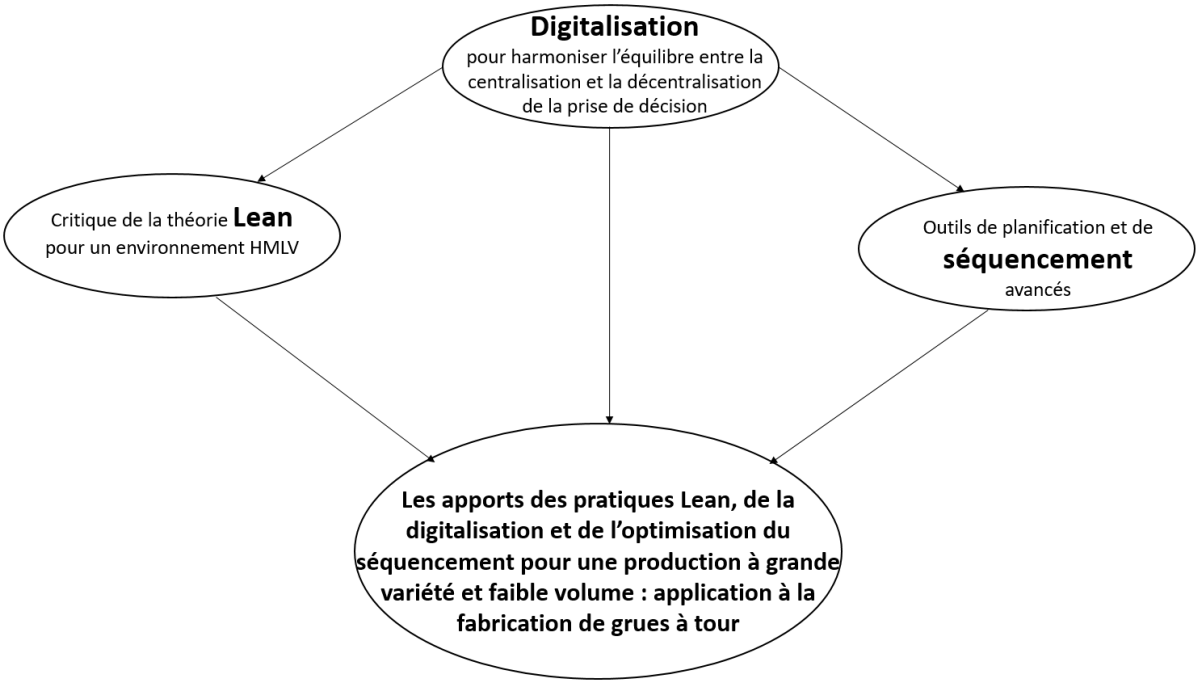
L'entreprise Manitowoc a tiré parti de la digitalisation pour relever les défis du séquencement, restreignant la visibilité des pendeurs et introduisant des KPI en temps réel pour améliorer le respect du séquencement.

La digitalisation a également favorisé une prise de décision décentralisée éclairée, avec l'intégration de KPI évaluant l'impact des décisions locales et l'amélioration efficace du management visuel et du travail standardisé (principes clé du modèle Lean), renforçant la qualité opérationnelle.

En ce qui concerne l'atelier de montage, la digitalisation a résolu des problématiques logistiques majeures. L'intégration des capteurs IoT a permis une synchronisation plus précise des flux entre le pendage et le magasin, évitant ainsi des désorganisations coûteuses. De plus, le suivi automatique des en-cours sur les postes de montage et sur le convoyeur a considérablement amélioré l'efficacité opérationnelle en éliminant les tâches manuelles chronophages.

La digitalisation a renforcé l'efficacité de certaines pratique Lean, et a permis de résoudre des problèmes que le Lean seul n'avait pu surmonter. Ainsi, grâce à la digitalisation de nombreux problèmes identifiés ont été résolus, passant de rouge à bleu sur la VSM (Voir *Figure 55)*. Toutefois, certains défis persistent, et ils seront abordés dans le chapitre 4.

En résumé, la digitalisation émerge comme un outil essentiel pour concilier les approches centralisées et décentralisées, offrant des solutions pragmatiques pour améliorer l'efficacité opérationnelle tout en préservant la stabilité des processus. Cette étude illustre comment une approche équilibrée, soutenue par la digitalisation, peut transformer positivement la planification et la réalisation des opérations dans des entreprises de production de type HMLV. Le chapitre 4 se focalisera sur l'optimisation du séquencement centralisé, offrant ainsi un aperçu détaillé des approches utilisées dans la résolution de ce problème complexe.



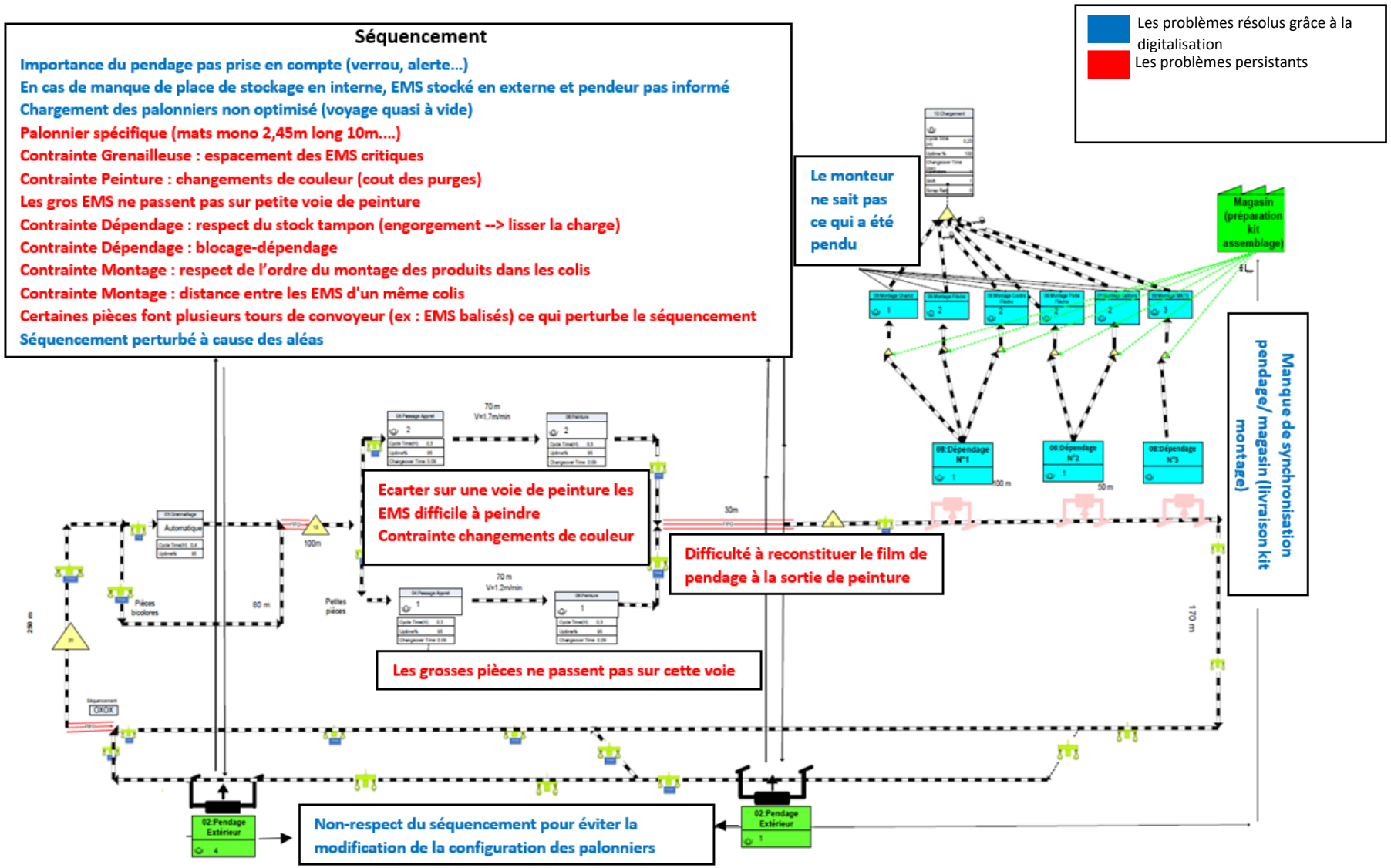


Figure 55 : VSM : Impact de la digitalisation sur la résolution des problèmes identifiés

Chapitre IV : Étude heuristique empirique pour le problème de séquencement d'un flowshop hybride

IV.1 Introduction :

Dans le contexte actuel d'évolution du marché, la réduction des coûts et/ou des délais de fabrication demeure une préoccupation majeure pour les entreprises. Cette préoccupation découle de la forte pression concurrentielle sur le marché international, exacerbée par des clients de plus en plus exigeants qui disposent d'un large éventail d'options à leur disposition. Pour surmonter ces défis, l'optimisation des modalités de planification de la production est une piste prometteuse (Chen et al.,2021 ; Xu et al., 2022).

Plusieurs approches se concentrent sur les niveaux tactiques et opérationnels où tout peut changer à tout moment, et où la performance globale de l'entreprise dépend du niveau de maîtrise des fonctions telles que la planification. Les principales activités de planification sont les suivantes : réception des commandes et conception, sélection de la matière première et de la forme, sélection de la technologie de procédé, séquencement des opérations, préparation de plan de processus et génération des résultats de planification (Denkena et al., 2007). L'objectif de ces activités de la planification des processus est de transformer le design/modèle d'un produit en un produit physique fini de manière rentable et compétitive. Parmi les activités, on note le séquencement des opérations servant de fonction « qui consiste à organiser et à déterminer l'ordre dans lequel les différentes opérations ou tâches de production doivent être exécutées ». Le séquencement a été considéré comme l'une des tâches d'optimisation les plus complexes de la communauté scientifique (Djurdjev et al., 2021).

Les environnements de production à plusieurs étapes héritent naturellement d'une grande complexité opérationnelle. L'augmentation de la complexité de ces problèmes de séquencement peut s'expliquer par la nature conflictuelle des valeurs objectives de chaque étape, qui doivent être prise en compte simultanément. Cette complexité est exacerbée par la diversité croissante des produits d'aujourd'hui. La variété de produits implique souvent des spécifications uniques, des matériaux différents, et des exigences de processus spécifiques, ajoutant ainsi une couche supplémentaire de difficulté au séquencement des opérations (Hajji, 2023).

Résoudre les problèmes de séquencement dans de tels environnements de production est une tâche ardue, reconnue et classée comme un problème d'optimisation NP-difficile (Berlińska et Przybylski, 2021 ; Umam et al., 2022). La recherche dans ce domaine a généré plusieurs approches pour formuler et résoudre les problèmes de séquencement. Face à la grande diversité de produits et des processus, l'élaboration de modèles pour des problèmes réels est une tâche complexe et la procédure de résolution est difficile dans la plupart des cas. Pour cette raison, les chercheurs sont de plus en plus motivés par le recours à des modèles industriels réalistes (Hajji, 2023).

Ce chapitre se concentre sur les défis et opportunités liés au séquencement dans un flowshop hybride. Elle s'articule en trois parties principales. Tout d'abord, nous aborderons les objectifs et contraintes spécifiques aux ateliers de production interconnectés de l'entreprise Manitowoc, mettant en évidence les particularités de chaque étape de production. Ensuite, nous proposerons une modélisation mathématique du problème de séquencement en programmant des objectifs et contraintes variés.

La deuxième partie explorera les différentes approches pour résoudre les problèmes de séquencement, en proposant un algorithme de recherche locale (RL), un algorithme génétique (AG), et un algorithme génétique hybride (AGH). Enfin, nous évaluerons expérimentalement les performances de ces méthodes pour traiter des instances de taille réelle, en examinant les coûts et les temps de calcul associés à chaque approche.

L'objectif de ce chapitre est de fournir une vue d'ensemble complète des problèmes de séquencement dans un flowshop hybride et des approches possibles pour les résoudre, afin d'optimiser les processus de production et d'améliorer l'efficacité opérationnelle.

IV.2. Problème de séquencement dans un flowshop hybride

Cette partie se concentre sur le problème de séquencement dans les environnements de production multi-étapes, et se décline en trois sections. Nous débuterons par une exploration détaillée du problème, mettant en lumière les défis liés à la prise en compte d'objectifs et de contraintes diversifiés. Par la suite, une approche basée sur une modélisation mathématique en programmation linéaire sera présentée. Enfin, nous aborderons le sujet de l'unification des objectifs, pour simplifier le paysage complexe d'objectifs multiples souvent en conflit.

IV.2.1. Séquencement dans un flowshop hybride : Contraintes et objectifs multi-ateliers

L'usine Manitowoc de Moulins présente une structure particulière, avec quatre postes interconnectés les uns aux autres, en tant que clients et fournisseurs, où chacun a ses propres critères d'optimisation et leviers d'action spécifiques. Bien que chaque atelier puisse mériter une définition distincte de son problème de séquencement, la synthèse de l'ensemble s'inscrit dans la catégorie d'un problème de type "Flowshop Hybride " (FSH) pour la chaîne de fabrication de l'entreprise.

Dans un système de production flowshop hybride, l'objectif est de traiter un ensemble de tâches en plusieurs étapes de production, où toutes les tâches suivent la même séquence de machines. En plus il existe au moins une étape avec plusieurs machines parallèles, toutes disponibles pour traiter tous les types de tâches (Neufeld et al., 2023).

Dans la suite de cette section, nous allons rappeler ce qui a été exposé dans le chapitre 1, et fournir plus de détails sur les étapes de production qui sont importants pour le séquencement. En plus, nous mettons en lumière les objectifs et les contraintes spécifiques propres à chaque atelier, ainsi que la nature conflictuelle de ces éléments en raison de la diversité des produits fabriqués.

IV.2.1.1 La grenailleuse : Espacement des Éléments Mécano-Soudés (EMS) critiques

Certains composants complexes, qualifiés de « EMS critiques », nécessitent chacun un temps de traitement excédant le *takt time*. La succession de plusieurs EMS avec des temps de cycle supérieurs au *takt time* peut engendrer des goulets d'étranglement et provoquer un blocage au niveau du poste amont (pendage) et un arrêt de l'activité au niveau du poste aval (peinture) par manque d'EMS. L'ordre de passage des EMS doit donc éviter ces situations en définissant une séquence optimisée où ces produits à temps de cycles importants alternent avec des produits dont les temps de cycle sont moins importants.

L'objectif est d'espacer dans le séquencement ces EMS afin de lisser la charge de travail sur la grenailleuse. En espaçant ces composants critiques dans le séquencement, on évite l'accumulation des tâches complexes au même moment, et on réduit les temps d'attente pour les postes amont (le pendage) et aval (la peinture). Cette stratégie d'espacement est mise en œuvre au moyen d'une contrainte s'inspirant du modèle du *car sequencing*, une méthode bien établie pour optimiser le

séquencement des véhicules dans l'industrie automobile (Louis et al., 2022). Cette contrainte d'espacement empêche d'avoir plus de *N* EMS répondant au critère parmi une fenêtre de *P* EMS consécutifs. Par exemple : pour une contrainte d'espacement avec un ratio 1/4, pour les EMS avec un temps de cycle important (représentés par EMS++). La séquence présentée sur la *Figure 56* ne respecte pas le ratio indiqué à deux reprises. Cependant le mouvement d'un EMS++ permet de réduire ce non-respect à une reprise (voir *Figure 56*).

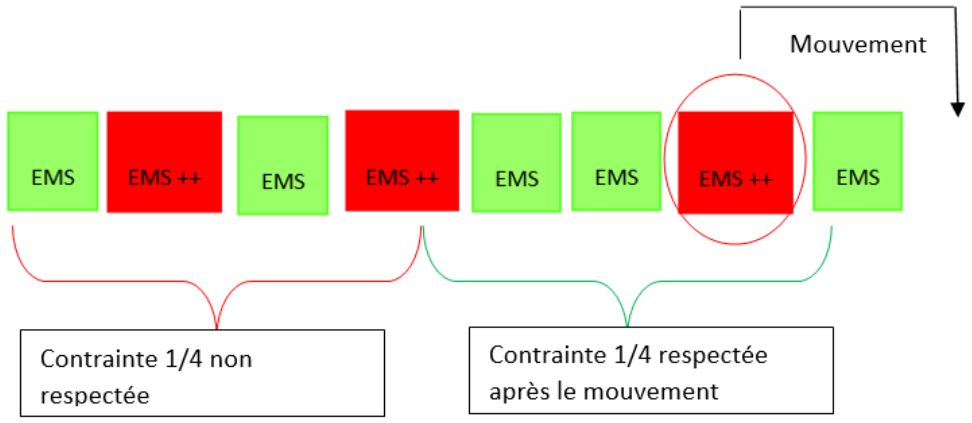


Figure 56 : Espacement des EMS critiques

IV.2.1.2 Peinture : Regroupement des EMS de couleur identique

La succession de deux palonniers transportant des EMS de couleurs différentes implique une purge des circuits d'approvisionnement de la peinture et des pistolets, mesurée à 18€ par purge en moyenne. En raison du coût important des purges, et du nombre actuel élevé de purges (environ 80 par jour), le séquencement des EMS doit être effectué de sorte à regrouper au maximum les EMS de couleur identique. L'objectif principal ici est de minimiser le nombre de purges nécessaires.

IV.2.1.3 Dépendage : Minimisation des blocages et lissage de la charge de travail

Le processus de dépendage, malgré la modularité de ses postes dédiés au déchargement d'EMS spécifiques pour alimenter d'autres postes de montage dédiés, présente une complexité accrue en raison de la connexion de ces postes au même convoyeur. Cette caractéristique fait qu'un palonnier peut traverser plusieurs postes de dépendage sans s'arrêter. Par exemple, un palonnier qui doit être déchargé sur le poste 4, traversera les postes 1, 2 et 3, comme le montre la *Figure 57*. Dans cette figure, la destination de chaque palonnier est indiquée par l'étiquette (D1 à D4). Si un palonnier doit être déchargé sur un poste, l'opérateur arrête ce palonnier, ce qui bloque les palonniers suivants en amont de son poste. Par exemple, comme le montre la *Figure 57*, le palonnier devant être déchargé sur le poste 1 bloque les palonniers devant être déchargés sur les postes 2, 3 et 4, aussi, le palonnier qui doit être déchargé sur le poste 2 bloque les palonniers devant être déchargés sur les postes 3 et 4.

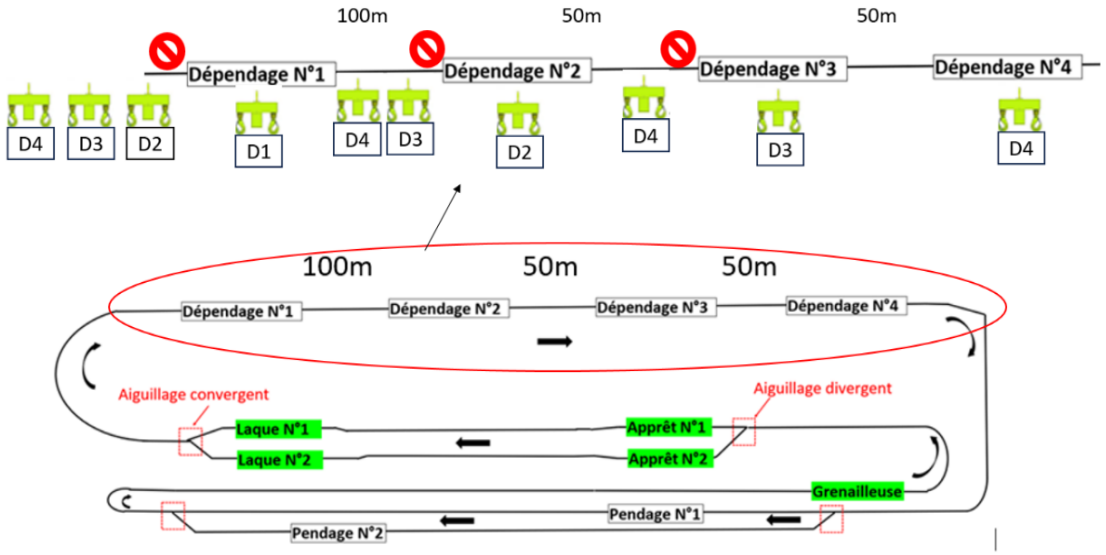


Figure 57 : Blocage au niveau des postes de dépendage

Ces blocages génèrent des temps improductifs. Les dépendeurs restent en attente de l'arrivée des palonniers qu'ils doivent décharger tout le temps qu'ils sont bloqués par des déchargements sur les postes amont. Ce phénomène de blocage au dépendage présente des conséquences sur l'approvisionnement des lignes de montage.

En raison de la capacité limitée des stocks tampons entre les postes de dépendage (la distance entre les postes comme indiquée sur *Figure 57*), la succession de plusieurs EMS destinés à la même table de dépendage peut contraindre l'opérateur à arrêter le convoyeur plus longtemps, tout le temps nécessaire au dépendage de tous les EMS. Cette accumulation peut saturer le stock tampon, paralysant les postes amont et perturbant la fluidité du processus.
Les deux objectifs majeurs de cet atelier sont donc les suivants :

1. Minimiser les blocages causés par les arrêts pour déchargement des EMS, en tenant compte de la configuration particulière du convoyeur. Pour ce faire, il est nécessaire de séquencer les opérations dans l'ordre suivant : 4, 3, 2, 1.
2. Lisser la charge de travail au dépendage afin d'assurer une répartition équilibrée des tâches et éviter les temps d'arrêt prolongés du convoyeur.

IV.2.1.4 Montage : réduction de l'encombrement des postes et accélération du flux de sortie des colis

Chaque poste de montage est spécialisé dans l'assemblage d'une famille de produit, et doit recevoir, dans la mesure du possible, les composants dans un ordre précis, qui est celui du montage du colis à expédier.

Le montage est la dernière étape de la chaine de valeur, et de par cette position, la non-réception des EMS à temps et/ou dans l'ordre de montage génère des dysfonctionnements. Si beaucoup d'EMS arrivent simultanément sur un poste, nous observons un encombrement de l'atelier, une augmentation du nombre de manutention, et un allongement du temps d'assemblage, ce qui peut aussi entrainer des risques accrus d'accident. De plus, cela peut bloquer les postes de dépendage si la place nécessaire au stockage des EMS n'est plus suffisante dans l'atelier. A l'inverse, si les EMS n'arrivent pas dans le bon ordre, ou en trop faible quantité, cela peut interrompre les opérations d'assemblage et provoquer des périodes d'inactivité pour les opérateurs. Ces contraintes doivent être prises en compte lors de séquencement des EMS.

Les objectifs clés sont ici :

1. Veiller à ce que chaque poste d'assemblage reçoive les EMS d'un même colis, dans l'ordre physique de montage, afin de réduire l'espace occupé par les EMS en attente.
2. S'assurer que les EMS appartenant au même colis ne soient pas trop espacés, afin d'accélérer le flux de sortie des colis.

Nous concluons que le problème de séquencement à traiter est un problème fortement combinatoire, multi-objectifs, et avec des contraintes très variées. Il appartient à la classe des problèmes mathématiques NP-difficiles, quel que soit le critère d'optimisation privilégié, puisqu'il contient naturellement des sous-problèmes eux-mêmes NP-difficiles au sens fort. Dans la prochaine section nous proposons une modélisation fine du problème de séquencement.

IV.2.2 Modélisation mathématique du problème de séquencement

L'étape de modélisation vise à déterminer les éléments à traiter en tant que contraintes impératives ou objectifs à optimiser. Dans le cadre de cette étude, nous avons adopté une approche basée sur une modélisation mathématique en programmation linéaire. Nous avons décidé de catégoriser l'objectif de la grenailleuse comme une contrainte forte devant être impérativement respectée. En revanche, les autres objectifs sont considérés comme des critères d'optimisation. Dans la suite de cette section, nous allons présenter les paramètres, variables, contraintes et objectifs du problème.

