

Analyse du Lean dans des environnements de production à grande variété et faible volume : Etude des limites dans le contexte de la fabrication de grues à tour

Zineb Mrabbaj¹, Zahir Messaoudene², Bernard Penz³, Malek Masmoudi^{4,5}, Bertrand Depale⁶

¹Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, G-SCOP, 38000 Grenoble, France, zinebmrabbaj0@gmail.com,

²ECAM Lasalle Campus de Lyon, 69351 Lyon, France, zahir.messaoudene@ecam.fr

³Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, G-SCOP, 38000 Grenoble, France, bernard.penz@grenoble-inp.fr

⁴College of Engineering, University of Sharjah, Sharjah, United Arab Emirates, mmasmoudi@sharjah.ac.ae

⁵Université Jean-Monnet, Saint-Étienne, France

⁶Manitowoc Crane Group France, 03000 Moulins, France, bertrand.depale@manitowoc.com

Résumé : Le Lean, initialement développé pour les environnements à fort volume de production et faible variété de produits, est de plus en plus adopté dans des contextes à grande variété et faible volume. Mais ces environnements diffèrent des conditions d'origine du Lean. La littérature reflète trois courants de pensée divergents : Lean universel, Lean adaptable ou Lean inadapté. Cette étude, menée dans une entreprise de fabrication de grues, montre les limites de certaines pratiques Lean, notamment le travail standardisé, inefficace face à une grande diversité de produits. Le chantier pilote du Kanban a entraîné une baisse de productivité de 22%, tandis que le SMED, bien qu'ayant réduit le temps de changement de série de 32%, s'est révélé peu ergonomique. L'étude souligne l'importance d'adapter les pratiques Lean à ces environnements.

Mots clés : Environnements HMLV ; Kanban ; Lean manufacturing ; Limites du Lean, SMED.

Analysis of Lean in high-variety, low-volume production environments: A study of its limitations in the context of tower crane manufacturing

Abstract: Lean, initially developed for environments with high production volume and low product variety, is increasingly being adopted in high variety and low volume contexts. However, these environments differ from the original conditions of Lean. The literature reflects three divergent perspectives: universal Lean, adaptable Lean, or inapplicable Lean. This study, conducted in a crane manufacturing company, shows the limits of certain Lean practices, in particular standardized work, which is inefficient when faced with a large diversity of products. The Kanban pilot project led to a 22% drop in productivity, while SMED, although it reduced the changeover time by 32%, proved to be not very ergonomic. The study therefore highlights the importance of adapting Lean practices to these environments.

Keywords : HMLV environments ; Kanban ; Lean manufacturing ; Limitations of Lean ; SMED.

*This is a PDF file of an article that has undergone enhancements after acceptance, such as the addition of a cover page and metadata, and formatting for readability, but it is not yet the definitive version of record. This version will undergo additional copyediting, typesetting and review before it is published in its final form, but we are providing this version to give early visibility of the article.

Citation: Mrabbaj, Z., Messaoudene, Z., Penz, B., Masmoudi, M., & Depale, B. Analyse du Lean dans des environnements de production à grande variété et faible volume : Etude des limites dans le contexte de la fabrication de grues à tour. *Revue Française de Gestion Industrielle*, 39(X), XX-XX. <https://doi.org/10.53102/2025.39.xx.xx>

Historique : reçu le 31/12/2024, accepté le 29/12/2025, en ligne le 04/02/2026

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>), permitting all non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. INTRODUCTION

Depuis plus de trois décennies, le Lean est considéré comme un levier majeur de compétitivité industrielle. Pourtant, plusieurs études estiment que 60 à 90 % des initiatives Lean échouent (Pearce et al., 2018), en particulier lorsqu'elles sont transposées en dehors de leur contexte d'origine. Ce constat alimente un débat académique et managérial toujours d'actualité : pourquoi une méthode si largement adoptée rencontre-t-elle autant de difficultés hors de l'automobile, son berceau historique ?

Conçu dans l'industrie automobile japonaise et popularisé par le livre *The Machine That Changed the World* (Womack et al., 2007), le Lean a permis à de nombreuses organisations d'obtenir un avantage concurrentiel par la réduction des coûts, l'amélioration de la qualité et la diminution des délais de livraison (Tomašević et al., 2021). Ces réussites sont toutefois principalement observées dans des environnements stables, à fort volume et faible variété de produits.

À l'inverse, les environnements caractérisés par une fabrication à grande variété et à faible volume (High Mix, Low Volume, HMLV : Acronyme anglais), posent des défis spécifiques. Les entreprises HMLV se caractérisent par une grande variété de produits à fabriquer, tout en maintenant des volumes de production relativement faibles pour chaque type de produit (Kocsi et al., 2020). Cette combinaison complexe pose de nombreux défis opérationnels, tels que la gestion des stocks et des encours, des délais de livraison allongés et une utilisation moins efficace des ressources (Tahmina et al., 2022). De plus, les caractéristiques diversifiées, voire uniques, des produits, augmentent la complexité des processus de production, notamment lorsqu'une grande partie des opérations reste manuelle. C'est ce type de défis auquel sont confrontées les entreprises de fabrication de moyens de levage, et en particulier des grues à tour, comme l'entreprise Manitowoc (Duret, 2016). Ces spécificités interrogent directement la compatibilité du Lean, conçu pour des environnements répétitifs et stables.

La littérature académique reflète trois courants de pensée divergents :

1. **Lean universel** (Womack & Jones, 1997 ; Birkie et al., 2017).
2. **Lean adaptable** (Rossini et al., 2019 ; Schulze & Dallasega, 2020).
3. **Lean inadapté** (Tomasevic et al., 2021 ; Lopes et al., 2023).

Dans ce débat, un constat majeur s'impose : peu d'études empiriques détaillent de manière critique la mise en œuvre du Lean dans l'industrie des équipements de levage, un secteur caractérisé par des contraintes techniques, organisationnelles et humaines fortes. Cet article vise à combler cette lacune en déployant certaines pratiques Lean au sein de l'entreprise Manitowoc (site de Moulins, 03) pour affirmer l'un des points de vue sur cette compatibilité. L'étude se concentre sur la question suivante : **Quelles sont les limites de l'application des pratiques Lean dans un environnement industriel de type HMLV, et comment celles-ci se manifestent-elles dans le cas de la fabrication de grues à tour ?**

Pour y répondre, deux hypothèses spécifiques sont