Les Paramètres du modèle :

nP : nombre total de produits à séquencer indicés par $i \in \{1, \cdots, np\}$;

nB : nombre de colis à séquencer (un colis est composé de plusieurs produits) indicés par $b \in \{1, \cdots, nB\}$, avec nB_b le nombre de produits dans le colis b ;

nC : nombre de couleurs différentes des produits à séquencer ;

nS : nombre de stations de dépendage indicées par $s \in \{1, \cdots, nS\}$;

nP_s: nombre de produits à séquencer ayant pour station de dépendage s $(s \in \{1, \cdots, nS\})$;

$maxS_s$: nombre maximum de produits pour la station de dépendage s pouvant être séquencer successivement à la station s $(s \in \{1, \cdots, nS\})$;

$minC$: écart minimum dans la séquence entre deux produits critiques au poste de grenaillage ;

j : indice de la position dans la séquence $(j \in \{1, \cdots, nP\})$;

$\sigma_{i_1,i_2,\mathrm{b}}$: paramètre valant 1 si le produit $i_1$doit être de préférence séquencé avant le produit i_2 dans le colis b, 0 sinon ;

Pour chaque produit i, nous avons :

- s_i : station de déchargement du produit i $(s_i \in \{1, \cdots, nS\})$;
- w_i : paramètre binaire valant 1 si le produit i est critique au poste de grenaillage, 0 sinon ;
- b_i : numéro de colis du produit i $(b_i \in \{1, \cdots, nB\})$;
- d_i : date d'échéance ;
- c_i : couleur du produit i $(c_i \in \{1, \cdots, nC\})$.

Les variables de décision de notre modèle :

$X_{i,j}$: variable de position qui vaut 1 si le produit i est en position j dans la séquence, 0 sinon ;

O_{i_1,i_2} : variable d'ordre qui vaut 1 si le produit i_1 est avant le produit i_2 dans la séquence, 0 sinon ;

D_{i_1,i_2} : distance entre les produits i_1 et i_2 dans la séquence, positive si i_1 est avant i_2, 0 sinon ;

DB_b : distance maximum entre deux produits du colis b ;

$DBmax$: distance maximum entre deux produits pour l'ensemble des colis ;

OB_b : variable indiquant la qualité du séquencement pour le colis b ($OB_b = 0$ pour un séquencement respectant l'ordre souhaité, $OB_b = \frac{nB_b(nB_b-1)}{2}$ pour la pire séquence) ;

$OBmax$: qualité du plus mauvais séquencement parmi tous les colis, soit la qualité du colis dont le respect de l'ordre des produits est le plus éloigné de l'idéal, où un ordre parfait serait respecté.

Q_i : nombre de produit i_1 précédant i dans la séquence alors que $d_{i_1} > d_i$;

C_j : variable binaire valant 1 si les produits en position j et $j+1$ sont de couleurs différentes, 0 sinon ;

S_j : variable binaire valant 1 si le produit en position j est déchargé sur une station de numéro strictement inférieur au produit en position $j+1$;

$T_{k,s}$: écart entre le taux de produits séquencés sur l'horizon 1 à k pour la station s et le taux pour tout l'horizon ($\frac{nP_s}{nP}$).

Les Contraintes

$\sum_{j=1}^{nP} X_{i,j} = 1$	$\forall i \in \{1, \cdots, nP\}$	(1)
$\sum_{i=1}^{nP} X_{i,j} = 1$	$\forall j \in \{1, \cdots, nP\}$	(2)
$\mathrm{D_{i1i2}} \geq \sum_{j=1}^{nP}(\mathrm{j} * X_{i_2,j}) - \sum_{j=1}^{nP}(\mathrm{j} * X_{i_1,j})$	$\forall i_1 \neq i_2 \in \{1, \cdots, nP\}$; $\forall D_{i1i2} \in \mathrm{N}$	(3)
$\mathrm{D_{i1i2}} \geq 0$	$\forall i_1 \neq i_2 \in \{1, \cdots, nP\}$; $\forall D_{i1i2} \in \mathrm{N}$	(4)
$O_{i_1,i_2} \times \mathrm{nP} \geq \sum_{j=1}^{nP}(\mathrm{j} * X_{i_2,j}) - \sum_{j=1}^{nP}(\mathrm{j} * X_{i_1,j})$	$\forall i_1 \neq i_2 \in \{1, \cdots, nP\}$	(5)
$O_{i_1,i_2} + O_{i_2,i_1} = 1$	$\forall i_1 \neq i_2 \in \{1, \cdots, nP\}$	(6)
$\sum_{i/s_i=s} \sum_{j=k}^{k+maxS_s} X_{i,j} \leq maxS_s$	$\forall s \in \{1, \cdots, nS\}, \forall k \in \{1, \cdots, nP - maxS_s\}$	(7)

$\sum_{i=1}^{nP} \sum_{j=k}^{k+minC} w_i X_{i,j} \leq 1$	$\forall k \in \{1, \cdots, nP - minC\}$	(8)
$Q_i = \sum_{i_1/s_{i_1}=s_i; d_{i_1}>d_i} O_{i_1,i}$	$\forall i \in \{1, \cdots, nP\}$	(9)
$C_j \times nC \geq \sum_{i=1}^{nP} c_i X_{i,j} - \sum_{i=1}^{nP} c_i X_{i,j+1}$	$\forall j \in \{1, \cdots, nP - 1\}$	(10)
$C_j \times nC \geq \sum_{i=1}^{nP} c_i X_{i,j+1} - \sum_{i=1}^{nP} c_i X_{i,j}$	$\forall j \in \{1, \cdots, nP - 1\}$	(11)
$S_j \times nS \geq \sum_{i=1}^{nP} s_i X_{i,j+1} - \sum_{i=1}^{nP} s_i X_{i,j}$	$\forall j \in \{1, \cdots, nP - 1\}$	(12)
$OB_b = \sum_{(i_1,i_2)/\sigma_{i_1,i_2,b}=1} O_{i_2,i_1}$	$\forall b \in \{1, \cdots, nB\}$	(13)
$OBmax \geq OB_b$	$\forall b \in \{1, \cdots, nB\}$; $\forall OBmax \in \mathrm{R}$	(14)
$DB_b \geq D_{i_1,i_2}$	$\forall i_1, i_2 / b_{i_1} = b_{i_2} = b$	(15)
$DBmax \geq DB_b$	$\forall b \in \{1, \cdots, nB\}$	(16)
$T_{k,s} \geq \frac{1}{k} \sum_{i/s_i=s} \sum_{j=1}^{k} X_{i,j} - \frac{nP_s}{nP}$	$\forall s \in \{1, \cdots, nS\}, \forall k \in \{1, \cdots, nP\}$	(17)
$T_{k,s} \geq -\frac{1}{k} \sum_{i/s_i=s} \sum_{j=1}^{k} X_{i,j} + \frac{nP_s}{nP}$	$\forall s \in \{1, \cdots, nS\}, \forall k \in \{1, \cdots, nP\}$	(18)
$X_{i,j} \in \{0,1\}$	$\forall i \in \{1, \cdots, nP\}, \forall j \in \{1, \cdots, nP\}$	(19)
$O_{i_1,i_2} \in \{0,1\}$	$\forall i_1, i_2 \in \{1, \cdots, nP\}$	(20)
$D_{i,j} \in \mathbb{R}^+$	$\forall \mathrm{i}, j \in \{1, \cdots, nP\}$	(21)
$DB_b, OB_b \in \mathbb{R}^+$	$\forall b \in \{1, \cdots, nB\}$	(22)
$C_j, S_j \in \{0,1\}$	$\forall j \in \{1, \cdots, nP - 1\}$	(23)
$Q_i \in \mathbb{R}^+$	$\forall i \in \{1, \cdots, nP\}$	(24)
$T_{k,s} \in \mathbb{R}^+$	$\forall k \in \{1, \cdots, nP\}, \forall s \in \{1, \cdots, nS\}$	(25)
$DBmax \in \mathbb{R}$		(26)

Les contraintes (1) et (2) assurent que chaque produit est séquencé sur une seule position, et que chaque position est occupée par un seul produit.

Les contraintes (3) et (4) permettent de calculer la distance entre deux produits dans la séquence. Du fait des critères d'optimisation D_{i_1,i_2}ne peut jamais être strictement supérieur aux deux quantités du membre de droite.

Les contraintes (5) et (6) lient les variables de précédence et les variables de position dans la séquence.

Les contraintes (7) permettent de respecter le nombre maximum de produits successifs dans la séquence pour chaque station.

Les contraintes (8) permettent le respect de la distance minimale entre deux produits critiques au grenaillage.

Les contraintes (9) permettent de compter le nombre de produits moins prioritaire qui précèdent le produit i dans la séquence.
Les contraintes (10) et (11) déterminent la nécessité de purge de peinture.
Les contraintes (12) déterminent si le produit en position j est déchargé sur une station de numéro strictement inférieur au produit en position $j+1$.
Les contraintes (13) permettent de calculer l'indicateur de qualité des séquencement pour chaque colis b. Les contraintes (14) actualisent la valeur de $OBmax$.
Les contraintes (15) permettent de calculer la distance entre deux produits les plus éloignés dans la séquence du colis b. Les contraintes (16) actualisent la valeur de $DBmax$.
Les contraintes (17) et (18) permettent de déterminer pour chaque station et chaque sous-séquence depuis l'origine, l'écart entre les taux de produits séquencés et le taux pour l'ensemble des produits.
Les contraintes (19-26) définissent les domaines de validité des variables.

Les objectifs

Les indicateurs de performance du séquencement sont nombreux. Voici ceux que nous retiendrons pour la suite de l'étude. Ils se regroupent en trois catégories : Le respect des délais, la qualité de l'approvisionnement des lignes de montage, et l'optimisation du fonctionnement de l'atelier grenaillage-peinture.

Le respect des délais

$Q = \sum_{i=1}^{nP} Q_i$: mesure le respect des délais pour la séquence. $Q = 0$ indique que la séquence respecte la règle EDD (Earliest Due Date). Plus Q est élevé, moins la séquence respecte cette règle.

La qualité de l'approvisionnement des lignes de montage

$S = \sum_{\mathrm{j}=1}^{\mathrm{nP}-1} \mathrm{S_j}$: mesure la réduction des blocages des tables de dépendage qui sont placées en série. Une valeur de S faible indique qu'il y a peu de blocages.
$T = \sum_{s=1}^{nS} \sum_{k=1}^{nP} T_{k,s}$: mesure le lissage de la charge de travail au dépendage, *i.e.* que l'on respecte bien les ratios de produits à envoyer sur chaque poste de dépendage.
$DB = \sum_{b=1}^{nB} DB_b$: mesure le fait que les produits qui doivent être assemblés sur les lignes de montage ne sont pas trop éloignés dans la séquence de production. Si l'on souhaite regarder le plus mauvais des colis, l'indicateur $DBmax$ est le plus approprié.
$OB = \sum_{b=1}^{nB} OB_b$: mesure le respect de l'ordre des produits dans les colis, ce qui réduit les manutentions et les stockages inutiles au montage. Plus la valeur de OB, faible et plus l'ordre des produits dans les colis est respecté. Si l'on souhaite regarder le plus mauvais séquencement parmi les colis, l'indicateur $OBmax$ est le plus approprié.

L'optimisation du fonctionnement de l'atelier grenaillage-peinture

$C = \sum_{j=1}^{nP-1} C_j$: mesure le nombre de purges à l'atelier de peinture.

La modélisation a conduit à de nombreux objectifs de nature diverses, comme la minimisation du nombre de purges (le nombre de changement de couleur), les retards, la violation des relations de précédence entre les produits du même colis, etc. La question cruciale est de savoir « comment prendre en compte simultanément l'ensemble de ces objectifs afin de garantir un fonctionnement harmonieux et optimisé du système de production ? ».

IV.2.3 Unification des objectifs : Transformant un problème multi-objectif en un problème mono-objectif

Cette section aborde la principale difficulté liée à l'arbitrage entre des objectifs conflictuels, rendant la prise de décision complexe. Dans un souci de simplification, l'objectif lié au respect des délais a été éliminé. Cette décision repose sur la spécificité du séquencement, qui s'effectuera sur une courte période. Dans ce contexte, tous les travaux partagent, le plus souvent, la même échéance, éliminant la nécessité de considérer des délais individuels. Cette approche simplifiée permet de focaliser l'optimisation sur les autres objectifs, facilitant ainsi le processus de prise de décision.

En ce qui concerne les objectifs restants, une analyse détaillée a été menée, impliquant une évaluation et une valorisation de chacun, avec une normalisation vers une unité commune, en l'occurrence l'euro. À titre d'exemple, le coût associé à une purge (un changement de couleur) a été mesuré à environ 18€/purge, prenant en compte divers facteurs tels que la quantité de peinture gaspillée, le coût moyen de la peinture, le coût associé au temps de changement de série, etc. Cette évaluation des coûts est réalisée en collaboration avec les différents acteurs impliqués, conformément aux principes de la démarche Lean, assurant ainsi une évaluation approfondie et collective. Cette méthodologie a étendue autres objectifs, comme le montre le *Tableau 9*.

Cette approche a abouti à l'établissement d'un objectif global unique, qui est la minimisation des coûts. Par conséquent, la fonction objectif globale, normalisée pour inclure toutes les sous-fonctions à minimiser, peut être exprimée comme suit :

$$\mathrm{MinZ} = 54 * \sum_{j=1}^{nP-1} C_j + 15 * \sum_{s=1}^{nS} \sum_{k=1}^{nP} T_{k,s} + 5 * \sum_{j=1}^{nP-1} S_j + 20 * \sum_{b=1}^{nB} OB_b \; + 15 * \sum_{b=1}^{nB} DB_b$$

Le calcul de l'optimisation doit s'effectuer sous les contraintes citées dans la section précédente.

L'étude souligne la complexité inhérente aux problèmes de séquencement dans les environnements de production multi-étapes, accentuée par la diversité croissante des produits et la nécessité de répondre à des contraintes variées. La résolution de ces problèmes devient ainsi un défi majeur. Dans le contexte des problèmes NP-difficiles, le nombre d'opérations nécessaires pour résoudre le problème de manière exhaustive (en essayant toutes les solutions possibles) augmente de manière exponentielle avec la taille du problème. Selon (Ruiz et al., 2006) les méthodes exactes ne peuvent être utilisées que lorsque le nombre de tâches est inférieur à 20. Ce qui les rend impraticables pour des instances de problèmes de taille significative, comme c'est le cas pour le problème étudié. Face à ces limites, la recherche se tourne souvent vers des méthodes approchées, qui peuvent fournir des solutions de qualité acceptable dans des délais raisonnables.

Tableau 9 : Evaluation et valorisation des objectifs

Indicateur	**Signification**	**Impact**	**Mesure de l'impact**	**Coût associé**
Peinture: nombre de purges $C = \sum_{j=1}^{nP-1} C_j$	mesure le nombre de purges à l'atelier de peinture	cout matière et main d'œuvre	**18 euros par purge par pistolet * 3 pistolets: 54€**	$54 * \sum_{j=1}^{nP-1} C_j$
Dépendage: respect du stock tampon $T = \sum_{s=1}^{nS} \sum_{k=1}^{nP} T_{k,s}$	mesure le respect du lissage de la charge de travail au dépendage	arrêt du convoyeur prolongé au niveau d'une table de dépendage	**perte d'efficience au dépendage: 15€**	$15 * \sum_{s=1}^{nS} \sum_{k=1}^{nP} T_{k,s}$
Dépendage: Blocage-dépendage $S = \sum_{j=1}^{nP-1} S_j$	mesure la réduction des blocages des tables de dépendage qui sont placées en série	blocage des EMS orientés pour les postes aval	**perte d'efficience au dépendage: 5€**	$5 * \sum_{j=1}^{nP-1} S_j$
Montage: respect de l'ordre de montage $OB = \sum_{b=1}^{nB} OB_b$	mesure le respect de l'ordre des produits dans les colis	saturation de la zone de montage	**Perte de productivité au montage: 20€**	$20 * \sum_{b=1}^{nB} OB_b$
Montage: distance entre les EMS d'un même colis $DB = \sum_{b=1}^{nB} DB_b$	mesure le fait que les produits qui doivent être assemblés sur les lignes de montage ne sont pas trop éloignés dans la séquence de production	saturation de la zone de montage	**Perte de productivité au montage: 15€**	$15 * \sum_{b=1}^{nB} DB_b$

IV.3. Revue de la littérature

Les méthodes approchées occupent une place prépondérante dans la résolution des problèmes NP-difficiles pour de grandes instances (Abreu et al., 2020 ; Yu et al., 2018; Umam et al., 2022). Ces méthodes impliquent la recherche de solutions qui se rapprochent de la solution optimale tout en maintenant une complexité temporelle raisonnable, contrairement aux méthodes exactes.

Ces méthodes sont classées en deux catégories à savoir les métaheuristiques à solution unique et à population (voir *Figure 58*).

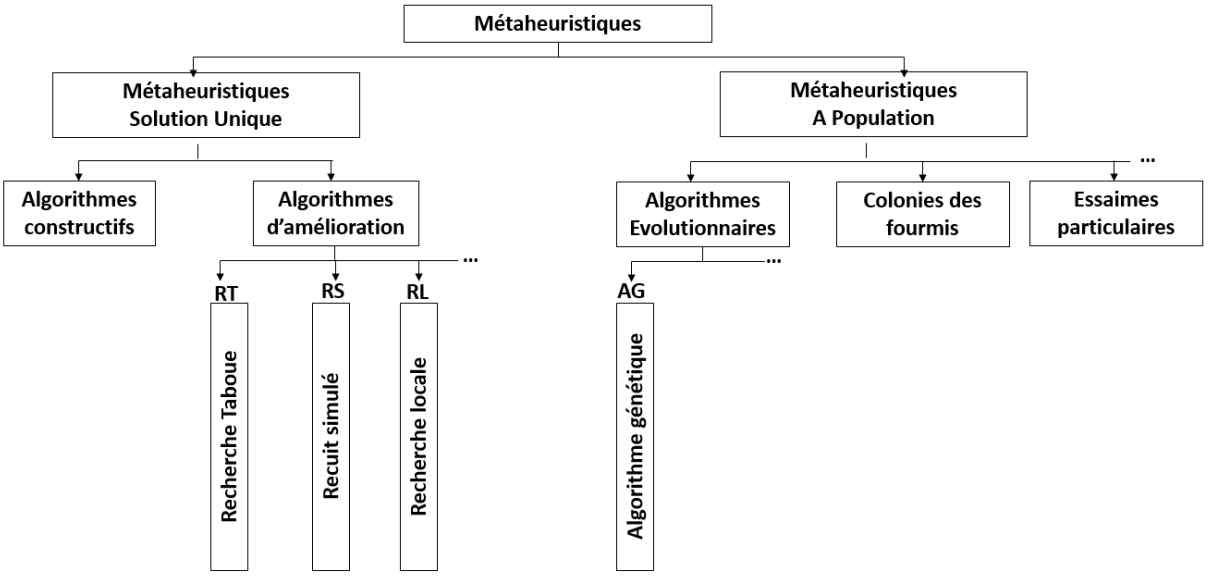


Figure 58 : Classification des méthodes approchées

Le mot "heuristique" est utilisé pour décrire un algorithme ou une procédure qui se base sur des expériences pratiques. Johnson a développé la première technique heuristique en 1951, pour résoudre les problèmes d'ordonnancement. Depuis lors, plusieurs chercheurs ont proposé des métaheuristiques à solution unique pour résoudre le problème de Flow-Shop à N machines de différentes tailles, dans un temps de calcul raisonnable (Kirkpatrick et al., 1083 ; Glover, 1989, 1990) Ces métaheuristiques à solution unique peuvent être classé en algorithmes constructifs et d'amélioration locale (Rolf et al.,2020). Les premiers sont des techniques qui construisent un planning réalisable à partir de zéro, et les seconds sont des algorithmes qui cherchent à améliorer un planning initial.

Plusieurs algorithmes constructifs ont été développées par les chercheurs pour résoudre les problèmes flow shop NP-difficiles (Nawaz et al.,1983 ; Newton et al., 2019). Ces approches s'appuient sur des données locales pour formuler des stratégies de planification. Les algorithmes constructifs sont très rapides mais fournissent le plus souvent des solutions de qualité mauvaise.

En outre, les métaheuristiques d'amélioration améliorent une solution initiale en effectuant de manière itérative une recherche de voisinage basée sur certains opérateurs locaux (Talbi, 2009). Les métaheuristiques bien connues comprennent le recuit simulé (RS), la recherche tabou (RT), et la recherche locale (RL). Cependant, les métaheuristiques à solution unique développées dans la littérature s'arrêtent après un nombre prédéfini d'étapes à des optima locaux (Khurshid et al., 2021 ; Talbi, 2009), car les étapes simples de minimisation ne conduisant pas nécessairement à des minima globaux.

Les métaheuristiques à plusieurs solutions candidates, appelées population sont particulièrement utiles pour les problèmes qui ne peuvent pas être efficacement optimisés par des méthodes mathématiques (Katoch et al., 2021). En contrôlant les paramètres opérationnels de l'algorithme et en effectuant un grand nombre d'itérations, les métaheuristiques à population produisent des résultats bien meilleurs pour les problèmes de flow shop NP-difficiles par rapport aux métaheuristiques à solution unique (Yu et al., 2018; Khurshid et al., 2021; Jungwattanakit et al., 2009). Parmi les métaheuristiques à population les plus connues, citons l'algorithme génétique (AG) (Andrade et al.,2019), l'algorithme de colonie artificielle d'abeilles (ABC) (Xuan et al.,2019), l'optimisation des essaims de particules (PSO) (Liao et al., 2012) et l'algorithme d'optimisation des colonies de fourmis (ACO) (Engin et Güçlü, 2018).

Au cours de la dernière décennie, l'AG a gagné en applications et est parmi les plus répandus dans la résolution des problèmes flow shop NP-difficiles (Yu et al.,2018 ; Bisht et al., 2020 ; Keskin et Engin, 2021 ; Andrade et al.,2019). En effet, l'AG se distingue par sa capacité à produire rapidement des résultats de haute qualité pour explorer des espaces de solutions complexes, ainsi que par sa forte adaptabilité à l'optimisation globale (Umam et al., 2022). Cependant, il manque d'adaptabilité à l'exploration approfondie des solutions au niveau local (Khurshid et al., 2021). Ainsi, d'importantes recherches ont été menées sur l'hybridation de l'algorithme génétique avec des méthodes de recherche locale (Costa et al., 2017). Cette démarche vise à combiner une technique de recherche globale avec une technique de recherche locale afin d'affiner les résultats. En effet, en exploitant les avantages de certaines méthodes de recherche locale, il est possible d'améliorer les performances de l'algorithme de base (Raidl et al., 2019).

Dans la suite de cette section, nous présenterons d'une part, l'algorithme de recherche locale et ses opérateurs de voisinage. D'autre part, nous présenterons l'algorithme génétique, et ses différents types d'opérateurs génétiques en discutant de leurs avantages et inconvénients. Et enfin, nous aborderons également différentes approches d'hybridation de l'algorithme génétique avec la méthode de recherche locale. Dans la section d'après (section III), nos différents algorithmes développés seront présentés ainsi que les résultats d'expérimentation.

IV.3.1 Recherche locale

La méthode de recherche locale est une approche simple et gourmande qui explore un espace de recherche de solutions en se concentrant sur les solutions voisines (proches) d'une solution initiale (Yan et al., 2021). Cette méthode a été couronnée de succès dans la résolution de divers problèmes d'optimisation, comme en témoignent des travaux antérieurs (Ishibuchi et Murata, 1998, Tseng et Lin, 2009).

L'idée de base est de partir d'une solution initiale et de se déplacer progressivement vers des solutions voisines, en évaluant et en comparant la qualité de ces solutions par rapport à la fonction objectif du problème, comme la somme des temps d'exécution des tâches, le nombre de contraintes violées ou le coût de la solution. La solution initiale est maintenue comme solution actuelle jusqu'à ce qu'une meilleure solution soit identifiée.

Dans sa forme la plus élémentaire, à chaque itération, de nouvelles solutions sont générées à partir de la solution courante en appliquant un opérateur de voisinage. Si l'une de ces nouvelles solutions améliore la solution courante, elle devient la nouvelle solution actuelle et le point de départ de l'itération suivante. Dans le cas contraire, l'algorithme prend fin lorsqu'un critère d'arrêt est satisfait, comme le nombre d'itérations maximal, l'absence d'amélioration significative, ou la satisfaction d'un certain seuil de qualité de solution. Ce qui signifie que la recherche locale a convergé vers un minimum local.

Un pseudo-code de cette méthode est présenté dans la *Figure 59* :

Pseudo-code de la recherche locale

1: X* ◄— X_0 ; La solution actuelle est la solution initiale
2: **tant que** (/* critère d'arrêt n'est pas atteint */) **faire**
3: V(X*) ◄—GénérerVoisinage(); Solutions voisines de la solution actuelle sont générées par un opérateur de voisinage
4: **pour chaque** X' € V(X*) **faire**
5: **si** (X' est meilleure que X*) **alors;** Si la solution voisine est meilleure que la solution actuelle
6: X* ◄— X'
7: Aller à l'itération suivante
8: **fin si**
9: **fin pour**
10: Aller à l'itération suivante
11: **fin tant que**

Figure 59 : Algorithme de la recherche locale

À chaque itération des méthodes itératives, un nombre limité d'affectations appelé "espace de voisinage" est généré à partir d'une solution donnée (solution courante). La construction d'un voisinage est définie par des transformations élémentaires. Ces transformations sont des opérations qui permettent de changer une solution π en une autre solution voisine π'.

L'espace de voisinage V (π) est l'ensemble de solutions localement proche, que l'on peut obtenir en appliquant à π une transformation locale élémentaire.

Dans le contexte des problèmes flow shop NP-difficiles, quelques transformations élémentaires sont particulièrement pertinentes (Pagnozzi et Stützle, 2019) :

- **L'opérateur de transposition :** Il consiste à échanger la position de deux tâches consécutives dans une séquence donnée. C'est-à-dire qu'une solution candidate π = {π(1)...π(i)π(i + 1)...π(n)} est modifiée à π = {π(1)...π(i + 1)π(i)...π(n)} pour les positions i = 1, . . . , n − 1.
  Ce voisinage est de taille n-1 et peut donc être exploré très rapidement.

- **L'opérateur d'échange (SWAP) :** Quant à lui consiste à permuter deux taches données. π = {π(1)...π(i) ...π(k)...π(n)} est modifiée à π = {π(1)...π(k)...π(i)...π(n)} avec i, k = 1, . . . , n; i≠k.
  Le voisinage d'échange est de taille n (n − 1) /2 et contient le voisinage de transposition en tant que sous-ensemble.

- **L'opérateur d'insertion** : Supprime une tâche à une position i et l'insère dans une position K différentes, c'est-à-dire qu'il transforme une séquence π = {π(1)...π(i − 1)π(i)π(i + 1)...π(k)π(k + 1)..., π(n)} en π = {π(1)...π(i − 1)π(i + 1)...π(k) π(i)π(k + 1)..., π(n)} avec i, k = 1, . . . , n; i≠k.
  Le voisinage d'insertion est de taille n(n−1) et contient le voisinage de transposition en tant que sous-ensemble.

IV.3.2. Algorithme génétique

L'AG a été développé dans les années 1960 (Holland, 1975), comme une technique de recherche adaptative pour les problèmes d'optimisation combinatoire. Il s'inspire de la théorie de l'évolution naturelle, notamment la sélection de Darwin. Ce type d'algorithme est aussi appelé algorithme évolutionniste.

Des études menées par (Reeves, 1995) ont conclu que l'AG, en comparaison avec le recuit simulé (RS), produise des résultats similaires pour le problème de séquencement des ateliers flow shop. Cependant, l'AG est plus performant pour les problèmes de grande envergure, et atteignent des solutions proche de l'optimale. Les expérimentations réalisées par (Oguz et Ercan, 2005) démontrent également que l'AG surpasse l'algorithme de RT pour les problèmes flow shop NP-difficiles, notamment dans la minimisation du temps total de réalisation ou makespan (Cmax). Ces conclusions ont été corroborées par (Ruiz et al., 2006), confirmant que l'AG présente des résultats compétitifs pour l'optimisation du makespan dans le contexte des problèmes flow shop NP-difficiles, comparativement à d'autres métaheuristiques bien connues. Récemment, (Rolf et al., 2020) ont résolu un problème flow shop NP-difficile à l'aide d'un algorithme génétique et ont constaté que l'AG obtient de meilleurs résultats que les simples procédures de répartition appliquées dans la pratique industrielle. De manière similaire, dans d'autres études (Andrade et al., 2019 ; Rao et al., 2020), l'efficacité de l'AG dans la résolution de problèmes Flow shop mono et bi-objectifs a été démontrée.

IV.3.2.1 Le cadre général d'un algorithme génétique

Le principe de fonctionnement d'un AG est décrit comme suit; Tout d'abord, un ensemble de solutions de problèmes est généré, appelé population. Chaque solution est représentée sous forme d'une chaîne de gènes, appelée chromosome, et chaque solution est évaluée en fonction de sa performance par rapport à l'objectif défini, cette évaluation est appelée "fitness". À chaque itération, une nouvelle population est générée à partir de la précédente en utilisant trois opérateurs inspirés de processus biologiques : la sélection, le croisement et la mutation (Sivanandam et Deepa, 2008).

L'opérateur de sélection choisit des individus de la population existante pour former une génération parentale. L'opérateur de croisement génère de nouvelles solutions (progéniture) en fusionnant les individus parents, tandis que l'opérateur de mutation apporte un changement dans le schéma des chromosomes sélectionnés, dans le but d'éviter toute convergence prématurée vers des optima locaux (Rolf et al., 2020 ; Costa et al.,2017).

L'algorithme procède en faisant évoluer la population au fil des générations successives, remplaçant progressivement les individus moins performants par des individus meilleurs. Le processus continue jusqu'à ce qu'un critère d'arrêt soit atteint, tel qu'un nombre fixe de générations ou l'atteinte d'un niveau de fitness satisfaisant (Umam et al.,2022 ; Keskin et Engin, 2021).

IV.3.2.2 Les opérateurs de l'algorithme génétique

L'AG utilise trois opérateurs clés pour mener à bien le processus de recherche : la sélection, le croisement et la mutation. Ces opérateurs sont détaillés ci-dessous :

L'opération de sélection :

L'opération de sélection parfois appelée opérateur de reproduction (Rolf et al.,2020), détermine quelles solutions participeront au processus de reproduction. Le taux de convergence des algorithmes génétiques dépend de la façon dont les solutions les plus performantes sont privilégiées, ce qui est appelé la pression de sélection. Les méthodes de sélection les plus courantes sont le Rang, la roulette et le tournoi. Dans toutes ces procédures, l'objectif est de choisir deux parents, désignés parent1 et parent2, pour une opération de croisement ultérieure.

Dans la méthode de sélection par rang : chaque individu de la population est évalué selon sa fonction fitness. Cette évaluation attribue un score à chaque individu en fonction de sa qualité. Une fois que la fonction fitness de chaque individu a été évalué, les individus sont triés en fonction de leur score, du meilleur au pire. Chaque individu se voit attribuer un rang en fonction de sa position dans la liste triée des individus. La meilleure solution dans la population actuelle prend une valeur égale à la

taille de la population, la deuxième meilleure solution prend la valeur de la meilleure solution moins un, et ainsi de suite. Cependant, avec cette méthode de sélection, le même individu peut être sélectionné plusieurs fois. Cela réduit la diversité des parents pour la reproduction et peut provoquer une convergence prématurée (Katoch et al., 2021).

Dans la sélection par roulette (Roulette Wheel Sélection ou RWS) : introduite par (Goldberg, 1989), la population est représentée sous forme d'une roue de roulette, où chaque individu est représenté par une section proportionnelle à sa valeur de fitness. La sélection d'un individu se fait en tournant la roue en face d'un pointeur fixe. Cette procédure est répétée jusqu'à constitution complète de la population des parents (Oguz et Ercan, 2005 ; Yu et al.,2018, Costa et al.,2017). Cependant, l'inconvénient majeur de cette méthode est que les individus ayant une meilleure valeur de fitness ont une probabilité plus élevée d'être sélectionnés pour la reproduction, ce qui peut entraîner une perte de diversité génétique dans la population et limiter l'exploration de l'espace des solutions (Katoch et al., 2021).

La sélection par tournoi : quant à elle est l'une des sélections les plus utilisées dans les algorithmes évolutionnaires (Umam et al., 2022). Elle a montré ses performances dans de nombreux travaux de recherche (Ruiz et Maroto, 2006 ; Tang et liu, 2002 ; Masmoudi et al., 2017 ; Abreu et al., 2020). Cette méthode consiste à sélectionner aléatoirement un certain nombre d'individus de la population et à choisir les meilleurs individus (ou le pire, selon le contexte) parmi eux pour former les deux parents pour la reproduction. Ainsi, la procédure de sélection combine hasard et pression sélective (Katoch et al., 2021).

L'opérateur de croisement :

Une fois que deux chromosomes parents ont été sélectionnés, chaque couple de sous-chromosomes appartenant aux solutions parentales subit un croisement. L'opérateur de croisement génétique génère de nouvelles séquences ou descendants en combinant les parents sélectionnés pour générer une progéniture. L'objectif est d'obtenir une descendance améliorée, générant ainsi des séquences de meilleure qualité après le croisement des parents. De nombreux opérateurs de croisement généraux et spécifiques ont été proposées dans la littérature (Keskin et Engin,2021). Pour les problèmes de séquencement, l'absence d'éléments répétés ou manquants est cruciale pour garantir la légalité de la séquence. Le croisement à deux points (Two Point Crossover - TPC), le croisement de commande (Order Crossover - OX), et le croisement basé sur la position (Position Based Crossover – PBC), ont été largement utilisés dans les algorithmes génétiques appliqués aux problèmes NP-difficiles de type flow-shop (Costa et al., 2017 ; Rolf et al., 2020 ; Umam et al., 2022).

Dans le croisement à deux points (TPC) : deux positions sont sélectionnées aléatoirement et chaque sous-chromosome parent est divisé en trois blocs : le premier et le troisième bloc sont copiés directement dans la progéniture correspondante, tandis que les éléments appartenant au deuxième bloc sont réorganisés au sein de la progéniture dans le même ordre tels qu'ils apparaissent chez l'autre

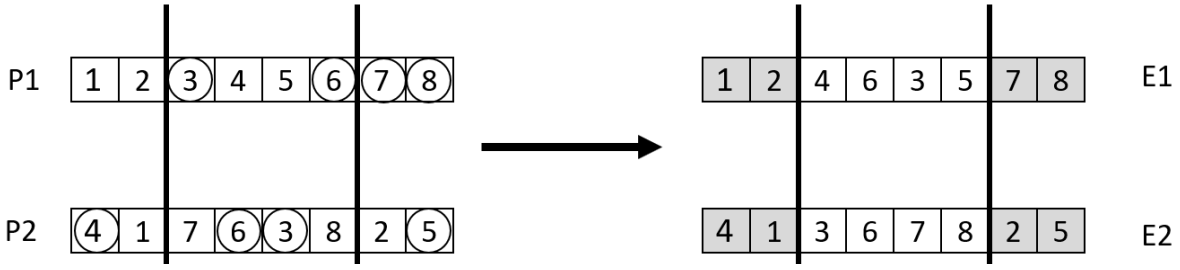


Figure 60: Opérateur de croisement à deux points

parent (Costa et al.,2017). La *Figure 60* illustre cet échange d'informations génétiques entre les points de croisement.

L'opérateur de croisement de commande (OX) **:** choisit deux points aléatoires de croisement. L'enfant hérite des éléments situés entre les deux points de croisement, inclus, du premier parent. Ces éléments occupent les mêmes positions, et donc apparaissent dans le même ordre que dans ce dernier. Tandis que, les éléments restants sont hérités du deuxième parent dans l'ordre dans lequel ils apparaissent dans ce parent (Rolf et al., 2020). La *Figure 61* illustre un exemple de ce croisement.

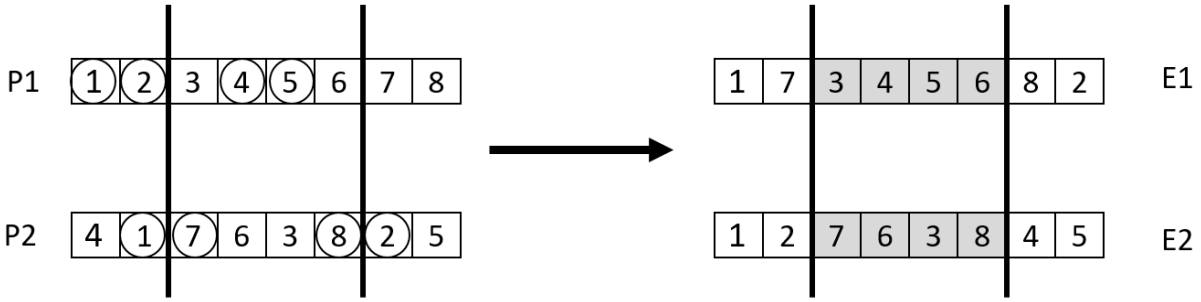


Figure 61 : Opérateur de croisement OX

L'opérateur de croisement basé sur la position (PBC) : quant à lui, sélectionne aléatoirement des positions dans les chromosomes parentaux (Costa et al., 2017). Les éléments sélectionnés du parent 1 (P1) sont réorganisés dans la progéniture 1 (E1) selon leur ordre dans le parent 2, puis les éléments non sélectionnés du parent 1 sont positionnés dans la séquence (E1). Cette procédure est répétée pour le parent 2 afin d'obtenir une progéniture2 (E2). Les positions sélectionnées sont les mêmes, mais les éléments du parent 2 sont réorganisés selon l'ordre du parent 1. La *Figure 62* illustre l'application de la PBC.

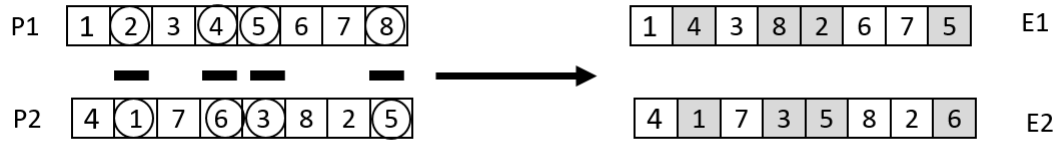


Figure 62 : Opérateur de croisement PBC

L'opérateur de mutation :

Les algorithmes génétiques intègrent un opérateur de mutation principalement pour accroître la diversité de la population et éviter la convergence vers des optimaux locaux. En effectuant une mutation sur un individu, nous apportons de légères modifications à sa séquence, ce qui permet d'introduire un nouvel individu.

Trois principaux opérateurs de mutation sont utilisés dans la littérature (Yu et al., 2018) :

- Insertion : un élément est choisi aléatoirement et déplacé d'un nombre aléatoire de positions vers la droite ou la gauche (Reeves, 1995 ; Tang et liu, 2002 ; Yu et al.,2018 ; Ruiz et al., 2006).
- Echange : deux éléments de la séquence sont choisis aléatoirement et échangés entre eux (Umam et al.,2022 ; Koohestani, 2020 ; Costa et al.,2017).

- SWAP : Il s'agit d'un cas particulier d'échange, où deux positions consécutifs sont sélectionnées et leurs valeurs sont échangées (Abreu et al.,2020).

Des tests préliminaires dans différentes études ont montré que la mutation d'insertion surpassait nettement les deux autres opérateurs de mutation dans de nombreux cas (Yu et al., 2018 ; Reeves, 1995 ; Ruiz et al., 2006; Oguz et Ercan, 2005).

IV.3.3 Algorithme génétique hybride

Dans l'algorithme génétique hybride, des techniques de RL sont intégrées aux algorithmes génétiques pour améliorer leurs performances (Keskin et Engin, 2021). L'un des principaux défis de l'hybridation est le compromis entre la recherche globale et la recherche locale en termes de temps et d'effort de calcul. Cela soulève des questions sur le moment d'intégrer la technique RL, sur quels individus de la population de l'AG appliquer la technique RL, et quel niveau d'effort de calcul à consacrer à la technique RL.

Pour intégrer la recherche locale aux algorithmes génétiques, trois approches peuvent être utilisées :

Prétraitement avec recherche locale :

Cette approche consiste à appliquer une phase de recherche locale avant l'application des opérateurs génétiques (sélection, croisement, mutation) dans l'algorithme génétique, comme proposé par (Murata et al., 1996). Chaque individu de la population subit une amélioration locale avant d'être soumis aux opérateurs génétiques. Cela peut aider à améliorer la qualité initiale de la population et à guider l'algorithme vers des régions plus prometteuses de l'espace de recherche. Cependant, l'inconvénient de cette approche est que l'application de la recherche locale à tous les individus de chaque génération aboutit à un algorithme génétique très lent (Ruiz et al., 2006).

Post-traitement avec recherche locale :

Dans cette approche, une fois que l'algorithme génétique a été exécuté jusqu'à ce qu'il se termine, une phase de recherche locale est appliquée aux individus de la population finale. Cela permet d'affiner les solutions générées par l'AG et de les rendre plus proches de l'optimum local. Cette approche peut être moins coûteuse en termes de temps de calcul par rapport à la première approche, mais elle peut nécessiter une mise au point minutieuse des paramètres pour obtenir un bon équilibre entre l'exploration globale et l'exploitation locale. (Abreu et al., 2020) ont adopté une recherche locale à deux optima avec la meilleure stratégie d'amélioration, telle que présentée par (Naderi et al., 2011). Dans cette approche, la recherche locale est effectuée sur la meilleure progéniture générée par l'algorithme génétique, entraînant ainsi des améliorations significatives par rapport à une simple application de l'AG. (Masmoudi et al., 2011) ont limiter l'application de la RL à certains individus de la progéniture pour pallier les contraintes de temps de calcul.

Recherche locale comme complément aux opérateurs génétiques :

Cette approche utilise la technique de recherche locale comme un complément à la boucle de base des algorithmes génétiques (Opérateurs génétiques). Autrement dit, appliquer la recherche locale pour chaque progéniture nouvellement générée pour la déplacer vers un optimum local, puis remplacer les individus actuels par ces solutions localement optimales avant de remettre la progéniture à la population. Cette approche est communément appelée évolution lamarckienne expliquée par (Kennedy, 1993).

Chacune de ces approches a ses propres avantages et inconvénients, et le choix dépend souvent des caractéristiques spécifiques du problème à résoudre et des objectifs d'optimisation.

IV.4. Les approches développées

Dans notre étude, nous avons développé trois approches différentes pour aborder le problème de séquencement étudié : l'algorithme RL, l'AG, et l'AGH, une approche hybride combinant les deux premières. La *Figure 63* illustre les différentes étapes de chaque approche. Les sections qui suivent détailleront les algorithmes développés.

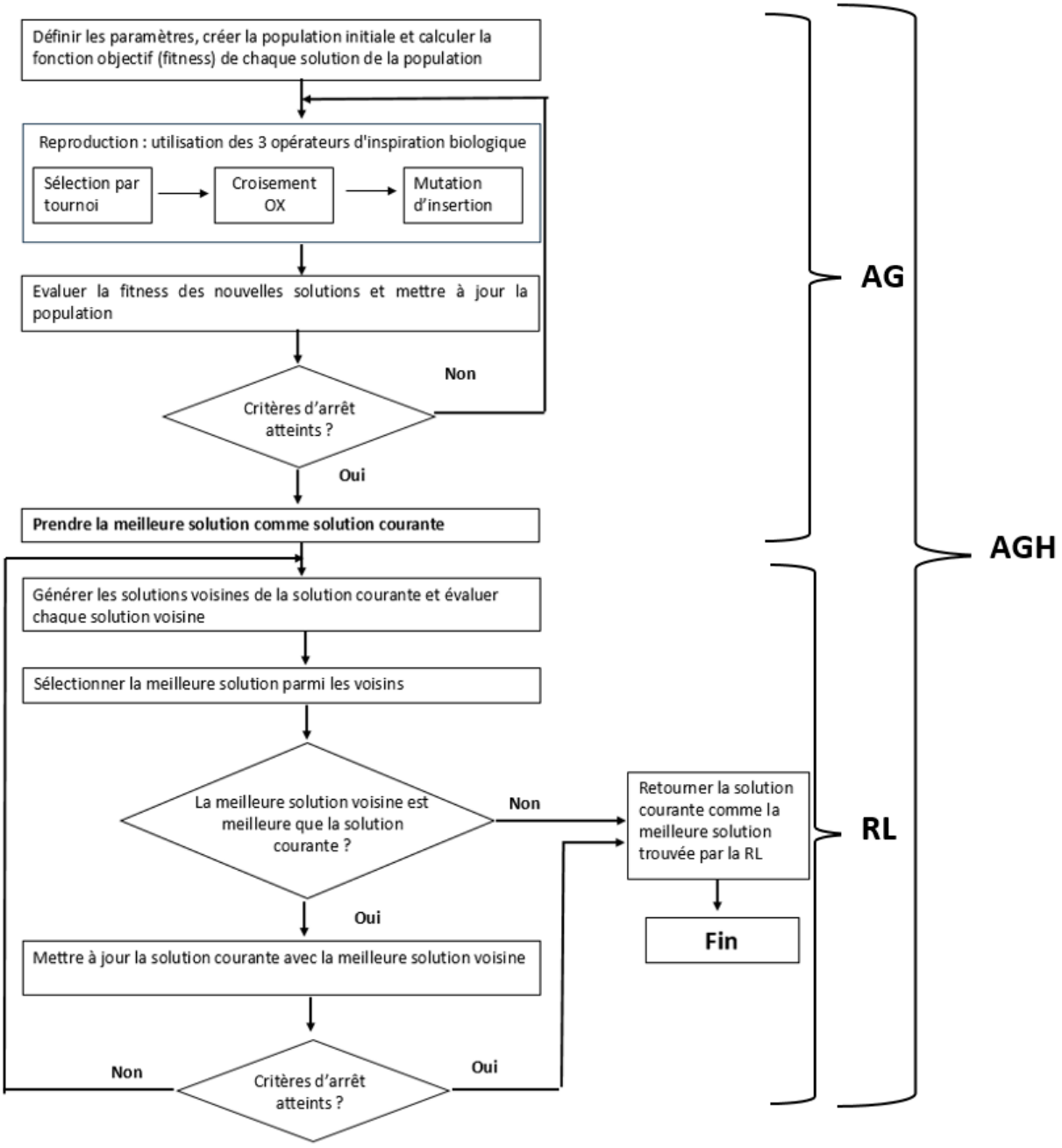


Figure 63 : Organigramme des approches développées

IV.4.1 Algorithme de recherche locale

Nous avons développé un algorithme de recherche locale pour améliorer itérativement une solution en examinant ses voisins. Plusieurs stratégies de recherche locale ont déjà été proposées pour résoudre des problèmes d'optimisation difficiles, et la forte performance de ce type d'algorithmes a été soulignée dans la littérature comme présentée dans la section II.1

Afin d'expliquer facilement notre implémentation de l'algorithme RL, nous avons opté pour l'opérateur d'échange (SWAP) comme un opérateur de voisinage. Notre procédure de RL commence avec la solution initiale générée par le planificateur. A l'itération zéro, la solution initiale est la solution courante (notée S_0). A chaque itération, l'algorithme RL commence par exploiter le voisinage de S_0, $V(\mathbf{S_0})$. Ensuite, la phase d'évaluation est appliquée pour examiner les affectations fraîchement générées. La solution du meilleur voisin est identifiée par la fonction objectif produisant une valeur meilleure que celle des autres voisins. Si une amélioration est observée, la solution voisine devient la nouvelle solution courante et le point de départ de l'itération suivante. Ce processus de génération et d'évaluation des solutions voisines est répété jusqu'à ce que l'opération de voisinage ne puisse améliorer la solution courante, ou bien le nombre d'itération max soit atteint. L'algorithme développé est présenté dans la *Figure 64*.

```
Algorithme RechercheLocale :
1:  solution_courante ← S0  // La solution actuelle est la solution initiale
2:  valeur_courante ← EvaluerSolution(solution_courante)
3:  meilleure_solution ← solution_courante
4:  meilleure_valeur ← EvaluerSolution(meilleure_solution)
5:  iteration ← 0

6:   TANT QUE (/* critère d'arrêt n'est pas atteint */) FAIRE :
7:     voisins ← GenererVoisins(meilleure_solution)
8:     POUR chaque voisin dans voisins FAIRE :
9:        valeur_voisin ← EvaluerSolution(voisin)
10:       SI valeur_voisin < meilleure_valeur ALORS :
11:          meilleure_solution ← voisin
12:          meilleure_valeur ← valeur_voisin
13:       FIN SI
14:    FIN POUR

15:    SI meilleure_valeur < valeur_courante ALORS :
16:       solution_courante ← meilleure_solution
17:       valeur_courante ← meilleure_valeur
18:    SINON :
19:       SORTIR
20:    FIN SI

21:    iteration ← iteration + 1
22:    SI iteration == max_iterations ALORS :
23:       SORTIR  // critère d'arrêt atteint
24:    FIN SI

25: FIN TANT QUE

26: RETOURNER meilleure_solution
```

Figure 64: Algorithme RL développé

Le pseudo-code de l'algorithme RechercheLocale débute en initialisant une solution de départ, nommée **solution_courante**, et en évaluant sa valeur à l'aide de la fonction objectif. Cette solution est aussi considérée comme la **meilleure_solution** initiale. Ensuite, l'algorithme entre dans une boucle

principale où il génère et évalue des solutions voisines à partir de la **meilleure_solution** actuelle. Si la meilleure solution parmi les solutions voisines a une valeur d'évaluation plus faible que la **meilleure_valeur** actuelle, elle devient la nouvelle **meilleure_solution**. Par la suite, l'algorithme compare la **meilleure_solution** trouvée avec la **solution_courante** et met à jour la **solution_courante** et sa valeur si une amélioration est détectée. Dans le cas contraire, l'algorithme sort de la boucle principale. Le processus se poursuit jusqu'à atteindre un critère d'arrêt, le nombre maximal d'itérations. En fin, l'algorithme retourne la **meilleure_solution** trouvée.

IV.4.2 Algorithme génétique

Cette section détaille la méthodologie de l'AG proposée pour résoudre le problème de séquencement étudié. En général, l'algorithme développé peut être décrit, comme illustré dans la *Figure 65*:

```
Algorithme Génétique:

1: InitialiserPopulation()   // Crée une population initiale aléatoire.

2: EvaluerPopulation(population)  // Évalue chaque individu de la population.

3: iteration ← 0
4: echecs_successifs ← 0

5: TANT QUE (iteration < max_iterations ET echecs_successifs < seuil_echec) FAIRE :

6:    SelectionnerParents(population) // Sélectionne des individus pour la reproduction, à l'aide de la sélection par tournoi
7:    Reproduire(parents) // Génère une nouvelle population à partir des parents sélectionnés, à l'aide de l'opérateur de
      croisement OX
8:    Muter(nouvelle_population) // Applique des mutations à la nouvelle population, à l'aide de la mutation d'insertion

9:    EvaluerPopulation(nouvelle_population) // Évalue la nouvelle population.

10:   RemplacerPopulation(population, nouvelle_population) // Remplace l'ancienne population par la nouvelle.

11:    SI aucune amélioration trouvée ALORS
12:       echecs_successifs ← echecs_successifs + 1
13:    SINON
14:       echecs_successifs ← 0
15:    FIN SI

16:    iteration ← iteration + 1

17:FIN TANT QUE

18: RetournerMeilleureSolution(population)  // Retourne la meilleure solution trouvée dans la population.
```

Figure 65: L'AG développé

L'algorithme démarre en initialisant une population aléatoire de solutions potentielles pour résoudre le problème étudié, dans ce cas, minimiser les coûts. Chaque solution potentielle est représentée par un individu dans la population, et chaque individu est évalué en fonction de sa capacité à atteindre cet objectif de minimisation des coûts. Cette évaluation est essentielle pour calculer le score de fitness de chaque individu, qui quantifie son adéquation à résoudre le problème en minimisant les coûts.

Ensuite, l'algorithme entre dans une boucle principale qui continue tant que deux critères d'arrêt ne sont pas atteints : le nombre maximal d'itérations autorisées et le seuil d'échecs successifs. Ces

critères sont mis en place pour garantir que l'algorithme ne s'exécute pas indéfiniment et pour éviter de rester bloqué dans une boucle sans fin.

À chaque itération de la boucle principale, une nouvelle génération de solutions est créée à partir de la génération actuelle. Cette création de nouvelle génération implique de sélectionner des individus parents dans la population actuelle, de les croiser pour produire une descendance, et d'appliquer des mutations à la descendance pour introduire de la diversité.

Une fois une nouvelle population générée, chaque individu est évalué en fonction de sa capacité à minimiser les coûts. Si aucune amélioration n'est observée par rapport à la génération précédente, le compteur d'échecs successifs est incrémenté. Sinon, il est remis à zéro.

L'algorithme continue d'itérer jusqu'à ce que l'un des critères d'arrêt soit atteint. Si le nombre maximal d'itérations est atteint ou si le nombre d'échecs successifs dépasse le seuil fixé, la boucle principale se termine. Enfin, l'algorithme retourne la meilleure solution trouvée dans la population finale, qui est celle ayant le score de fitness le plus bas, ce qui correspond à la solution avec les coûts les plus bas.

Par ailleurs, il serait judicieux d'expérimenter une approche hybride combinant l'algorithme génétique avec la recherche locale. Cette combinaison pourrait permettre de tirer parti des avantages des deux approches : l'exploration large de l'espace de recherche offerte par l'AG, tout en intégrant la précision de la RL. La section suivante explorera cette approche combinée.

IV.4.3 Algorithme génétique hybride

Pour la résolution du problème étudié, nous proposons un nouvel algorithme génétique hybride, visant à présenter des solutions de haute qualité dans des temps de calcul admissibles.

Dans cet algorithme, nous utilisons les fonctions et paramètres des AG et de RL développés précédemment. L'AGH commence par initialiser la population et évaluer ses performances. Puis, il applique l'AG pour obtenir une meilleure solution. Ensuite, il applique la RL sur la meilleure solution obtenue par l'AG pour affiner davantage la solution. Enfin, il retourne la meilleure solution améliorée obtenue après l'application de la recherche locale. Le pseudocode du l'AGH proposé est décrit dans la *Figure 66.*

```
Algorithme GénétiqueHybride:

1: population_initiale ← InitialiserPopulation()
2: EvaluerPopulation(population_initiale)
3: meilleure_solution_AG ← AlgorithmeGenetique(population_initiale)
4: meilleure_solution_RL ← AlgorithmeRechercheLocale(meilleure_solution_AG)
5: Retourner meilleure_solution_RL
```

Figure 66: L'AGH développé

IV.5. Résultats expérimentaux

Nos expérimentations se composent de deux parties. Tout d'abord, nous analysons la sensibilité des paramètres les plus importants du problème pour en tirer des meilleures stratégies de gestion. Par la suite nous nous concentrons sur l'évaluation des performances des algorithmes proposés lorsqu'il s'agit de traiter des instances de taille réelle.

Les expérimentations ont été menées sur un processeur Intel® CoreTM i7-2,6 GHz avec 32 Go de RAM, fonctionnant sous Windows 10. Tous les algorithmes ont été codés en Vb.net.

Nous générons six ensembles d'instances (T1, T2, T3, T4, T5, T6) avec des données réelles fournies par l'entreprise. Chacun des six ensembles d'instances de taille réelle contient un total de 5 instances avec les mêmes caractéristiques et un nombre différent de tâches. Chaque instance sur l'ensemble T1 (resp. T2, T3, T4, T5) contient 30 (resp. 60, 90 ,120, 180) tâches.

IV.5.1 Expérimentation de la recherche locale

La recherche locale nécessite la spécification de deux paramètres. Le premier paramètre, "taille_voisinage", représente la taille de la fonction de voisinage. En d'autres termes, il détermine le nombre maximum d'affectations potentielles générées par une fonction de voisinage spécifique. Cette valeur influence directement la diversité des solutions explorées pendant le processus de recherche locale. Dans le contexte de notre algorithme, la formule utilisée pour calculer la taille_voisinage est exprimée par : taille_voisinage = n(n-1) /2, où n représente le nombre de produits à séquencer.

Le deuxième paramètre, "nombre_max_iterations", contrôle le critère d'arrêt de l'algorithme en fonction du nombre maximal d'itérations autorisées. Une fois que le nombre d'itérations atteint cette valeur prédéfinie, l'algorithme cesse de chercher de nouvelles solutions et termine son exécution. Ce paramètre est crucial pour contrôler la durée et l'intensité de la recherche locale. Dans cet algorithme nombre_max_iterations est limité à 100 itérations.

Dans le cadre de notre étude, nous avons réalisé une série d'expériences visant à évaluer les performances de l'algorithme de RL sur des instances de taille réelle. L'objectif est de démontrer le comportement de cet algorithme dans des situations impliquant un grand nombre de tâches, tout en examinant l'évolution du temps de calcul.

Le *Tableau 10* présente les résultats expérimentaux de l'algorithme de recherche locale pour différents ensembles d'instances, allant de T1 à T6, avec des nombres respectifs de tâches de 30, 60, 90, 120, 150 et 180. Les données présentées comprennent les coûts initiaux des solutions avant l'application de l'algorithme RL, les coûts des solutions après son exécution, ainsi que les temps nécessaires à cette exécution.

Par exemple, l'instance 1 présente un coût initial de 740€, un coût post-algorithme RL (Coût RL) de 337€, et un temps d'exécution (Temps RL) de 00:00:08. L'instance 2 montre un coût initial de 805, un coût post-algorithme RL de 388, avec le même temps d'exécution de 00:00:08. Et ainsi de suite pour les autres instances de l'ensemble T1. Ces valeurs sont exprimées en euros (€) pour les coûts et en heures, minutes et secondes (hh:MM:SS) pour le temps d'exécution.

En analysant les résultats du *Tableau 10*, nous pouvons observer une réduction significative du coût de la solution initiale après l'application de l'algorithme RL. Cependant, le temps d'exécution de l'algorithme évolue de manière quadratique à mesure que la taille des instances augmente (*voir Figure 67*). Jusqu'à une taille de 90 tâches, le temps nécessaire pour l'exécution reste raisonnable, variant de quelques secondes à quelques minutes. Cependant, au-delà de cette taille, une augmentation rapide du temps d'exécution par rapport à la taille de l'instance devient évidente. Le temps d'exécution moyen passe de 45 min avec 120 tâches à 4h48min avec 180 tâches, comme illustré dans la *Figure 67.* Cette observation suggère que malgré que les performances de la RL soient satisfaisantes pour des instances de taille modérée, l'algorithme pourrait atteindre ses limites d'efficacité lorsqu'il est confronté à des instances de plus en plus grandes. Il est donc important de comparer ces performances avec d'autres méthodes de résolution.

Tableau 10 : Résultats expérimentaux de la RL

Instances	Ensemble T1 (30 tâches)			Ensemble T2 (60 tâches)			Ensemble T3 (90 tâches)		
	Coût initial	RL		Coût initial	RL		Coût initial	RL	
		Coût	Temps		Coût	Temps		Coût	Temps
Instance1	740	337	00:00:08	2357	1135	00:00:59	6071	2480	00:08:30
Instance2	805	388	00:00:08	3791	1506	00:01:35	6409	2204	00:14:18
Instance3	825	457	00:00:08	3792	1499	00:01:25	5778	2595	00:10:43
Instance4	1413	694	00:00:09	4367	2195	00:01:42	6914	2523	00:13:41
Instance5	1447	655	00:00:09	4035	2096	00:01:22	6198	2190	00:13:14

Instances	Ensemble T4 (120 tâches)			Ensemble T5 (150 tâches)			Ensemble T6 (180 tâches)		
	Coût initial	RL		Coût initial	RL		Coût initial	RL	
		Coût	Temps		Coût	Temps		Coût	Temps
Instance1	8608	3038	00:40:18	11396	4284	01:38:27	18167	4864	04:46:37
Instance2	8602	3556	00:56:14	11132	3257	01:57:27	17226	5349	04:51:57
Instance3	7826	2953	00:43:23	12353	3956	02:15:32	16496	5944	04:55:32
Instance4	7907	3214	00:43:40	12803	4465	02:12:34	19120	6181	04:49:48
Instance5	8728	3063	00:41:53	12947	5018	01:58:49	16386	5435	04:39:36

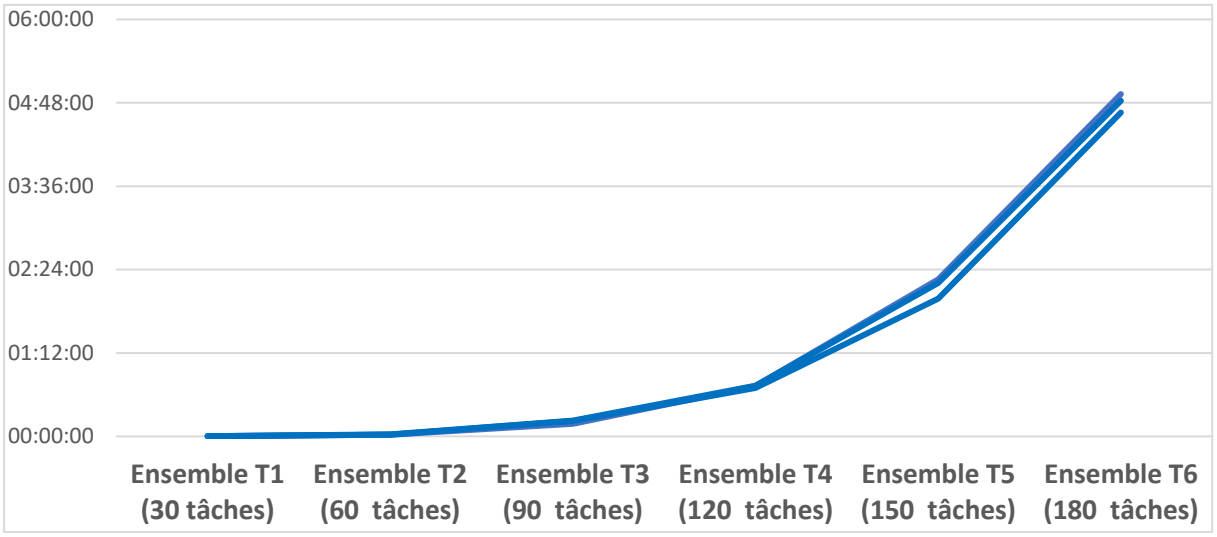


Figure 67: Evolution du temps d'exécution de la RL selon la taille des instances

IV.5.2 Expérimentation de l'algorithme génétique

L'efficacité de l'algorithme génétique dépend largement du bon choix de ses paramètres. Ces paramètres influent sur la performance de l'algorithme, notamment en termes de qualité des solutions trouvées, de convergence de l'algorithme et de temps de calcul. Voici les principaux paramètres à prendre en compte lors du paramétrage de l'algorithme :

- Taille de la population initiale (N) : Détermine le nombre d'individus dans la première génération de la population. C'est le point de départ de l'exploration de l'espace de recherche.
- Taille du tournoi : Correspond au nombre d'individus qui concourent entre eux pour être sélectionnés comme parents lors de la reproduction. Par exemple, une taille de tournoi de 2 signifie que deux individus sont sélectionnés aléatoirement pour chaque tournoi.
- Nombre maximal d'itérations : Indique le nombre maximum de générations que l'algorithme génétique effectuera avant de s'arrêter. Cela peut être utilisé comme critère d'arrêt pour limiter la durée d'exécution de l'algorithme.
- Nombre maximal d'échecs : Définit le nombre maximal d'itérations consécutives autorisées sans amélioration de la meilleure solution trouvée. Cela peut être utilisé comme un autre critère d'arrêt pour détecter les situations où l'algorithme semble être bloqué dans un optimum local.

L'ajustement de ces paramètres doit être minutieux et adapté aux spécificités du problème à résoudre, aux ressources de calcul disponibles et aux objectifs d'optimisation visés. Des expérimentations et des analyses approfondies peuvent s'avérer nécessaires pour déterminer les valeurs optimales de ces paramètres, garantissant ainsi des performances optimales de l'algorithme génétique dans la résolution du problème donné.

Lors de la sélection initiale de la taille de la population, il est important de trouver un équilibre entre une population trop petite, risquant de perdre la diversité, et une population trop grande, augmentant le coût de calcul. Des expérimentations peuvent être menées pour déterminer la taille optimale de la population, en tenant compte de la diversité et de la vitesse de convergence de l'algorithme.

Le *Tableau 11* présente les résultats d'une expérimentation visant à déterminer la taille optimale de la population pour des différents ensembles d'instances allant de T1 à T4, avec des nombres respectifs de tâches de 30, 60, 90 et 120, où chaque ensemble d'instances comprend cinq instances

distinctes. Chaque instance est lancée 5 fois en raison du caractère aléatoire dans la méthode et trois valeurs sont mesurées :

- **Meilleure valeur obtenue (Meilleure)** : La meilleure solution trouvée. La meilleure valeur correspond à la séquence qui a le cout le plus faible.
- **Moyenne des valeurs obtenues (Moyenne)** : Donne la moyenne des valeurs obtenues
- **Temps d'exécution moyen (temps moyen en secondes) :** Représente le temps moyen en secondes nécessaire pour l'exécution.

De plus, pour chaque ensemble, la moyenne des meilleures valeurs, des moyennes et des temps moyens est calculée pour chaque taille de population. Par exemple, pour l'ensemble T1 avec une taille de population de 30, la moyenne des meilleures valeurs est de 540, la moyenne des moyennes est de 616,16, et le temps moyen est de 00:00:03. Enfin, le *Tableau 11* inclut le taux d'amélioration de la moyenne des meilleures valeurs et des moyennes d'une taille de population par rapport à la taille de population précédente. Par exemple, entre une taille de population de 30 et 100, on observe une amélioration de 18% de la moyenne des meilleures valeurs et de 17% de la moyenne des moyennes. Tandis que l'évolution du temps de calcul en passant d'une population à une autre plus grande reste marginale, comme le montre la *Figure 68*.



Figure 68: Evolution du temps de calcul selon la taille de population

En analysant les résultats du *Tableau 11*, l'expérimentation révèle des stratégies optimales de taille de population pour améliorer les performances des AGs en fonction du nombre de tâches dans les ensembles d'instances. Pour les instances avec un nombre de tâches inférieur à 90, une amélioration significative est observée dans la moyenne des meilleures valeurs et des moyennes lorsque la taille de la population atteint 200. Au-delà de cette taille de population, les améliorations supplémentaires deviennent marginales, ce qui suggère que l'efficacité de l'algorithme atteint un point de saturation. Il est donc recommandé de ne pas dépasser une taille de population de 200 individus pour ce type d'instances. En revanche, pour les instances avec un nombre de tâches supérieur à 90, les améliorations sont très faibles, atteignant seulement 1% avec une taille de population dépassant 100.

Tableau 11 : Performances de l'AG selon la taille de la population et des instances

Instance $T_{n,i}$	Meilleur Coût	Moyenne Coût	Temps	Meilleur Coût	Moyenne Coût	Temps	Meilleur Coût	Moyenne Coût	Temps	Meilleur Coût	Moyenne Coût	Temps
$T_{30,1}$	372	430.2	00:00:02	342	422	00:00:06	337	366.8	00:00:12	332	351	00:00:17
$T_{30,2}$	441	505.8	00:00:02	313	358.4	00:00:06	313	335.8	00:00:13	313	319	00:00:22
$T_{30,3}$	417	434.6	00:00:02	348	381.2	00:00:08	377	385.2	00:00:16	328	388	00:00:22
$T_{30,4}$	760	872.6	00:00:03	596	680.4	00:00:07	547	605.2	00:00:15	542	607.8	00:00:23
$T_{30,5}$	710	837.6	00:00:04	625	702.6	00:00:09	630	732	00:00:20	575	648.6	00:00:34
La valeur moyenne	**540**	**616.1**	**00:00:03**	**444.8**	**508.92**	**00:00:07**	**440.8**	**485**	**00:00:15**	**418**	**462.9**	**00:00:23**
le taux d'amélioration lié à la taille de population				**18%**	**17%**		**1%**	**5%**		**5%**	**5%**	
$T_{60,1}$	1291	1438.4	00:00:33	1185	1284.6	00:00:54	1091	1194.2	00:01:22	1081	1153.8	00:01:55
$T_{60,2}$	1439	1732.8	00:00:36	1394	1481.2	00:01:00	1182	1309.6	00:01:38	1200	1272.8	00:02:15
$T_{60,3}$	1786	1833.4	00:00:39	1376	1504.6	00:01:10	1408	1552.8	00:01:53	1335	1433.2	00:02:21
$T_{60,4}$	1674	1922.6	00:00:50	1742	1859.4	00:01:15	1422	1561.6	00:02:05	1584	1636	00:02:24
$T_{60,5}$	1823	2117	00:00:51	1764	1926.2	00:01:10	1726	1819.8	00:02:13	1529	1734	00:02:32
La valeur moyenne	**1602.6**	**1808.8**	**00:00:42**	**1492.2**	**1611.2**	**00:01:06**	**1365.8**	**1487.6**	**00:01:50**	**1345.8**	**1446.0**	**00:02:17**
le taux d'amélioration lié à la taille de population				**7%**	**11%**		**8%**	**8%**		**1%**	**3%**	
$T_{90,1}$	2601	2780.4	00:03:42	2257	2541	00:04:14	2213	2456.2	00:04:10	2183	2380.8	00:04:11
$T_{90,2}$	2687	3043.4	00:03:37	2505	2705.4	00:04:19	2423	2732.4	00:04:22	2464	2769.2	00:04:24
$T_{90,3}$	2781	2955.8	00:03:17	2595	2750	00:04:06	2666	2855	00:04:09	2591	2720.4	00:04:16
$T_{90,4}$	2851	3185.2	00:03:35	2802	3047	00:04:19	2916	3019.4	00:04:16	2894	3194.8	00:05:48
$T_{90,5}$	2876	3181.6	00:04:21	2883	3081.2	00:04:10	2823	2995.8	00:04:17	2730	2871	00:04:21
La valeur moyenne	**2759.2**	**3029.3**	**00:03:43**	**2608.4**	**2824.9**	**00:04:14**	**2608.2**	**2811.8**	**00:04:15**	**2572.4**	**2787.2**	**00:04:36**
le taux d'amélioration lié à la taille de population				**5%**	**7%**		**0%**	**0%**		**1%**	**1%**	
$T_{120,1}$	3760	4074.2	00:07:24	3643	3843.4	00:07:42	3624	3810.8	00:08:34	3533	3866.8	00:08:20
$T_{120,2}$	3787	4035.6	00:07:46	3430	3767	00:08:58	3512	3784.6	00:09:30	3848	3947.4	00:09:27
$T_{120,3}$	3650	3938.8	00:09:13	3315	3726.4	00:09:25	3392	3558.6	00:09:32	3352	3544.2	00:09:33
$T_{120,4}$	3617	3924	00:09:06	3657	3842.8	00:09:27	3578	3780.2	00:09:23	3560	3657.6	00:09:31
$T_{120,5}$	3623	4114.8	00:09:19	3574	3909	00:09:24	3517	3790	00:09:27	3578	3676.2	00:09:24
La valeur moyenne	**3687.4**	**4017.5**	**00:08:34**	**3523.8**	**3817.7**	**00:08:59**	**3524.6**	**3744.8**	**00:09:17**	**3574.2**	**3738.4**	**00:09:15**
le taux d'amélioration lié à la taille de population				**4%**	**5%**		**0%**	**2%**		**-1%**	**0%**	

En conclusion, pour les instances avec un nombre de tâches inférieur à 90, il est recommandé de limiter la taille de la population initiale à 200 individus, tandis que pour celles avec un nombre de tâches égal ou supérieur à 90, une taille de population de 100 individus semble être plus appropriée.

Des expérimentations ont été également réalisées pour ajuster les paramètres restants, l'objectif étant de maintenir un rapport plus faible entre le temps d'exécution et les qualités des solutions retournées par cette méthode. Différentes combinaisons de valeurs ont été testées, et seule les meilleures valeurs sont retenues ici. Afin d'obtenir la meilleure combinaison de ces paramètres, l'ensemble T1 est utilisé pour tester l'impact de tous les paramètres en changeant la valeur d'un paramètre tout en maintenant les autres paramètres fixes. Les résultats préliminaires ont montré que le nombre maximal d'itérations a un impact significatif sur les performances de l'AG. Les valeurs finales de ces paramètres sont présentées dans le *Tableau 12*. Le nombre maximal d'itération est lié à la taille de l'instance. Par exemple, une instance de 60 tâches peut aboutir à la génération de 1770 affectations à chaque itération.

Tableau 12 : Paramètres de l'AG

Paramètre	Valeur
Taille de la population (N)	N=200 pour les instances avec nombre de tâches n<90 N=100 pour les instances avec nombre de tâches n≥90
Taille du tournoi	2
Nombre maximal d'itérations	n(n-1)/8
Nombre maximal d'échecs	100

Le *Tableau 13* montre les résultats obtenus avec le protocole que l'on vient de décrire. Pour analyser les performances de l'algorithme génétique à partir du tableau fourni, nous examinons chaque ensemble d'instances (T1 à T4) en termes de meilleures valeurs obtenues, moyennes des valeurs obtenues et temps d'exécution moyen en secondes après 10 exécutions de l'AG.

Nous avons également calculé l'écart entre la meilleure valeur et la moyenne des valeurs. Cet écart est exprimé en pourcentage et mesure la différence entre la meilleure valeur et la moyenne des valeurs par rapport à la moyenne avec la formule : $\frac{(\text{Moyenne AG} - \text{Meilleure AG})}{\text{Moyenne AG}} * 100$. Cela nous aide à évaluer la variabilité des résultats de l'AG. Un écart plus faible signifie que la meilleure valeur est proche de la moyenne, ce qui indique une bonne robustesse de l'algorithme.

En examinant les performances de l'AG à partir du tableau, nous observons que le temps nécessaire, pour trouver des solutions augmente avec le nombre de tâches, ce qui est cohérent car la complexité du problème augmente. Cependant, il est important de noter que le temps d'exécution reste raisonnable même pour des instances de grande taille, ce qui prouve l'efficacité de l'AG, comme le montre la *Figure 69.*

Tableau 13 : Résultats expérimentaux de l'AG

Instances	AG			AG			AG			AG		
	Meilleur Coût	Moyenne Coût	Temps	Meilleur Coût	Moyenne Coût	Temps	Meilleur Coût	Moyenne Coût	Temps	Meilleur Coût	Moyenne Coût	Temps
Instance1	337	366.7	00:00:13	1077	1181.1	00:01:19	2210	2400.5	00:04:06	3249	3440.2	00:09:08
Instance2	313	336.8	00:00:15	1188	1386.9	00:01:27	2548	2672.6	00:04:26	3593	3909.2	00:09:18
Instance3	323	378.8	00:00:14	1331	1554.8	00:01:29	2470	2643.7	00:04:14	2954	3199.4	00:09:15
Instance4	621	704.2	00:00:15	1687	1796.1	00:01:29	2669	3006.2	00:04:23	3430	3715	00:09:43
Instance5	701	785.6	00:00:16	1802	2025.5	00:01:33	2518	2745	00:04:25	3132	3434.7	00:09:14
Moyenne	459	514.4	00:00:14	1417	1588.9	00:01:27	2483	2693.6	00:04:19	3271.6	3539.7	00:09:19
Ecart entre la meilleure solution et la moyenne	**11%**			**11%**			**8%**			**8%**		

Tableau 14 : Résultats expérimentaux de l'AGH

	Ensemble T1 (30 tâches)			Ensemble T2 (60 tâches)			Ensemble T3 (90 tâches)			Ensemble T4 (120 tâches)		
Instances	AGH			AGH			AGH			AGH		
	Meilleur Coût	Moyenne Coût	Temps	Meilleur Coût	Moyenne Coût	Temps	Meilleur Coût	Moyenne Coût	Temps	Meilleur Coût	Moyenne Coût	Temps
Instance1	337	360.3	00:00:15	1008	1130.3	00:01:38	2023	2141.8	00:06:54	3006	3174.3	00:20:41
Instance2	313	332.3	00:00:17	1107	1274.4	00:01:51	2178	2432.8	00:08:15	2971	3419.5	00:23:44
Instance3	323	368.8	00:00:16	1251	1430	00:02:03	2102	2207.9	00:08:03	2689	2828.9	00:27:23
Instance4	602	659.2	00:00:17	1540	1641.7	00:02:07	2559	2699.6	00:07:51	3140	3234.3	00:22:46
Instance5	596	674.9	00:00:18	1580	1762.7	00:02:20	2424	2461.6	00:08:13	3052	3113	00:20:47
Moyenne	434.2	479.1	00:00:16	1297.2	1447.8	00:02:00	2257.2	2388.7	00:07:51	2971.6	3154.0	00:23:04
Ecart entre la meilleure solution et la moyenne	**9%**			**10%**			**6%**			**6%**		

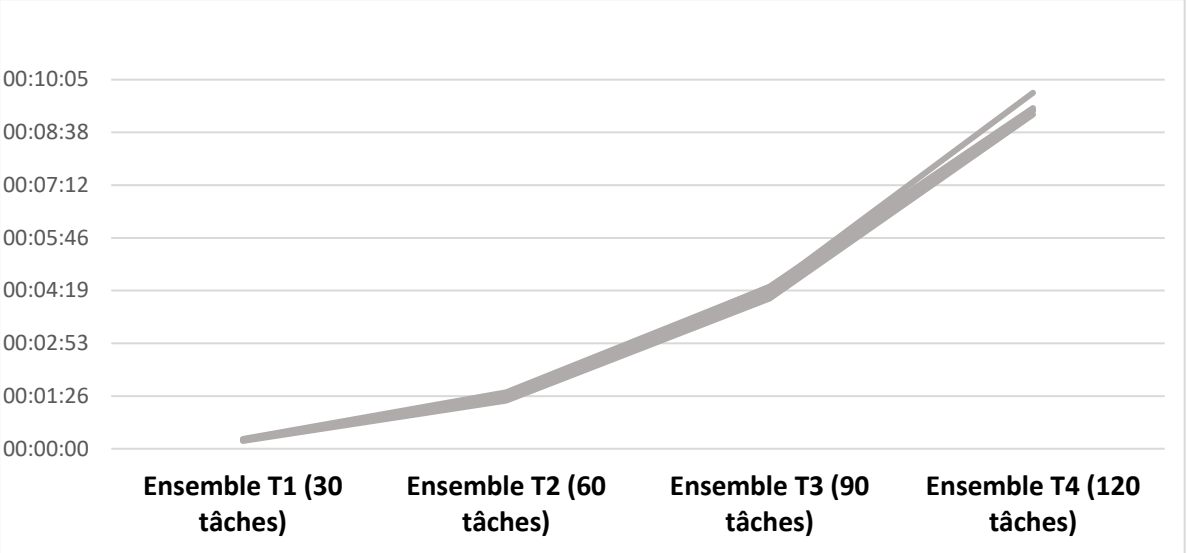


Figure 69 : Evolution du temps d'exécution de l'AG en fonction de la taille des instances

Les résultats du tableau indiquent également que l'AG est capable de trouver des solutions de qualité proches de celles obtenues par la recherche locale pour des instances de différentes tailles, tout en maintenant des temps d'exécution raisonnables. Les écarts entre la meilleure valeur et la moyenne des valeurs obtenues sont de 11% pour les ensembles T1 et T2, et se stabilisent à 8% pour les ensembles T3 et T4. Cela indique que l'AG développé offre des résultats assez cohérents et fiables pour différentes tailles d'instances.

IV.5.3 Expérimentation de l'AGH

Les résultats expérimentaux obtenus avec l'AGH (voir *Tableau 14*) offrent un aperçu des performances de cet algorithme sur différents ensembles de tâches (T1 à T4) de tailles croissantes (30, 60, 90 et 120 tâches). Les résultats sont mesurés en termes de meilleure solution trouvée, moyenne des solutions (10 exécutions par tableau), et temps de calcul en secondes pour chaque instance de l'ensemble. Les instances utilisées dans cette expérimentation sont les mêmes que celles utilisées dans l'expérimentation de l'algorithme RL et l'AG, ce qui permet de comparer directement les performances des trois algorithmes sur les mêmes ensembles de tâches.

Pour l'ensemble T1 (30 tâches), les temps de calcul sont courts, allant de 15 à 18 secondes par instance, ce qui est un temps de traitement très raisonnable. Les écarts entre la meilleure solution et la moyenne des solutions sont de l'ordre de 9%, ce qui indique une certaine dispersion, mais l'AGH parvient tout de même à produire de bonnes solutions pour cet ensemble de petite taille.

Les résultats du tableau révèlent que les temps de calcul augmentent avec la taille des ensembles, allant de quelques secondes pour l'ensemble T1 à plusieurs minutes pour l'ensemble T4 (voir *Figure 70*). Cependant, l'AGH réduit l'écart entre la meilleure solution et la moyenne à mesure que la taille des ensembles augmente, passant de 9% pour T1 à 6% pour T4. Cela suggère que l'AGH gagne en efficacité et converge mieux vers des solutions proches de l'optimal à mesure que les tâches deviennent plus nombreuses.

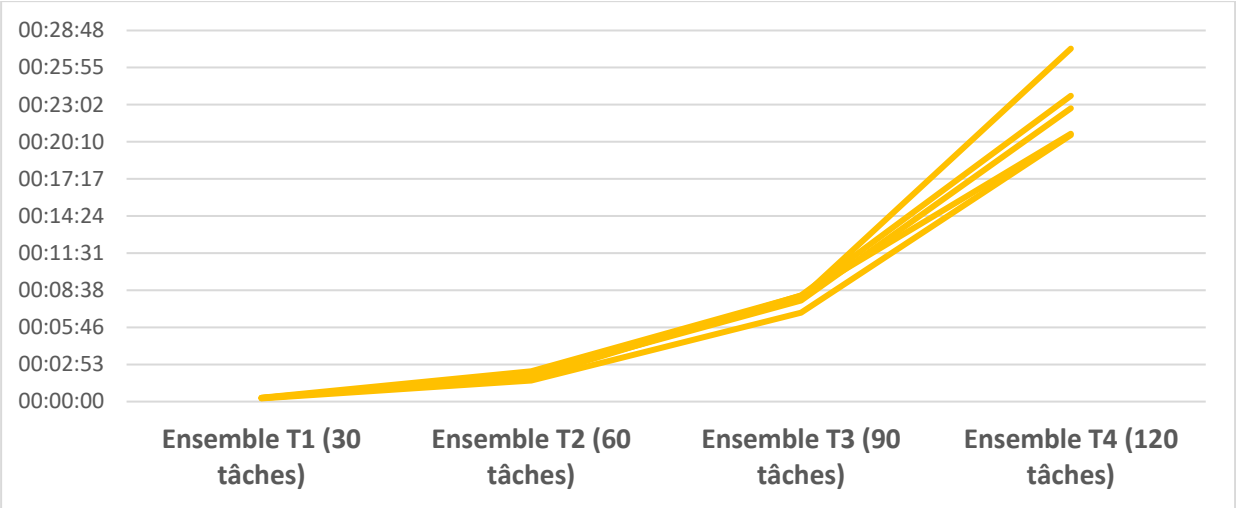


Figure 70 : Evolution du temps d'exécution de l'AGH en fonction de la taille des instances

IV.5.4 Comparaison entre la RL, l'AG et l'AGH

Le *Tableau 15* (parties 1 et 2) présente une comparaison entre les résultats obtenus avec la RL, l'AG et l'AGH pour quatre ensembles de tâches de tailles croissantes (T1, T2, T3 et T4), chacun comportant cinq instances. Il présente le coût initial du séquencement proposé par le planificateur, les meilleurs coûts trouvés par chaque algorithme, ainsi que le meilleur coût parmi tous les algorithmes (Meilleur coût). Il inclut également la moyenne des coûts trouvés par chaque algorithme, les temps de calcul associés, et le GAP, qui représente l'écart entre le meilleur coût trouvé par chaque algorithme et le meilleur coût parmi tous les algorithmes.

Nous observons que les coûts initiaux des séquencements proposés par le planificateur sont assez élevés dans tous les ensembles. Par exemple pour l'ensemble T1, la moyenne des coûts initiaux s'élève à 1046€. L'algorithme hybride AGH obtient la meilleure moyenne (479,1), suivi par RL (506,2). Tandis que l'AG montre une performance inférieure (514,4) par rapport aux deux autres.

Globalement, les trois algorithmes - RL, AG et AGH - montrent une capacité significative à réduire les coûts initiaux élevés proposés par le planificateur, comme le montre la *Figure 71*.

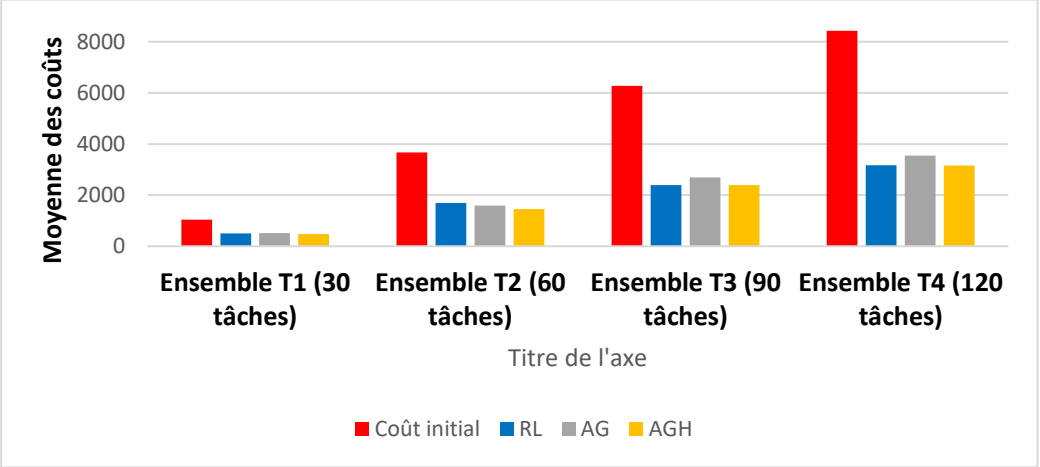


Figure 71: Comparaison des Coûts Initiaux et des Coûts trouvés par la RL, l'AG et l'AGH

Parmi eux, l'algorithme hybride AGH se distingue comme le plus efficace, obtenant les meilleures moyennes de coûts dans tous les ensembles. RL suit de près, surtout dans les ensembles T3 et T4, tandis que l'AG, bien qu'efficace, est généralement moins performant que les deux autres.

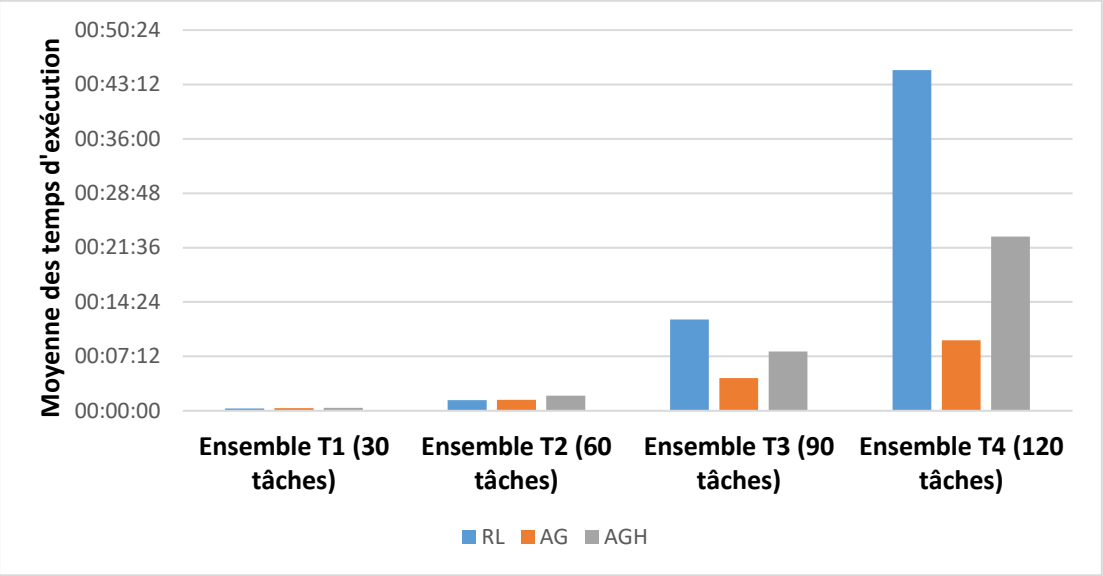


Figure 72 : Étude comparative des temps d'exécution de la RL, l' AG et l'AGH

L'algorithme RL réduit efficacement les coûts initiaux avec des temps de calcul courts pour les instances de petites tailles (T1 et T2). Cependant, pour les instances de grandes tailles (T3 et T4), les temps de calcul deviennent plus longs, atteignant jusqu'à 56 minutes pour l'ensemble T4 (120 tâches), ce qui limite son efficacité.

L'AG fournit des solutions de qualité, comparables à celles de la RL. Cependant, l'AG est plus performant que la RL pour les grandes tailles d'ensembles, offrant des temps de calcul plus courts (par exemple, 4 minutes en moyenne pour T3 et environ 8 minutes pour T4) que la RL (12 minutes pour T3 et 45 minutes pour T4), comme le montre la *Figure 72.*

L'AGH se révèle être l'algorithme le plus performant, fournissant les meilleures solutions avec des coûts les plus bas et des temps de calcul raisonnables, environ 16 secondes pour T1, 2 minutes pour T2, 8 minutes pour T3, et 23 minutes pour T4. Ces temps sont relativement bas, même pour les ensembles plus grands, indiquant une bonne efficacité de l'AGH.

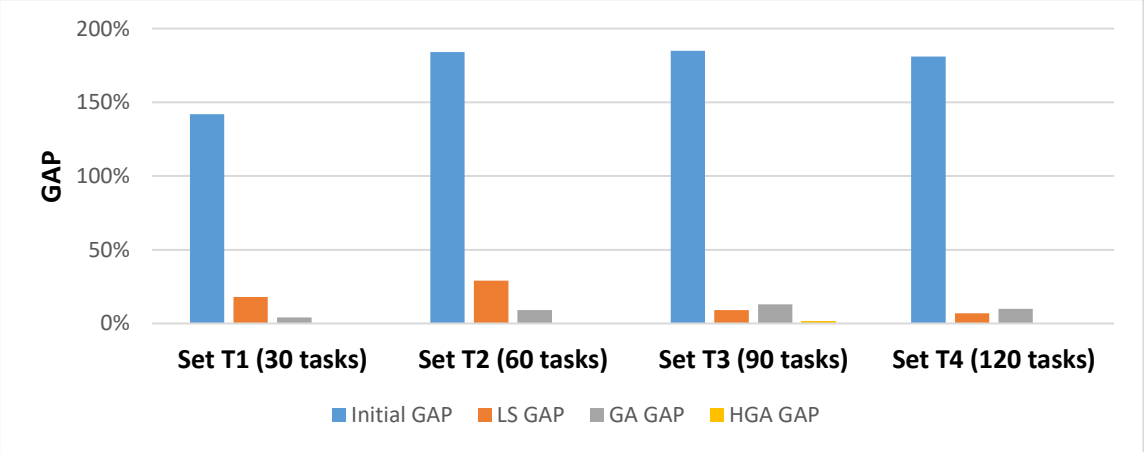


Figure 73 : comparaison de la robustesse de la RL, l'AG et l'AGH

Ainsi, bien que chaque algorithme parvienne à réduire le GAP, l'AGH semble être l'approche la plus efficace, réduisant souvent le GAP à 0% (voir *Figure 73)*.

Tableau 15 (partie 1) : Comparaison entre la RL, l'AG et l'AGH

	Ensemble T1 (30 tâches)													
		Initial		RL			AG				AGH			
Instances	Meilleur Coût	Coût	GAP	Coût	Temps	GAP	Meilleur Coût	Moyenne Coût	Temps	GAP	Meilleur Coût	Moyenne Coût	Temps	GAP
Instance1	**337**	740	**120%**	337	00:00:08	**0%**	337	366.7	00:00:13	**0%**	337	360.3	00:00:15	**0%**
Instance2	**313**	805	**157%**	388	00:00:08	**24%**	313	336.8	00:00:15	**0%**	313	332.3	00:00:17	**0%**
Instance3	**323**	825	**155%**	457	00:00:08	**41%**	323	378.8	00:00:14	**0%**	323	368.8	00:00:16	**0%**
Instance4	**602**	1413	**135%**	694	00:00:09	**15%**	621	704.2	00:00:15	**3%**	602	659.2	00:00:17	**0%**
Instance5	**596**	1447	**143%**	655	00:00:09	**10%**	701	785.6	00:00:16	**18%**	596	674.9	00:00:18	**0%**
Moyenne	**434.2**	1046	**142%**	506.2	00:00:08	**18%**	459	514.4	00:00:14	**4%**	434.2	479.1	00:00:16	**0%**

	Ensemble T2 (60 tâches)													
		Initial		RL			AG				AGH			
Instances	Meilleur Coût	Coût	GAP	Coût	Temps	GAP	Meilleur Coût	Moyenne Coût	Temps	GAP	Meilleur Coût	Moyenne Coût	Temps	GAP
Instance1	**1008**	2357	**134%**	1135	00:00:59	**13%**	1077	1181.1	00:01:19	**7%**	1008	1130.3	00:01:38	**0%**
Instance2	**1107**	3791	**242%**	1506	00:01:35	**36%**	1188	1386.9	00:01:27	**7%**	1107	1274.4	00:01:51	**0%**
Instance3	**1251**	3792	**203%**	1499	00:01:25	**20%**	1331	1554.8	00:01:29	**6%**	1251	1430	00:02:03	**0%**
Instance4	**1540**	4367	**184%**	2195	00:01:42	**43%**	1687	1796.1	00:01:29	**10%**	1540	1641.7	00:02:07	**0%**
Instance5	**1580**	4035	**155%**	2096	00:01:22	**33%**	1802	2025.5	00:01:33	**14%**	1580	1762.7	00:02:20	**0%**
Moyenne	**1297.2**	3668.4	**184%**	1686.2	00:01:25	**29%**	1417	1588.9	00:01:27	**9%**	1297.2	1447.8	00:02:00	**0%**

Tableau 15 (partie 2) : Comparaison entre la RL, l'AG et l'AGH

Instances	Meilleur Coût	Initial		RL			AG				AGH			
		Coût	GAP	Coût	Temps	GAP	Meilleur Coût	Moyenne Coût	Temps	GAP	Meilleur Coût	Moyenne Coût	Temps	GAP
Instance1	**2023**	6071	**200%**	2480	00:08:30	**23%**	2210	2400.5	00:04:06	**9%**	2023	2141.8	00:06:54	**0%**
Instance2	**2178**	6409	**194%**	2204	00:14:18	**1%**	2548	2672.6	00:04:26	**17%**	2178	2432.8	00:08:15	**0%**
Instance3	**2102**	5778	**175%**	2595	00:10:43	**23%**	2470	2643.7	00:04:14	**18%**	2102	2207.9	00:08:03	**0%**
Instance4	**2523**	6914	**174%**	2523	00:13:41	**0%**	2669	3006.2	00:04:23	**6%**	2559	2699.6	00:07:51	**1%**
Instance5	**2190**	6198	**183%**	2190	00:13:14	**0%**	2518	2745	00:04:25	**15%**	2424	2461.6	00:08:13	**11%**
Moyenne	**2203.2**	6274	**185%**	2398.4	00:12:05	**9%**	2483	2693.6	00:04:19	**13%**	2257.2	2388.7	00:07:51	**2%**

	Ensemble T4 (120 tâches)													
Instances	Meilleur Coût	Initial		RL			AG				AGH			
		Coût	GAP	Coût	Temps	GAP	Meilleur Coût	Moyenne Coût	Temps	GAP	Meilleur Coût	Moyenne Coût	Temps	GAP
Instance1	**3006**	8608	**186%**	3038	00:40:18	**1%**	3249	3440.2	00:09:08	**8%**	3006	3174.2	00:20:41	**0%**
Instance2	**2971**	8602	**190%**	3556	00:56:14	**20%**	3593	3909.2	00:09:18	**21%**	2971	3419.5	00:23:44	**0%**
Instance3	**2689**	7826	**191%**	2953	00:43:23	**10%**	2954	3199.4	00:09:15	**10%**	2689	2828.9	00:27:23	**0%**
Instance4	**3140**	7907	**152%**	3214	00:43:40	**2%**	3430	3715	00:09:43	**9%**	3140	3234.3	00:22:46	**0%**
Instance5	**3052**	8728	**186%**	3063	00:41:53	**0%**	3132	3434.7	00:09:14	**3%**	3052	3113	00:20:47	**0%**
Moyenne	**2971.6**	8334.2	**181%**	3164.8	00:45:06	**7%**	3271.6	3539.7	00:09:19	**10%**	2971.6	3154.0	00:23:04	**0%**

IV.6 Conclusion

Ce chapitre a exploré en détail le problème de séquencement dans un flowshop hybride, mettant en lumière les défis complexes auxquels sont confrontées les entreprises industrielles dans l'optimisation des processus de production. Les différentes parties de ce chapitre ont permis de mieux comprendre les spécificités des environnements de production multi-étapes, ainsi que les objectifs et contraintes liés à chaque atelier de production.

Une modélisation mathématique du problème est fournie, et une exploration de méthodes approchées a révélé l'efficacité des algorithmes de RL, des algorithmes AG et des algorithmes génétiques hybrides AGH pour traiter ce problème. Les résultats expérimentaux indiquent que les coûts initiaux des séquencements proposés par le planificateur sont élevés dans tous les ensembles de tâches, soulignant le besoin d'optimisation.

Dans l'ensemble, l'AGH est l'algorithme le plus efficace des trois, fournissant des solutions de moindre coût en temps de calcul raisonnable, démontrant une robustesse avec un GAP réduit souvent à 0%. L'AG est également performant et offre une bonne alternative à l'AGH, tandis que la RL apporte des améliorations significatives par rapport au séquencement initial, mais devient moins efficace pour les instances de grandes tailles en raison du temps de calcul plus long. Ces résultats confirment l'efficacité des algorithmes génétiques, en particulier l'AGH, pour résoudre des problèmes d'optimisation complexes sur des ensembles de tailles variées.

De plus, l'optimisation du séquencement a permis de surmonter plusieurs défis identifiés sur la VSM. Grâce à ces améliorations, de nombreux problèmes critiques, initialement en rouge, sont passés au vert, comme le montre la *Figure 74*, reflétant une amélioration significative des processus et une réduction des inefficacités dans les flux de production.

En conclusion, le travail présenté dans ce chapitre souligne l'importance de choisir la méthode d'optimisation la plus appropriée en fonction des spécificités du problème de séquencement à traiter. L'AGH s'est révélé être une approche particulièrement efficace, mais il est essentiel de continuer à explorer d'autres méthodes de résolution.

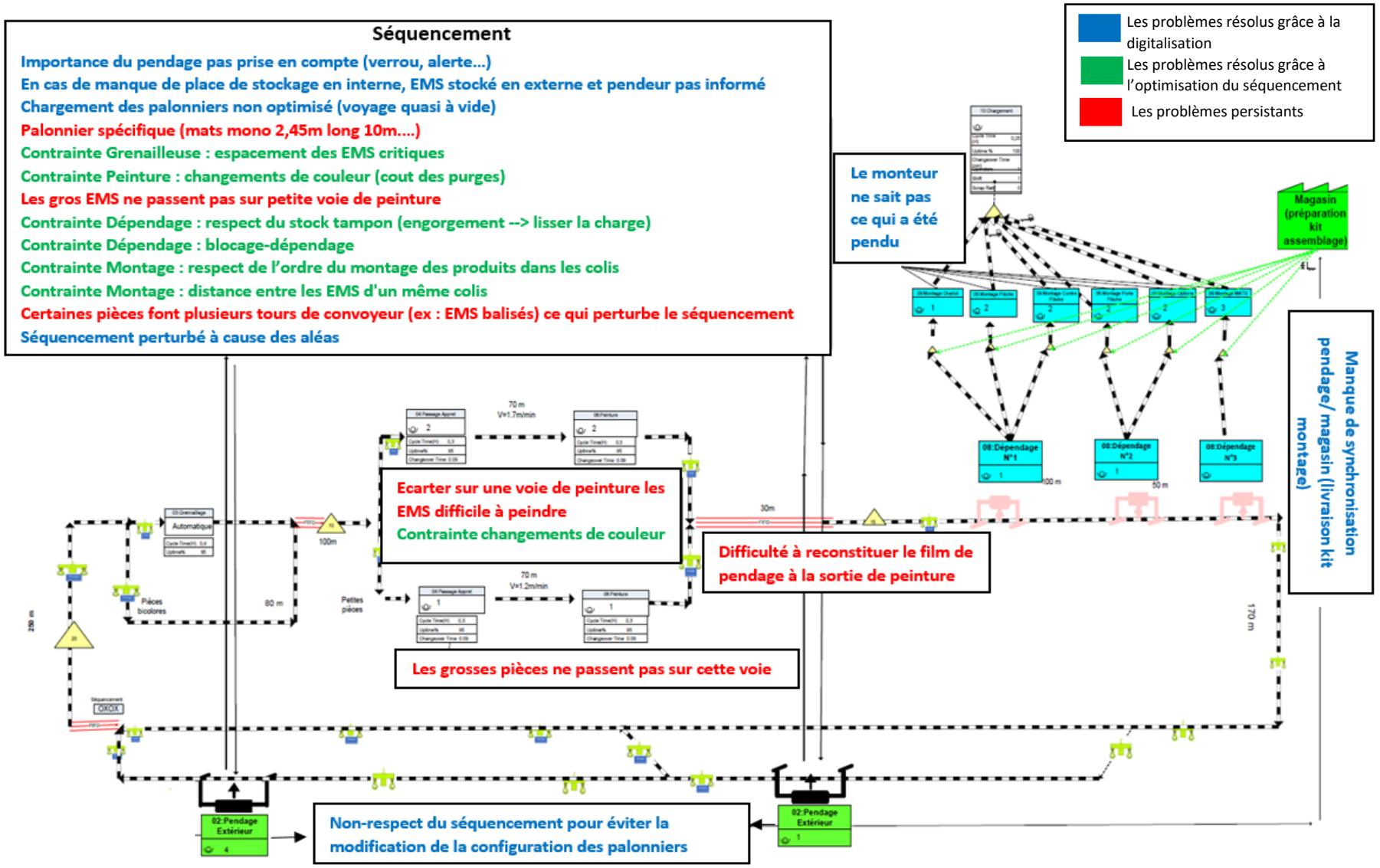


Figure 74 : VSM : problèmes résolus grâce à l'optimisation du séquencement

Conclusion et Perspectives

Dans cette thèse, nous étudions la problématique de l'entreprise Manitowoc liée à la gestion complexe de ses processus de production. Cette complexité découle de la grande variété des composants nécessaires pour les postes de montage et de la rigidité du système de convoyage, ce qui entraîne des lead times longs et variables. Malgré l'augmentation du nombre d'opérateurs pour tenter de livrer les clients à temps, cette stratégie n'a permis qu'une amélioration marginale des délais de livraison, tout en dégradant la productivité. Par conséquent, le séquencement de la production est devenu un défi majeur pour répondre efficacement aux attentes des clients avec la meilleure rentabilité possible.

Les grues succèdent au planning de production sont très variées, voire uniques, leurs composants doivent passer par plusieurs ateliers, via un convoyeur rigide. Cet environnement de production hérite naturellement d'une grande complexité opérationnelle. Cette complexité est exacerbée par les objectifs conflictuels de chaque atelier, qui doivent être prise en compte simultanément. Résoudre les problèmes de séquencement dans de tels environnements de production est une tâche ardue, reconnue et classée comme un problème d'optimisation NP-difficile.

Plus la complexité du problème de séquencement à traiter, l'étude de terrain a révélé que le séquencement manuel établi par le planificateur est entravé par l'absence de données fiables et le manque d'informations en temps réel. Cela empêche d'obtenir un bon séquencement et complique la gestion efficace des opérations. Ainsi, il se heurte à d'autres difficultés qui rendent rapidement obsolètes la planification et le séquencement établis. Principalement le non-respect du séquencement par les opérateurs qui est souvent lié à une optimisation locale, où chaque poste de travail cherche à optimiser ses propres critères de performance, indépendamment des besoins et contraintes des autres ateliers. Les aléas rencontrés en cours de production, tels que les problèmes d'approvisionnement ou les défauts de qualité, s'ajoutent à ces difficultés. Cette situation conduit à une déviation par rapport au séquencement global, provoquant des déséquilibres dans la chaîne de production, des retards de livraison et une baisse de la qualité.

La résolution du problème de séquencement, bien que nécessaire, ne suffit pas à assurer le bon fonctionnement global de l'usine. Un bon séquencement doit être soutenu par une visibilité constante de l'information et une traçabilité des produits tout au long de la chaîne logistique pour être efficace. L'accès en temps réel aux données est essentiel pour une planification précise et pour permettre des réponses rapides aux aléas survenant pendant la production.

De plus, l'exécution du séquencement dépend en grande partie des opérateurs sur le terrain. Leur engagement et leur capacité à suivre le séquencement établi influent directement sur la performance globale de l'usine. L'autonomie et l'apprentissage individuel des opérateurs jouent un rôle clé dans le respect des objectifs de séquencement, tandis que des outils d'aide à la décision avancés peuvent améliorer leur efficacité et leur coopération.

Pour surmonter ces défis et challenges, nous avons intégré trois approches indépendantes mais complémentaires, toutes axées sur un objectif commun : optimiser les processus de production. Ces approches sont le Lean Manufacturing, la digitalisation et le séquencement. Ensemble, elles offrent une voie prometteuse pour améliorer l'efficacité opérationnelle tout en conservant la flexibilité et la rentabilité.

Le Lean Manufacturing

Le Lean semblait être prometteur pour résoudre certains problèmes identifiés. Cependant, le contexte actuel du site industriel montre des limites importantes de certaines pratiques. Principalement, les principes Lean, axés sur la communication en face à face, rencontrent des difficultés lorsque les équipes sont dispersées géographiquement. De plus, la personnalisation de masse et la grande variété des produits compliquent l'application uniforme du travail standardisé, en particulier avec des méthodes traditionnelles reposant sur des documents « papier ». Ainsi, L'absence d'informations en temps réel constitue une limitation majeure pour le Juste à Temps entre les différentes étapes de la chaîne de production.

Dans le même sens, l'expérimentation de la pratique Kanban et de la pratique SMED dans cet environnement caractérisé par une forte personnalisation et une grande variabilité des temps de cycle s'est avérée inefficace. Le Kanban a entraîné une dégradation de la productivité et des niveaux de service insatisfaisants. De plus, malgré le rôle joué par le Système SMED dans la réduction du temps de changement de série, il a représenté des limites et le rejet d'un point de vue ergonomique et mental pour les opérateurs.

Ces constats montrent que certaines pratiques Lean ne sont pas adaptées au contexte actuel de l'entreprise, soulignant le besoin d'une adaptation et d'une modernisation pour répondre aux exigences spécifiques des environnements HMLV. Des recherches futures devraient explorer d'autres pratiques Lean pour évaluer leur compatibilité avec ces environnements et identifier les approches susceptibles d'échouer, afin d'orienter les entreprises vers des choix plus éclairés.

Il est recommandé que les études futures se concentrent sur l'impact ergonomique et culturel du Lean sur les opérateurs et de proposer des solutions pour améliorer leur confort, leur sécurité et leur satisfaction au travail.

En explorant ces pistes de recherche, les pratiques Lean pourront être modernisées et adaptées aux environnements complexes et variés de l'entreprise, améliorant ainsi l'efficacité opérationnelle et la rentabilité globale.

La digitalisation

L'adoption d'architectures de séquencement combinant des mécanismes centralisés et décentralisés apparaît comme une stratégie prometteuse pour atteindre un équilibre entre flexibilité opérationnelle et stabilité globale. La digitalisation joue un rôle fondamental dans cette recherche d'équilibre, comme le montre l'étude de cas menée au sein de l'entreprise Manitowoc.

Manitowoc a exploité les avantages de la digitalisation pour relever les défis liés au séquencement, en optimisant la visibilité des opérateurs et en introduisant des indicateurs de performance en temps réel pour améliorer le respect du séquencement établi.

De plus, la digitalisation a permis une prise de décision décentralisée plus informée, grâce à l'utilisation des indicateurs de performance en temps réel pour évaluer l'impact des décisions locales et à l'optimisation du management visuel et du travail standardisé, renforçant ainsi la qualité des opérations.

Par ailleurs, l'introduction de capteurs IoT a permis d'améliorer la synchronisation des flux entre les postes de travail, réduisant ainsi les interruptions coûteuses et augmentant l'efficacité opérationnelle. Le suivi automatisé des travaux en cours sur les postes de montage et le convoyeur a minimisé les tâches manuelles fastidieuses, favorisant une meilleure gestion de la chaîne de production.

En conclusion, la digitalisation est un outil essentiel pour harmoniser les approches centralisées et décentralisées, apportant des solutions concrètes pour augmenter l'efficacité opérationnelle tout en assurant la stabilité des processus. Cette étude démontre comment une approche équilibrée, soutenue par la digitalisation, peut transformer de manière positive la planification et l'exécution des opérations dans les entreprises de production HMLV.

Pour les recherches futures, il pourrait être intéressant d'examiner comment l'intégration de l'IoT dans le suivi des palonniers pourrait-elle permettre d'optimiser le séquencement de la production, en anticipant plus précisément leur retour et en ajustant le séquencement en conséquence ?

Le séquencement

Dans cette étude, le problème de séquencement abordé est un problème fortement combinatoire, multi-objectifs, et avec des contraintes très variées qui n'apparaissent généralement pas simultanément dans un même problème. Il appartient à la classe des problèmes mathématiques NP-difficiles, quel que soit le critère d'optimisation privilégié. Avant de tenter de résoudre le problème de séquencement, nous l'avons modélisé finement, afin de décider ce qui doit être considérer comme des contraintes à respecter, ou des objectifs à poursuivre. La modélisation a conduit à de nombreux objectifs de nature diverses, rendant la prise de décision plus complexe en raison de la nécessité de concilier des objectifs conflictuels. Une analyse détaillée a été menée, incluant l'évaluation et la valorisation de chaque objectif, normalisée vers une unité commune, en l'occurrence l'euro. Cette approche a abouti à l'établissement d'un objectif global unique : la minimisation des coûts

En raison de la difficulté extrême du problème étudié, nous avons considéré qu'une seule ligne de peinture, et les méthodes de résolution choisies sont des méthodes approchées. L'objectif est de trouver une solution qui minimise les coûts liés à l'exécution des tâches tout en maintenant un temps de calcul raisonnable. Nous avons développé trois algorithmes : RL, AG et AGH.

Une série d'expériences informatiques sont réalisées afin évaluer les performances des algorithmes proposés. Nous utilisons le coût moyen comme indicateur de la qualité des solutions, et le temps de calcul moyen comme indicateur de l'effort de calcul. Concernant la qualité des solutions, Les trois algorithmes apportent tous une amélioration significative par rapport au coût initial proposé par le planificateur. Les résultats montrent que l'AGH est l'algorithme le plus efficace des trois, fournissant des solutions de haute qualité tout en conservant des temps de calcul raisonnables. L'AG s'est également avéré performant et constitue une bonne alternative à l'AGH, tandis que RL a montré des améliorations notables par rapport au séquencement initial, mais son efficacité diminue avec les instances de grande taille en raison de temps de calcul plus longs. Ces résultats confirment l'efficacité des algorithmes génétiques, en particulier de l'AGH, pour résoudre des problèmes d'optimisation complexes sur des ensembles de tailles variées.

Dans le contexte de l'entreprise Manitowoc, l'ajout d'une deuxième ligne de peinture a été une réponse historique à un séquencement non optimisé. Une optimisation du séquencement à l'aide de l'AGH pourrait-elle rendre cette seconde ligne inutile ? Si ce n'est pas le cas, quelles adaptations des algorithmes proposés seraient nécessaires pour intégrer l'hybridation de la ligne de peinture et maximiser l'efficacité ?

En tant qu'extensions de ce travail, les recherches futures pourraient explorer d'autres combinaison d'opérateurs génétiques et de les associer à d'autres méthodes d'optimisation telles que les algorithmes de colonie de fourmis (ACF) ou l'optimisation par essaims de particules (OEP). Il serait également intéressant d'étudier le comportement des algorithmes proposés en considérant d'autres fonctions objectif, telles que minimisation du makespan, ou minimisation des retards dans de nombreux contextes industriels réels.

En conclusion, la contribution majeure de cette thèse réside dans l'intégration harmonieuse de trois approches : le Lean, la digitalisation, et le séquencement. Chaque approche, prise individuellement, pourrait apporter des bénéfices, mais ne suffirait pas à optimiser les opérations dans leur ensemble. C'est l'interconnexion et la complémentarité de ces trois domaines qui ont permis d'atteindre des résultats significatifs, en abordant les défis de la production de manière holistique.

Parmi ces trois approches, la digitalisation s'est avérée centrale (voir *Figure 75*). Elle a permis de compenser les limitations physiques et organisationnelles, telles que l'éloignement des postes de travail dû au système de convoyage rigide, et la complexité liée à la gestion d'une grande variété de produits. Elle a renforcé l'efficacité de certaines pratiques Lean, notamment le travail standardisé et le management visuel, tout en augmentant l'autonomie et la responsabilisation des opérateurs grâce à des informations en temps réel et des KPI. Cette transformation digitale a ainsi créé une base solide pour l'application efficace des principes Lean.

En outre, la digitalisation s'est avérée préalable à l'optimisation du séquencement. La visibilité et la fiabilité des données collectées en temps réel ont permis une meilleure planification et un séquencement plus efficace. De plus, grâce à la remontée en temps réel d'informations depuis l'atelier, il est désormais possible de surveiller l'état de la production et de réagir rapidement face aux aléas. Sans cette transformation digitale, ni le déploiement de la théorie Lean, ni l'optimisation du séquencement via des algorithmes n'auraient pu être réalisés avec autant d'efficacité.

La combinaison de ces trois approches a permis de résoudre les principaux défis auxquels l'entreprise était confrontée, comme illustré dans la *Figure 76*. Bien qu'il subsiste quelques problèmes non totalement résolus, l'application continue et approfondie de ces méthodes laisse entrevoir la possibilité de les éliminer à l'avenir ou, du moins de les mieux gérer.

La réussite de cette démarche soulève la question de la transposabilité de cette approche à d'autres secteurs d'activité HMLV. Des recherches futures pourraient explorer cette application à des domaines tels que l'aéronautique, l'industrie automobile, la fabrication d'instruments médicaux, ou d'autres secteurs similaires pour apporter des améliorations similaires.

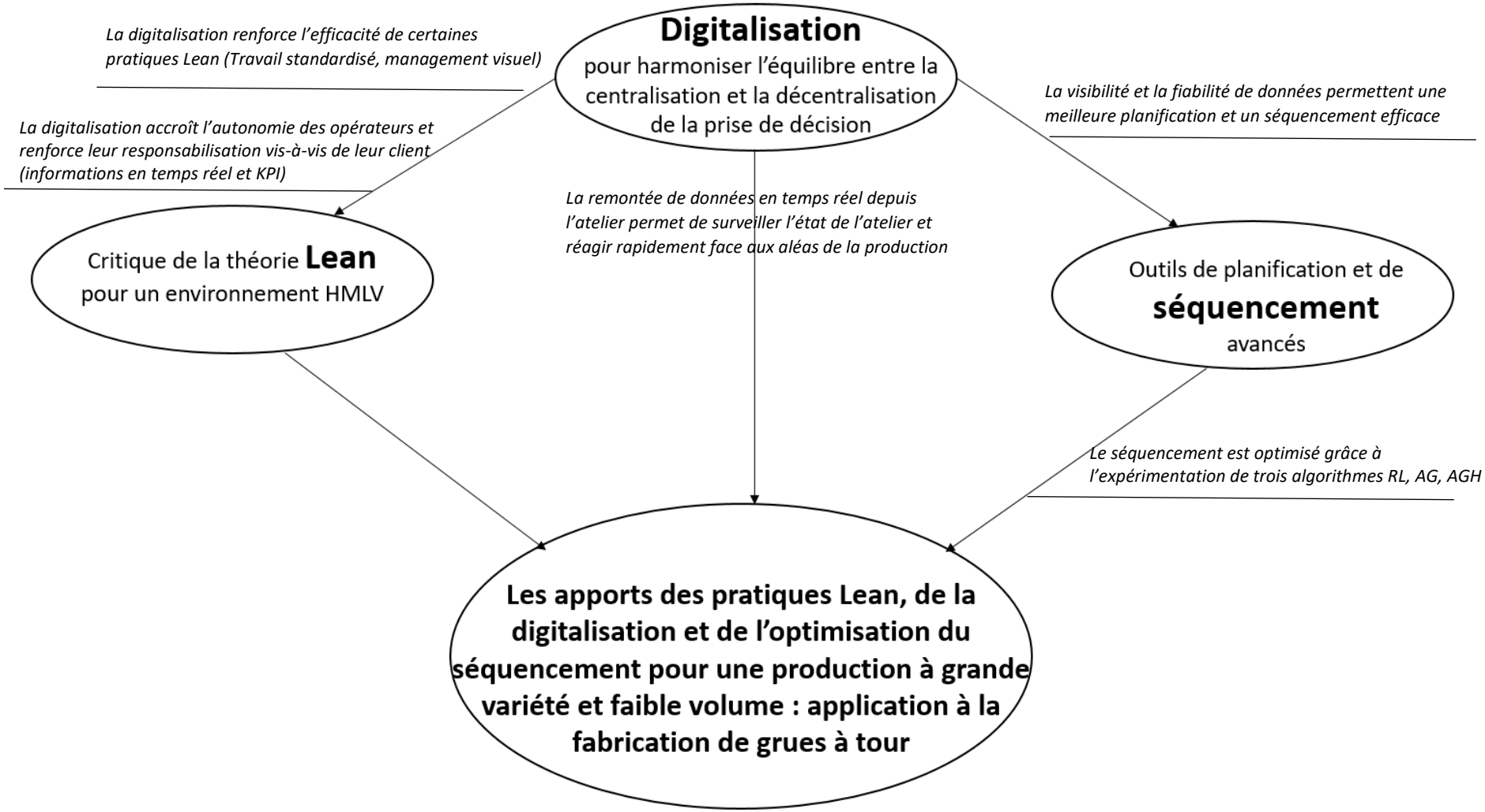


Figure 75 : Les contributions de la thèse

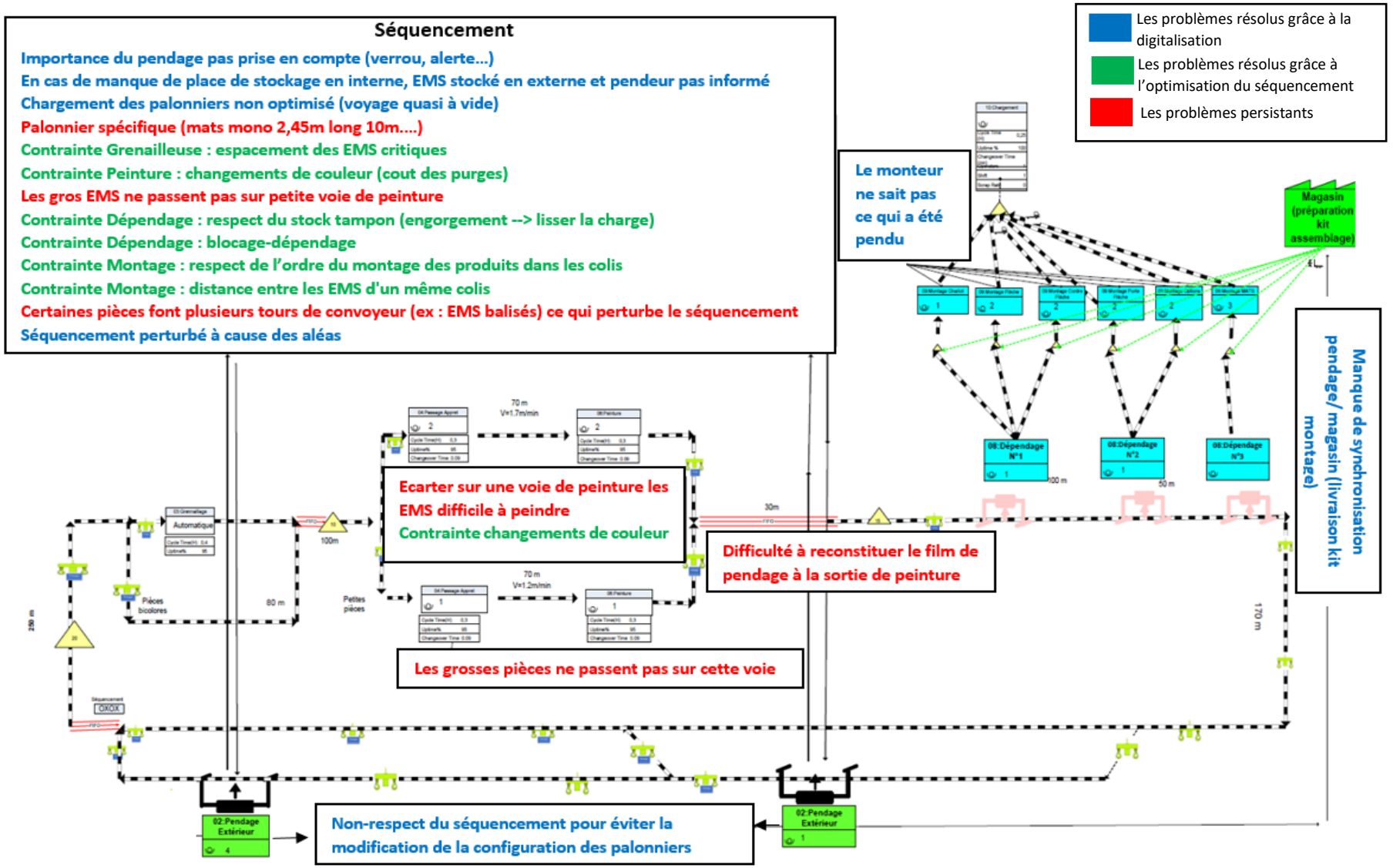


Figure 76 : VSM : Les défis résolus

Bibliographie

Aazam, M., Zeadally, S., & Harras, K. A. (2018). Deploying fog computing in industrial internet of things and industry 4.0. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 14(10), 4674-4682.

Abreu, L. R., Cunha, J. O., Prata, B. A., & Framinan, J. M. (2020). A genetic algorithm for scheduling open shops with sequence-dependent setup times. Computers & Operations Research, 113, 104793.

Abu, F., Gholami, H., Saman, M. Z. M., Zakuan, N., & Streimikiene, D. (2019). The implementation of lean manufacturing in the furniture industry: A review and analysis on the motives, barriers, challenges, and the applications. Journal of cleaner production, 234, 660-680.

Adlin, N., Nylund, H., Lanz, M., Lehtonen, T., & Juuti, T. (2020). Lean indicators for small batch size manufacturers in high cost countries. Procedia Manufacturing, 51, 1371-1378.

Afonso, M., Gabriel, A. T., & Godina, R. (2022). Proposal of an innovative ergonomic SMED model in an automotive steel springs industrial unit. Advances in Industrial and Manufacturing Engineering, 4, 100075.

Ahmad, M. O., Dennehy, D., Conboy, K., & Oivo, M. (2018). Kanban in software engineering: A systematic mapping study. Journal of Systems and Software, 137, 96-113.

Alexopoulos, K., Sipsas, K., Xanthakis, E., Makris, S., & Mourtzis, D. (2018). An industrial Internet of things based platform for context-aware information services in manufacturing. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 31(11), 1111-1123.

Alizon, F., Shooter, S. B., & Simpson, T. W. (2008, January). Henry Ford and the Model T: lessons for product platforming and mass customization. In International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference (Vol. 43291, pp. 59-66).

Aljubiri A. (2019). An implementation strategy for Lean Manufacturing in high mix and low volume (HMLV) environment (Doctoral dissertation, University of Akron).

Alves, A. C., Leao, C. P., Uebe-Mansur, A. F., & Kury, M. I. R. (2021). The knowledge and importance of Lean Education based on academics' perspectives: an exploratory study. Production Planning & Control, 32(6), 497-510.

Amaro, P., Alves, A.C., Sousa, R.M. (2019). Lean Thinking: A Transversal and Global Management Philosophy to Achieve Sustainability Benefits. In: Alves, A., Kahlen, FJ., Flumerfelt, S., Siriban-Manalang, A. (eds) Lean Engineering for Global Development. Springer, Cham.

Amrani A., Ducq Y. (2020). Lean practices implementation in aerospace based on sector characteristics: methodology and case study. Production Planning & Control, 31(16), 1313-1335.

Andrade, Carlos E., Thuener Silva, and Luciana S. Pessoa. "Minimizing flowtime in a flowshop scheduling problem with a biased random-key genetic algorithm." Expert Systems with Applications 128 (2019): 67-80.

Antony J., Psomas E., Garza-Reyes J. A., Hines P. (2021). Practical implications and future research agenda of lean manufacturing: a systematic literature review. Production planning & control, 32(11), 889-925.

Antony, J., Sunder M, V., Sreedharan, R., Chakraborty, A., & Gunasekaran, A. (2019). A systematic review of Lean in healthcare: a global prospective. International Journal of Quality & Reliability Management, 36(8), 1370-1391.

Arasanipalai Raghavan, V., Yoon, S., & Srihari, K. (2014). Lean transformation in a high mix low volume electronics assembly environment. International journal of lean six sigma, 5(4), 342-360.

Babalola, O., Ibem, E. O., & Ezema, I. C. (2019). Implementation of lean practices in the construction industry: A systematic review. Building and environment, 148, 34-43.

Ballé, M., Chaize, J., & Jones, D. (2019). Lean as a learning system: What do organizations need to do to get the transformational benefits from Toyota's method?. Development and Learning in Organizations: An International Journal, 33(3), 1-4.

Bayard, S. (2023). Proposition d'un cadre méthodologique adaptable pour l'évaluation de la performance d'un système de planification de la production: Application à Demand Driven MRP (Doctoral dissertation, Mines Saint-Etienne).

Bayhan, H. G., Demirkesen, S., & Jayamanne, E. (2019, February). Enablers and barriers of lean implementation in construction projects. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 471, No. 2, p. 022002). IOP Publishing.

Belvedere, V., Cuttaia, F., Rossi, M., & Stringhetti, L. (2019). Mapping wastes in complex projects for Lean Product Development. International Journal of Project Management, 37(3), 410-424.

Benkarim, A., & Imbeau, D. (2022). Exploring Lean HRM Practices in the Aerospace Industry. Sustainability, 14(9), 5208.

Berlińska, J., & Przybylski, B. (2021). Scheduling for gathering multitype data with local computations. European Journal of Operational Research, 294(2), 453-459.

Bertolini, M., Romagnoli, G., & Zammori, F. (2017). 2MTO, a new mapping tool to achieve lean benefits in high-variety low-volume job shops. Production Planning & Control, 28(5), 444-458.

Bevilacqua, M., Bottani, E., Ciarapica, F. E., Costantino, F., Di Donato, L., Ferraro, A., ... & Vignali, G. (2020). Digital twin reference model development to prevent operators' risk in process plants. Sustainability, 12(3), 1088.

Bevilacqua, M., Ciarapica, F. E., & De Sanctis, I. (2017). Lean practices implementation and their relationships with operational responsiveness and company performance: an Italian study. International Journal of Production Research, 55(3), 769-794.

Beynon-Davies, P., & Lederman, R. (2017). Making sense of visual management through affordance theory. Production Planning & Control, 28(2), 142-157.

Birkie, S. E., Trucco, P., & Kaulio, M. (2017). Sustaining performance under operational turbulence: the role of lean in engineer-to-order operations. International Journal of Lean Six Sigma, 8(4), 457-481.

Birkie, S. E., & Trucco, P. (2016). Understanding dynamism and complexity factors in engineer-to-order and their influence on lean implementation strategy. Production Planning & Control, 27(5), 345-359.

Bisht, V. S., Joshi, N., Jethi, G. S., & Bhakuni, A. S. (2020). A review on genetic algorithm and its application in power system engineering. Metaheuristic and evolutionary computation: Algorithms and applications, 107-130.

Boran, S., & Ekincioğlu, C. (2017). A novel integrated SMED approach for reducing setup time. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 92, 3941-3951.

Bortolotti, T., Danese, P., & Romano, P. (2013). Assessing the impact of just-in-time on operational performance at varying degrees of repetitiveness. International Journal of production research, 51(4), 1117-1130.

Braglia M., M. Frosolini M. Gallo, Marrazzini L. (2019). Lean Manufacturing Tool in Engineer-to-Order Environment: Project Cost Deployment. International Journal of Production Research 57 (6): 1825–1839.

Braglia M., Gabbrielli R., Marrazzini L. (2020). Rolling Kanban: a new visual tool to schedule family batch manufacturing processes with Kanban. International Journal of Production Research, 3998–4014.

Braglia, M., Di Paco, F., Frosolini, M., & Marrazzini, L. (2023). Quick changeover design: a new Lean methodology to support the design of machines in terms of rapid changeover capability. Journal of Manufacturing Technology Management, 34(9), 84-114.

Brito, M., Ramos, A. L., Carneiro, P., & Gonçalves, M. A. (2017). Combining SMED methodology and ergonomics for reduction of setup in a turning production area. Procedia Manufacturing, 13, 1112-1119.

Buer, S. V., Fragapane, G. I., & Strandhagen, J. O. (2018). The data-driven process improvement cycle: Using digitalization for con-tinuous improvement. IFAC-PapersOnLine, 51 (11), 1035–1040.

Bukchin, J., Darel, E., & Rubinovitz, J. (1997). Team-oriented assembly system design: A new approach. International Journal of Production Economics, 51(1-2), 47-57.

Bysko, S., Krystek, J., & Bysko, S., (2020). Automotive paint shop 4.0. Computers & Industrial Engineering, 139:1-13. DOI:10.1016/j.cie.2018.11.056.

Caggiano, A. (2019). Manufacturing system. In S. Chatti, L. Laperrière, G. Reinhart, & T. Tolio (Eds.), CIRP encyclopedia of production engineering (pp. 1136–1142). Springer.

Calzavara, M., Finco, S., Battini, D., Sgarbossa, F., & Persona, A. (2022). A Joint Assembly Line Balancing and Feeding Problem (JALBFP) considering direct and indirect supply strategies. International Journal of Production Research, 60(19), 5727-5745.

Cannas, V. G., Pero, M., Pozzi, R., & Rossi, T. (2018). Complexity reduction and kaizen events to balance manual assembly lines: an application in the field. International Journal of Production Research, 56(11), 3914-3931.

Canonico, P., De Nito, E., Esposito, V., Iacono, M. P., & Consiglio, S. (2020). Knowledge creation in the automotive industry: Analysing obeya-oriented practices using the SECI model. Journal of Business Research, 112, 450-457.

Chaple A. P., Narkhede B. E. (2017). Value stream mapping in a discrete manufacturing: A case study. International Journal of Supply Chain Management, 6 (1), 55–67.

Chen, D., & Zhao, X. R. (2021). Production management of hybrid flow shop based on genetic algorithm. International Journal of Simulation Modelling, 20(3), 571-582.

Cherrafi, A., Elfezazi, S., Hurley, B., Garza-Reyes, J. A., Kumar, V., Anosike, A., & Batista, L. (2019). Green and lean: a Gemba–Kaizen model for sustainability enhancement. Production Planning & Control, 30(5-6), 385-399.

Cherrafi, A., Elfezazi, S., Garza-Reyes, J. A., Benhida, K., & Mokhlis, A. (2017). Barriers in Green Lean implementation: a combined systematic literature review and interpretive structural modelling approach. Production Planning & Control, 28(10), 829-842.

Chouiraf, F., & Chafi, A. (2018, April). Lean manufacturing for handicraft production: A new production system to enhance productivity and competitiveness of craft enterprise. In 2018 4th International Conference on Optimization and Applications (ICOA) (pp. 1-6). IEEE.

Cifone, F. D., Hoberg, K., Holweg, M., & Staudacher, A. P. (2021). 'Lean 4.0': How can digital technologies support lean practices?. International Journal of Production Economics, 241, 108258.

Colombari, R., Geuna, A., Helper, S., Martins, R., Paolucci, E., Ricci, R., & Seamans, R. (2023). The interplay between data-driven decision-making and digitalization: A firm-level survey of the Italian and US automotive industries. International Journal of Production Economics, 255, 108718.

Costa, A., Cappadonna, F. A., & Fichera, S. (2017). A hybrid genetic algorithm for minimizing makespan in a flow-shop sequence-dependent group scheduling problem. Journal of Intelligent Manufacturing, 28, 1269-1283.

Crute, V., Ward, Y., Brown, S., & Graves, A. (2003). Implementing Lean in aerospace—challenging the assumptions and understanding the challenges. Technovation, 23(12), 917-928.

Cusumano, M. A., Holweg, M., Howell, J., Netland, T., Shah, R., Shook, J., ... & Womack, J. (2021). Commentaries on "The lenses of lean". Journal of Operations Management, 67(5), 627-639.

Dallasega, P., Rojas, R. A., Bruno, G., & Rauch, E. (2019). An agile scheduling and control approach in ETO construction supply chains. Computers in Industry, 112, 103122.

Danese P., Manfè V., & Romano P. (2018). A Systematic Literature Review on Recent Lean Research: State-of-the-art and Future Directions. International Journal of Management Reviews, 20(2), 579–605.

Daniyan, I., Adeodu, A., Mpofu, K., Maladzhi, R., & Katumba, M. G. K. K. (2022). Application of lean Six Sigma methodology using DMAIC approach for the improvement of bogie assembly process in the railcar industry. Heliyon, 8(3), e09043.

Denkena, B., Shpitalni, M., Kowalski, P., Molcho, G., & Zipori, Y. (2007). Knowledge management in process planning. CIRP annals, 56(1), 175-180.

Dewa, M. T., Van der Merwe, A. F., & Matope, S. (2018). A decision-making framework for implementing digitalisation in the South African tooling industry. South African Journal of Industrial Engineering, 29(4), 245-262.

Djurdjev, M., Cep, R., Lukic, D., Antic, A., Popovic, B., & Milosevic, M. (2021). Un algorithme de recherche génétique de corbeaux pour l'optimisation du séquençage des opérations dans la planification des processus. Sciences appliquées, 11(5), 1981.

Duret, R. (2016). De l'émergence des risques à leur intégration dans une organisation: le cas del'industrie de la construction (Doctoral dissertation, Paris 1). Paris.

Dora, M., Kumar, M., & Gellynck, X. (2016). Determinants and barriers to lean implementation in food-processing SMEs–a multiple case analysis. Production Planning & Control, 27(1), 1-23.

Duggan, K. J. (2018). Creating mixed model value streams: practical lean techniques for building to demand. CRC Press.

Eller, R., Alford, P., Kallmünzer, A., & Peters, M. (2020). Antecedents, consequences, and challenges of small and medium-sized enterprise digitalization. Journal of Business Research, 112, 119-127.

ElMaraghy, H., & Moussa, M. (2019). Optimal platform design and process plan for managing variety using hybrid manufacturing. CIRP Annals, 68(1), 443-446.

Engin, O., & Güçlü, A. (2018). A new hybrid ant colony optimization algorithm for solving the no-wait flow shop scheduling problems. Applied Soft Computing, 72, 166-176.

Fansuri, A. F. H., Rose, A. N. M., Mohamed, N. N., & Ahmad, H. (2017, October). The challenges of lean manufacturing implementation in kitting assembly. In IOP Conference Series: Materials science and engineering (Vol. 257, No. 1, p. 012069). IOP Publishing.

Ferreira, J. J., Fernandes, C. I., & Ferreira, F. A. (2019). To be or not to be digital, that is the question: Firm innovation and performance. Journal of Business research, 101, 583-590.

Filho, M.G., Ganga, G. M. D., & Gunasekaran, A. (2016). Lean manufacturing in Brazilian small and medium enterprises: implementation and effect on performance. International Journal of Production Research, 54(24), 7523-7545.

Filz, M. A., Bosse, J. P., & Herrmann, C. (2023). Digitalization platform for data-driven quality management in multi-stage manufacturing systems. Journal of Intelligent Manufacturing, 1-20.

Ford, H., & Crowther, S. (1922). My life and work. Binker North.

Gallego-García, S., Groten, M., & Halstrick, J. (2022). Integration of improvement strategies and industry 4.0 Technologies in a dynamic evaluation model for target-oriented optimization. Applied Sciences, 12(3), 1530.

Gan, Z. L., Musa, S. N., & Yap, H. J. (2023). A Review of the High-Mix, Low-Volume Manufacturing Industry. Applied Sciences, 13(3), 1687.

Gilchrist, A., & Gilchrist, A. (2016). Introducing Industry 4.0. Industry 4.0: The industrial internet of things, 195-215.

Glover, F. (1989). Tabu search—part I. ORSA Journal on computing, 1(3), 190-206.

Glover, F. (1990). Tabu search—part II. ORSA Journal on computing, 2(1), 4-32.

Gödri, I., Kardos, C., Pfeiffer, A., & Váncza, J. (2019). Data analytics-based decision support workflow for high-mix low-volume production systems. CIRP Annals, 68(1), 471-474.

Gómez P, F. J., & Filho, M. G. (2017). Complementing lean with quick response manufacturing: case studies. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 90, 1897-1910.

Gromova, E. A. (2020, July). Quick response manufacturing as a promising alternative manufacturing paradigm. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 898, No. 1, p. 012047). IOP Publishing.

Groten, M., & Gallego-García, S. (2021). A systematic improvement model to optimize production systems within industry 4.0 environments: A simulation case study. Applied Sciences, 11(23), 11112.

Gupta, S., & Chandna, P. (2020). A case study concerning the 5S lean technique in a scientific equipment manufacturing company. Grey systems: theory and application, 10(3), 339-357.

Hajji, M. K., Hadda, H., & Dridi, N. (2023). Makespan Minimization for the Two-Stage Hybrid Flow Shop Problem with Dedicated Machines: A Comprehensive Study of Exact and Heuristic Approaches. Computation, 11(7), 137.

Helu, M., Hedberg Jr, T., & Feeney, A. B. (2017). Reference architecture to integrate heterogeneous manufacturing systems for the digital thread. CIRP journal of manufacturing science and technology, 19, 191-195.

Herlambang, A., & Hidayati, J. (2019, May). Strategy and policy for increasing work productivity of operators in the steel industry through work improvement with lean method (journal review). In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 505, No. 1, p. 012074). IOP Publishing.

Holland, J. H. (1992). Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence. MIT press.

Hong, J., Liao, Y., Zhang, Y., & Yu, Z. (2019). The effect of supply chain quality management practices and capabilities on operational and innovation performance: Evidence from Chinese manufacturers. International Journal of Production Economics, 212, 227-235.

Hu, S. J. (2013). Evolving paradigms of manufacturing: From mass production to mass customization and personalization. Procedia CIRP, 7, 3-8.

Hu, Z., Ramaraj, G., & Hu, G. (2020). Production planning with a two-stage stochastic programming model in a kitting facility under demand and yield uncertainties. International Journal of Management Science and Engineering Management, 15(3), 237-246.

Hussain A., Munive-Hernandez J. E., Campean I. F. (2020). Lean approach in a high mix, low volume manufacturing environment-case study. In: Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management, 837-844.

Ishibuchi, H., & Murata, T. (1998). A multi-objective genetic local search algorithm and its application to flowshop scheduling. IEEE transactions on systems, man, and cybernetics, part C (applications and reviews), 28(3), 392-403.

Irani, S. A. (2020). Job shop lean: an industrial engineering approach to implementing lean in high-mix low-volume production systems. CRC Press.

Jamil N., Gholami H., Mat Saman M. Z., Streimikiene D., Sharif S., Zakuan N. (2020). DMAIC-based approach to sustainable value stream mapping: towards a sustainable manufacturing system. Economic research-Ekonomska istraživanja, 33(1), 331-360.

Johansen, K., Rao, S., & Ashourpour, M. (2021). The role of automation in complexities of high-mix in low-volume production–a literature review. Procedia CIRP, 104, 1452-1457.

Junior, R. G. P., Inácio, R. H., da Silva, I. B., Hassui, A., & Barbosa, G. F. (2022). A novel framework for single-minute exchange of die (SMED) assisted by lean tools. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 119(9-10), 6469-6487.

Jünge, G., Alfnes, E., Nujen, B., Emblemsvag, J., & Kjersem, K. (2023). Understanding and eliminating waste in Engineer-To-Order (ETO) projects: a multiple case study. Production Planning & Control, 34(3), 225-241.

Jungwattanakit, J., Reodecha, M., Chaovalitwongse, P., & Werner, F. (2009). A comparison of scheduling algorithms for flexible flow shop problems with unrelated parallel machines, setup times, and dual criteria. Computers & Operations Research, 36(2), 358-378.

Katoch, S., Chauhan, S. S., & Kumar, V. (2021). A review on genetic algorithm: past, present, and future. Multimedia tools and applications, 80, 8091-8126.

Kennedy, W. J. (1993). Campanian and Maastrichtian ammonites from the Mons Basin and adjacent areas (Belgium). Bulletin de l'Institut royal des Sciences naturelles de Belgique, Sciences de la Terre, 63, 99-131.

Kerzner, H. (2022). Project management metrics, KPIs, and dashboards: a guide to measuring and monitoring project performance. John Wiley & Sons.

Keskin, K., & Engin, O. (2021). A hybrid genetic local and global search algorithm for solving no-wait flow shop problem with bi criteria. SN Applied Sciences, 3(6), 628.

Khurshid, B., Maqsood, S., Omair, M., Sarkar, B., Ahmad, I., & Muhammad, K. (2021). An Improved Evolution Strategy Hybridization With Simulated Annealing for Permutation Flow Shop Scheduling Problems. IEEE Access, 9, 94505-94522.

King, P. L. (2019). Lean for the process industries: dealing with complexity. CRC Press.

Kirkpatrick, S., Gelatt Jr, C. D., & Vecchi, M. P. (1983). Optimization by simulated annealing. science, 220(4598), 671-680.

Kjersem, K., Halse, L. L., Kiekebos, P., & Emblemsvåg, J. (2015). Implementing lean in engineer-to-order industry: a case study. In Advances in Production Management Systems: Innovative Production Management Towards Sustainable Growth: IFIP WG 5.7 International Conference, APMS 2015, Tokyo, Japan, September 7-9, 2015, Proceedings, Part II 0 (pp. 248-255). Springer International Publishing.

Klöber-Koch, J., Pielmeier, J., Grimm, S., Brandt, M. M., Schneider, M., & Reinhart, G. (2017). Knowledge-based decision making in a cyber-physical production scenario. Procedia Manufacturing, 9, 167-174.

Kocsi, B., Matonya, M. M., Pusztai, L. P., & Budai, I. (2020). Real-time decision-support system for high-mix low-volume production scheduling in industry 4.0. Processes, 8(8), 912.

Koohestani, B. (2020). A crossover operator for improving the efficiency of permutation-based genetic algorithms. Expert Systems with Applications, 151, 113381.

Kumar, R., Singh, R. K., & Dwivedi, Y. K. (2020). Application of industry 4.0 technologies in SMEs for ethical and sustainable operations: Analysis of challenges. Journal of Cleaner Production, 275 , 124063.

Kumar, A., Gattoufi, S., & Reisman, A. (2007). Mass customization research: trends, directions, diffusion intensity, and taxonomic frameworks. International Journal of Flexible Manufacturing Systems, 19, 637-665.

Lane, G. (2020). Made-to-order Lean: Excelling in a High-mix, Low-volume Environment. CRC Press.

Leksic, I., Stefanic, N., & Veza, I. (2020). The impact of using different lean manufacturing tools on waste reduction. Advances in Production Engineering & Management, 15(1).

Leonardo, D. G., Sereno, B., Silva, D. S. A. D., Sampaio, M., Massote, A. A., & Simões, J. C. (2017). Implementation of hybrid Kanban-CONWIP system: A case study. Journal of Manufacturing Technology Management, 28(6), 714-736.

Li, M., Zhong, R. Y., Qu, T., & Huang, G. Q. (2022). Spatial–temporal out-of-order execution for advanced planning and scheduling in cyber-physical factories. Journal of Intelligent Manufacturing, 1-18.

Liang, T., Zhou, L., & Jiang, Z. (2022, December). Integrated Scheduling of Production and Material Delivery in a Make-to-order Flow Shop. In 2022 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM) (pp. 1422-1426).

Liao, Ching-Jong, Evi Tjandradjaja, and Tsui-Ping Chung. An approach using particle swarm optimization and bottleneck heuristic to solve hybrid flow shop scheduling problem. Applied Soft Computing 12.6 (2012): 1755-1764.

Liker J. K. (2004): The Toyota way – 14 management principles from the world's greatest manufacturer, McGraw-Hill, New York.

Liu, C., Li, Z., Tang, J., Wang, X., & Yao, M. J. (2021). How SERU production system improves manufacturing flexibility and firm performance: an empirical study in China. Annals of Operations Research, 1-26.

Lopes, N. R., Filho, M. G., Ganga, G. M. D., Tortorella, G. L., Callefi, M. H. B. M., & Lima, B. T. D. (2023). Critical factors for sustaining lean manufacturing in the long-term: a multi-method study. European Journal of Industrial Engineering, 17(1), 60-89.

Louis, A., Alpan, G., Penz, B., & Benichou, A. (2022). Mixed-model sequencing versus car sequencing: comparison of feasible solution spaces. International Journal of Production Research, 1-20.

Lugert, A., Batz, A., & Winkler, H. (2018). Empirical assessment of the future adequacy of value stream mapping in manufacturing industries. Journal of Manufacturing Technology Management, 29(5), 886-906.

Ma, Z., Yang, Z., Liu, S., & Wu, S. (2018). Optimized rescheduling of multiple production lines for flowshop production of reinforced precast concrete components. Automation in Construction, 95, 86-97.

Maalouf, M., & Zaduminska, M. (2019). A case study of VSM and SMED in the food processing industry. Management and Production Engineering Review, 10(2), 60-68.

Magnani, F., Carbone, V., & Moatti, V. (2019, April). The human dimension of lean: a literature review. In Supply Chain Forum: An International Journal (Vol. 20, No. 2, pp. 132-144).

Marques, M., Agostinho, C., Zacharewicz, G., & Jardim-Gonçalves, R. (2017). Decentralized decision support for intelligent manufacturing in Industry 4.0. Journal of Ambient Intelligence and Smart Environments, 9(3), 299-313.

Masmoudi, M. A., Braekers, K., Masmoudi, M., & Dammak, A. (2017). A hybrid genetic algorithm for the heterogeneous dial-a-ride problem. Computers & Operations Research, 81, 1-13.

Matt, D. T., Rauch, E., & Dallasega, P. (2014). Mini-factory–a learning factory concept for students and small and medium sized enterprises. Procedia CIRP, 17, 178-183.

Messaoudene, Z., & Gramdi, J. (2007). Proposition d'un cadre conceptuel et systémique des systèmes de production lean. 7è Congrès international de Génie Industriel, Trois Rivières, Canada.

Miqueo, A., Torralba, M., & Yagüe-Fabra, J. A. (2020). Lean manual assembly 4.0: A systematic review. Applied Sciences, 10(23), 8555.

Mohamad, E., Shafee, N. A. Q. M., Halim, A. S., ITO, T., Oktavianty, O., & ABD Rahman, M. S. (2023). Kanban Apps for Lean Practitioners. In The Proceedings of Manufacturing Systems Division Conference 2023 (p. 107). The Japan Society of Mechanical Engineers.

Mor, R. S., Bhardwaj, A., Singh, S., & Sachdeva, A. (2019). Productivity gains through standardization-of-work in a manufacturing company. Journal of Manufacturing Technology Management, 30(6), 899-919.

Morariu, C., Morariu, O., Răileanu, S., & Borangiu, T. (2020). Machine learning for predictive scheduling and resource allocation in large scale manufacturing systems. Computers in Industry, 120, 103244.

Murata, T., Ishibuchi, H., & Tanaka, H. (1996). Genetic algorithms for flowshop scheduling problems. Computers & Industrial Engineering, 30(4), 1061-1071.

Naderi, B., Ghomi, S. F., Aminnayeri, M., & Zandieh, M. (2011). Modeling and scheduling open shops with sequence-dependent setup times to minimize total completion time. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 53, 751-760.

Nambiar, A. N. (2010, March). Modern Manufacturing Paradigms- A Comparison. In World Congress on Engineering 2012. July 4-6, 2012. London, UK. (Vol. 2182, pp. 1662-1667). International Association of Engineers.

Napoleone, A., Macchi, M., & Pozzetti, A. (2020). A review on the characteristics of cyber-physical systems for the future smart factories. Journal of manufacturing systems, 54, 305-335.

Nawaz, M., Enscore Jr, E. E., & Ham, I. (1983). A heuristic algorithm for the m-machine, n-job flow-shop sequencing problem. Omega, 11(1), 91-95.

Neufeld, J. S., Schulz, S., & Buscher, U. (2023). A systematic review of multi-objective hybrid flow shop scheduling. European Journal of Operational Research, 309(1), 1-23.

Newton, M. H., Riahi, V., Su, K., & Sattar, A. (2019). Scheduling blocking flowshops with setup times via constraint guided and accelerated local search. Computers & Operations Research, 109, 64-76.

Nouinou, H., Asadollahi-Yazdi, E., Baret, I., Nguyen, N. Q., Terzi, M., Ouazene, Y., ... & Kelly, R. (2023). Decision-making in the context of Industry 4.0: Evidence from the textile and clothing industry. Journal of Cleaner Production, 136184.

Ohno T (1988) Toyota production system: beyond large-scale production. Productivity Press, Oregon (USA).

Oğuz, C., & Ercan, M. F. (2005). A genetic algorithm for hybrid flow-shop scheduling with multiprocessor tasks. Journal of Scheduling, 8, 323-351.

Pagnozzi, F., & Stützle, T. (2019). Automatic design of hybrid stochastic local search algorithms for permutation flowshop problems. European Journal of Operational Research, 276(2), 409-421.

Park, Y. W., & Shintaku, J. (2022). Sustainable Human–Machine Collaborations in Digital Transformation Technologies Adoption: A Comparative Case Study of Japan and Germany. Sustainability, 14(17), 10583.

Parviainen, P., Tihinen, M., Kääriäinen, J., & Teppola, S. (2017). Tackling the digitalization challenge: how to benefit from digitalization in practice. International Journal of Information Systems and Project Management, 5(1), 63-77.

Pearce A., Pons D., Neitzert T. (2018). Implementing lean—Outcomes from SME case studies. Operations Research Perspectives, 5, 94-104.

Pekarcikova, M., Trebuna, P., Kliment, M., & Dic, M. (2021). Solution of bottlenecks in the logistics flow by applying the kanban module in the tecnomatix plant simulation software. Sustainability, 13(14), 7989.

Perdomo-Verdecia, V., Sacristán-Díaz, M., & Garrido-Vega, P. (2022). Lean management in hotels: Where we are and where we might go. International Journal of Hospitality Management, 104, 103250.

Pereira, J., Silva, F. J. G., Bastos, J. A., Ferreira, L. P., & Matias, J. C. O. (2019). Application of the A3 methodology for the improvement of an assembly line. Procedia Manufacturing, 38, 745-754.

Pinzone, M., Fantini, P., Perini, S., Garavaglia, S., Taisch, M., & Miragliotta, G. (2017). Jobs and skills in Industry 4.0: an exploratory research. In Advances in Production Management Systems. The Path to Intelligent, Collaborative and Sustainable Manufacturing: IFIP WG 5.7 International Conference, APMS 2017, Hamburg, Germany, September 3-7, 2017, Proceedings, Part I (pp. 282-288). Springer International Publishing.

Pizoń, J., & Gola, A. (2023). Human–Machine Relationship—Perspective and Future Roadmap for Industry 5.0 Solutions. Machines, 11(2), 203.

Possik, J., Zouggar-Amrani, A., Vallespir, B., & Zacharewicz, G. (2022). Lean techniques impact evaluation methodology based on a co-simulation framework for manufacturing systems. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 35(1), 91-111.

Powell D. J. (2018). Kanban for lean production in high mix, low volume environments. IFAC-PapersOnLine, 51(11), 140-143.

Powell, D., Lodgaard, E., & Mogos, M. F. (2021). Quick-Scan–Towards a Strategy for Responsive and Resilient Value Chains. Procedia CIRP, 104, 1355-1360.

Powell, D. J., & Bartolome, C. P. (2020, December). Enterprise-wide value stream mapping: from dysfunctional organization to cross-functional, collaborative learning and improvement. In 2020 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM) (pp. 551-555). IEEE.

Prasad, M. M., Dhiyaneswari, J. M., Jamaan, J. R., Mythreyan, S., & Sutharsan, S. M. (2020). A framework for lean manufacturing implementation in Indian textile industry. Materials today: proceedings, 33, 2986-2995.

Psarommatis, F., Prouvost, S., May, G., & Kiritsis, D. (2020). Product quality improvement policies in industry 4.0: characteristics, enabling factors, barriers, and evolution toward zero defect manufacturing. Frontiers in Computer Science, 2, 26.

Ramadan, M., Salah, B., Othman, M., & Ayubali, A. A. (2020). Industry 4.0-based real-time scheduling and dispatching in lean manufacturing systems. Sustainability, 12(6), 2272.

Raidl, G. R., Puchinger, J., & Blum, C. (2019). Metaheuristic hybrids. Handbook of metaheuristics, 385-417.

Rao, Y., Meng, R., Zha, J., & Xu, X. (2020). Bi-objective mathematical model and improved algorithm for optimisation of welding shop scheduling problem. International Journal of Production Research, 58(9), 2767-2783.

Reeves, Colin R. A genetic algorithm for flowshop sequencing. Computers & Operations Research 22.1 (1995): 5-13.

Ricondo Iriondo, I., Serrano Lasa, I., & De Castro Vila, R. (2016). Takt time as a lever to introduce Lean production in mixed engineer-to-order/make-to-order machine tool manufacturing companies. International. International Journal of Industrial Engineering, 23(2).

Rolf, B., Reggelin, T., Nahhas, A., Lang, S., & Müller, M. (2020). Assigning dispatching rules using a genetic algorithm to solve a hybrid flow shop scheduling problem. Procedia Manufacturing, 42, 442-449.

Romero, D., Gaiardelli, P., Wuest, T., Powell, D., & Thürer, M. (2020). New forms of Gemba walks and their digital tools in the digital lean manufacturing world. In Advances in Production Management Systems. Towards Smart and Digital Manufacturing: IFIP WG 5.7 International Conference, APMS 2020, Novi Sad, Serbia, August 30–September 3, 2020, Proceedings, Part II (pp. 432-440). Springer International Publishing.

Romero, L. F., & Arce, A. (2017). Applying value stream mapping in manufacturing: A systematic literature review. IFAC-PapersOnLine, 50(1), 1075-1086.

Rossini, M., Audino, F., Costa, F., Cifone, F. D., Kundu, K., & Portioli-Staudacher, A. (2019). Extending lean frontiers: a kaizen case study in an Italian MTO manufacturing company. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 104, 1869-1888.

Rossini, M., Powell, D.J. et Kundu, K. (2023). Lean supply chain management and Industry 4.0: a systematic literature review, International Journal of Lean Six Sigma, vol. 14 no 2, p. 253-276.

Rossini, M., Cifone, F. D., Kassem, B., Costa, F., & Portioli-Staudacher, A. (2021). Being lean: how to shape digital transformation in the manufacturing sector. Journal of Manufacturing Technology Management, 32(9), 239-259.

Ruiz, R., Maroto, C., & Alcaraz, J. (2006). Two new robust genetic algorithms for the flowshop scheduling problem. Omega, 34(5), 461-476.

Ruiz, R., & Maroto, C. (2006). A genetic algorithm for hybrid flowshops with sequence dependent setup times and machine eligibility. European Journal of Operational Research, 169(3), 781-800.

Sartal, A., Llach, J., & León-Mateos, F. (2022). Do technologies really affect that much? Exploring the potential of several industry 4.0 technologies in today's lean manufacturing shop floors. Operational Research, 22(5), 6075-6106.

Saurin, T. A., Luz Tortorella, G., Soliman, M., & Garza-Reyes, J. A. (2021). Lean production myths: an exploratory study. Journal of Manufacturing Technology Management, 32(1), 1-19.

Schniederjans, D. G., Curado, C., & Khalajhedayati, M. (2020). Supply chain digitisation trends: An integration of knowledge management. International Journal of Production Economics, 220, 107439.

Schulze, F., & Dallasega, P. (2023). Barriers to lean implementation in engineer-to-order manufacturing with subsequent assembly on-site: state of the art and future directions. Production Planning & Control, 34(1), 91-115.

Schulze, F., & Dallasega, P. (2020). Industry 4.0 concepts and lean methods mitigating traditional losses in engineer-to-order manufacturing with subsequent assembly on-site: a framework. Procedia Manufacturing, 51, 1363-1370.

Selimović, I. (2022). Advantages and Disadvantages of Principles of Scientific Management and Lean Organisation. Challenges of the Future, 7(1).

Seth, D., Seth, N., & Dhariwal, P. (2017). Application of value stream mapping (VSM) for lean and cycle time reduction in complex production environments: a case study. Production Planning & Control, 28(5), 398-419.

Shingo, S. (1985). A revolution in manufacturing: the SMED system. Routledge.

Sikhwal, R. K., & Childs, P. R. (2021). Towards mass individualisation: setting the scope and industrial implication. Design Science, 7, e16.

Siong, B. C., Eng, C. K., & Teknikal, U. (2018). Implementing Quick Response Manufacturing to Improve Delivery Performance in an ETO Company. International Journal of Engineering & Technology, 7(2.28), 38-46.

Sivanandam, S. N., Deepa, S. N., Sivanandam, S. N., & Deepa, S. N. (2008). Genetic algorithm optimization problems. Introduction to Genetic Algorithms, 165-209.

Slomp, J., Bokhorst, J. A., & Germs, R. (2009). A lean production control system for high-variety/low-volume environments: a case study implementation. Production Planning and Control, 20(7), 586-595.

Soori, M., Arezoo, B., & Dastres, R. (2023). Virtual manufacturing in industry 4.0: A review. Data Science and Management.

Suri, R. (2010). It's about time: the competitive advantage of quick response manufacturing. CRC Press.

Tahmina, T., Garcia, M., Geng, Z., & Bidanda, B. (2022). A Survey of Smart Manufacturing for High-Mix Low-Volume Production in Defense and Aerospace Industries. Flexible Automation and Intelligent Manufacturing: The Human-Data-Technology Nexus: Proceedings of FAIM 2022, June 19–23, 2022, Detroit, Michigan, USA, 237-245.

Talbi, E. G. (2009). Metaheuristics: from design to implementation. John Wiley & Sons.

Tang, L., & Liu, J. (2002). A modified genetic algorithm for the flow shop sequencing problem to minimize mean flow time. Journal of Intelligent Manufacturing, 13, 61-67.

Tantik, E., & Anderl, R. (2017). Integrated data model and structure for the asset administration shell in industrie 4.0. Procedia CIRP, 60, 86-91.

Tezel, A., Taggart, M., Koskela, L., Tzortzopoulos, P., Hanahoe, J., & Kelly, M. (2020). Lean construction and BIM in small and medium-sized enterprises (SMEs) in construction: a systematic literature review. Canadian Journal of Civil Engineering, 47(2), 186-201.

Thun, S., Bakås, O., & Storholmen, T. C. B. (2022). Development and implementation processes of digitalization in engineer-to-order manufacturing: enablers and barriers. AI & Society, 37(2), 725-743.

Tomašević, I., Stojanović, D., Slović, D., Simeunović, B., & Jovanović, I. (2021). Lean in High-Mix/Low-Volume industry: a systematic literature review. Production Planning & Control, 32(12), 1004-1019.

Tortorella, G. L., & Fettermann, D. (2018). Implementation of Industry 4.0 and lean production in Brazilian manufacturing companies. International Journal of Production Research, 56(8), 2975-2987.

Tortorella, G. L., Pradhan, N., Macias de Anda, E., Trevino Martinez, S., Sawhney, R., & Kumar, M. (2020). Designing lean value streams in the fourth industrial revolution era: proposition of technology-integrated guidelines. International Journal of Production Research, 58(16), 5020-5033.

Tripathi, V., Chattopadhyaya, S., Mukhopadhyay, A. K., Sharma, S., Li, C., & Di Bona, G. (2022). A sustainable methodology using lean and smart manufacturing for the cleaner production of shop floor management in industry 4.0. Mathematics, 10(3), 347.

Tseng, L. Y., & Lin, Y. T. (2009). A hybrid genetic local search algorithm for the permutation flowshop scheduling problem. European Journal of Operational Research, 198(1), 84-92.

Umam, M. S., Mustafid, M., & Suryono, S. (2022). A hybrid genetic algorithm and tabu search for minimizing makespan in flow shop scheduling problem. Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences, 34(9), 7459-7467.

Upton, D. M. (1994). The management of manufacturing flexibility. California Management Review, 36(2), 72-89.

Vallandingham, L. R., Strandhagen, J. W., Alfnes, E., & Strandhagen, J. O. (2018). Strategic Framework for Manual Assembly System Design. In Advanced Manufacturing and Automation VII 7 (pp. 229-237). Springer Singapore.

Van Goubergen, D., & Van Landeghem, H. (2002). Rules for integrating fast changeover capabilities into new equipment design. Robotics and computer-integrated manufacturing, 18(3-4), 205-214.

Vidal, M. (2007). Lean production, worker empowerment, and job satisfaction: A qualitative analysis and critique. Critical Sociology, 33(1-2), 247-278.

Villar-Fidalgo, L., Espinosa Escudero, M. D. M., & Domínguez Somonte, M. (2019). Applying kaizen to the schedule in a concurrent environment. Production Planning & Control, 30(8), 624-638.

Villalonga, A., Negri, E., Biscardo, G., Castano, F., Haber, R. E., Fumagalli, L., & Macchi, M. (2021). A decision-making framework for dynamic scheduling of cyber-physical production systems based on digital twins. Annual Reviews in Control, 51, 357-373.

Voigt, C., Harnecker, L., Kirchberger, M., & Franke, J. (2021, May). An Analysis of Redundancy in High Volume High Mix Quality Testing Systems in Electronics Production. In 2021 44th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE) (pp. 1-6). IEEE.

Wang, S. S., Chiou, C. C., & Luong, H. T. (2019, August). Application of SMED methodology and scheduling in high-mix low volume production model to reduce setup time: A case of s company. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 598, No. 1, p. 012058). IOP Publishing.

Womack, J. P., & Jones, D. T. (1997). Lean thinking—banish waste and create wealth in your corporation. Journal of the Operational Research Society, 48(11), 1148-1148.

Womack, J. P., Jones, D. T., & Roos, D. (2007). The machine that changed the world: The story of lean production--Toyota's secret weapon in the global car wars that is now revolutionizing world industry. Simon and Schuster.

Xu, W., Sun, H. Y., Awaga, A. L., Yan, Y., & Cui, Y. J. (2022). Optimization approaches for solving production scheduling problem: A brief overview and a case study for hybrid flow shop using genetic algorithms. Advances in Production Engineering & Management, 17(1), 45-56.

Xuan, Hua, Huixian Zhang, and Bing Li. An improved discrete artificial bee colony algorithm for flexible flowshop scheduling with step deteriorating jobs and sequence-dependent setup times. Mathematical Problems in Engineering 2019 (2019): 1-13.

Yadav, V., Jain, R., Mittal, M. L., Panwar, A., & Lyons, A. C. (2019). The propagation of lean thinking in SMEs. Production Planning & Control, 30(10-12), 854-865.

Yan, S., Yang, P., Zhu, D., Zheng, W., & Wu, F. (2021). Improved sparrow search algorithm based on iterative local search. Computational Intelligence and Neuroscience, 2021.

Yassine, T., Bacha, M. B. S., Fayek, F., & Hamzeh, F. (2014, June). Implementing takt-time planning in construction to improve work flow. In Proc. 22nd Ann. Conf. of the Int'l Group for Lean Construction (pp. 23-27).

Yin, Y., Stecke, K. E., Swink, M., & Kaku, I. (2017). Lessons from seru production on manufacturing competitively in a high cost environment. Journal of Operations Management, 49, 67-76.

Yu, C., Semeraro, Q., & Matta, A. (2018). A genetic algorithm for the hybrid flow shop scheduling with unrelated machines and machine eligibility. Computers & Operations Research, 100, 211-229.

Yusoof, M. Y. M., Mohamed, N. M. Z. N., & Mustapah, M. M. (2022). The effect of the supply chain in the quick response manufacturing (QRM) environment in the automotive industry. Procedia Computer Science, 207, 2116-2124.

Zhang, X., Liu, C., Li, W., Evans, S., & Yin, Y. (2017). Effects of key enabling technologies for seru production on sustainable performance. Omega, 66, 290-307.

Zhang, L., Narkhede, B. E., & Chaple, A. P. (2017b). Evaluating lean manufacturing barriers: an interpretive process. Journal of Manufacturing Technology Management, 28(8), 1086-1114.

Zhang, B., Niu, Z., & Liu, C. (2020). Lean tools, knowledge management, and lean sustainability: The moderating effects of study conventions. Sustainability, 12(3), 956.

Zhong, R. Y., Dai, Q. Y., Qu, T., Hu, G. J., & Huang, G. Q. (2013). RFID-enabled real-time manufacturing execution system for mass-customization production. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 29(2), 283-292.

Zennaro, I., Finco, S., Battini, D., & Persona, A. (2019). Big size highly customised product-manufacturing systems: a literature review and future research agenda. International Journal of Production Research, 57(15-16), 5362-5385.

Annexe 1

Historique de Manitowoc

Manitowoc est une entreprise américaine fondée en 1902 au cœur d'une petite ville américaine du même nom. Manitowoc voit le jour suite à l'association de trois hommes passionnés qui se lancent dans la grande aventure de la construction, de l'entretien, et de la réparation de navires.

Dans les années 1920, l'entreprise se développe et se diversifie dans la fabrication de grues portuaires. Cette diversification lui permet de traverser la crise économique des années 1930. Elle est d'ailleurs la seule entreprise de construction navale de la région à en sortir indemne.

Au printemps 2000, Manitowoc fait l'acquisition de la marque POTAIN, fabricant historique français de Grue à Tour. L'intégration de Potain à la famille Manitowoc vaut l'ajout d'usines de construction en France, en Italie, au Portugal et en Chine. Manitowoc prend pied en Europe et en Asie.

En 2002, Manitowoc effectue une nouvelle acquisition, celle de Grove Cranes, fabricant de grues mobiles télescopiques en Allemagne et aux états unis.

Manitowoc devient une entreprise internationale, spécialisée dans la fabrication de grues, leader mondial sur le marché de la construction.

La diversité des produits fabriqués et l'ouverture mondiale permettent à l'entreprise de traverser les crises, qui n'impactent jamais tous les produits, ni tous les continents.

Annexe 2

Marques de grues Manitowoc

Manitowoc rassemble aujourd'hui les produits de levage de cinq grandes marques à travers le monde (voir *Figure 77*).
Manitowoc possède 8 sites de production dans 7 pays, environ 40 entités commerciales et de service après-vente dans 24 pays et près de 5 000 employés en Amérique du Nord, Amérique latine, Europe, Afrique, Moyen-Orient, Asie et Australie.

Manitowoc possède 5 sites en Europe, dont 2 en France : St Nizier sous Charlieu et Moulins.



Figure 77 : Marques de grues Manitowoc

Annexe 3

Le MOS, le référentiel Lean interne au groupe Manitowoc. P79

Value Stream Organization

What is a Value Stream?

A value stream is all the actions (both value added and non-value added) currently required to bring a product to the customer. It starts with design concept through product launch, from raw material to delivery to our customer.

The Ideal Value Stream

- Includes all the activities we do to create value for our customers
- Consists of a dedicated team of people working together to improve flow and create more value
- Organizes people around the flow of the product or service to the customer
- Includes all the people directly and indirectly required to support the operation
- Consists of people who are dedicated to only one value stream
- Is led by a value stream manager with complete control of every aspect of the value stream operation

Real Value Streams may have

- Shared people: When there are not enough people with the required skills, a person may work in more than one value stream. Over time, people are cross-trained, and skills are moved into the value stream
- Monuments: Machines or equipment may be shared by more than one value stream. When buying capital equipment, equipment is right-sized to match the flow and minimize monuments over time.

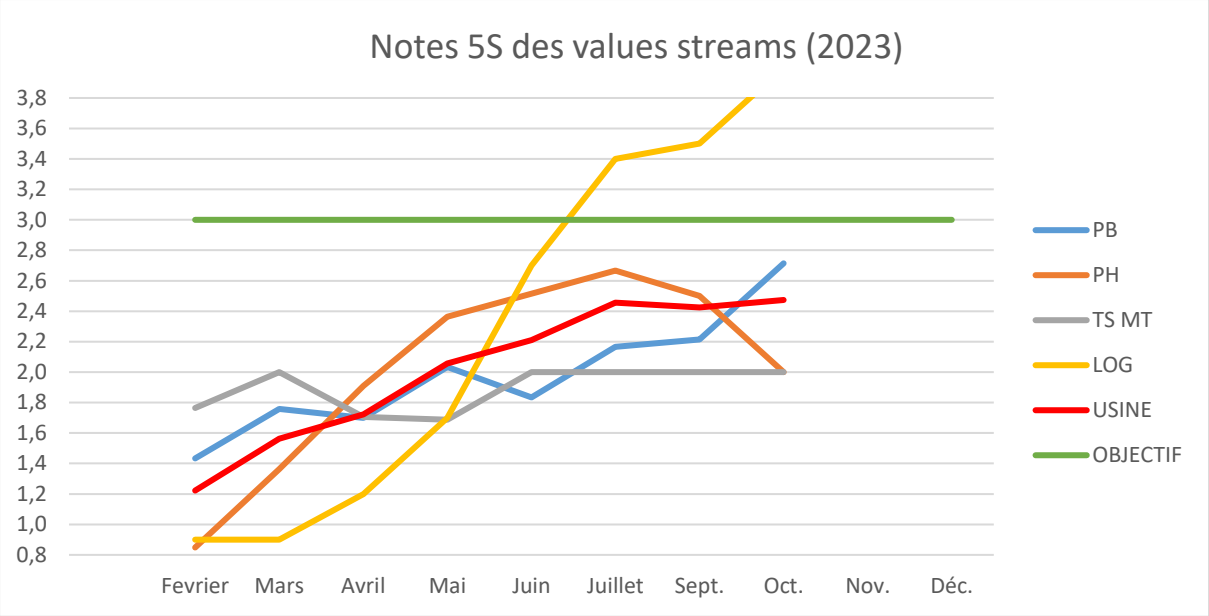
What is a Value Stream Organization?

Traditional manufacturing produces large batches of products. In a "lean" production facility, batching is eliminated, and the focus is on continuous flow, in the same way that we don't want to batch products we also don't want to batch our people into silo's or functional groups In the past, companies also organized themselves based on functional groups with separate production, logistics, quality, purchasing and engineering departments, each focused on doing its job. A Value Stream Organization focuses on the process and its flow, not the job. All functions work together as one team, moving the product from design to delivery. The functions identify and implement corrective actions on any disruption to the flow of information and the product.

In a Value Stream Organization, we go with the flow. We no longer batch products and we don't arrange people into silos or functional groups.

Annexe 4

Les notes 5S des values streams



Annexe5

Les indicateurs de performance suivis (Sécurité ; Energie-Environnement ; Qualité ; Délais ; Coût ; Motivation)

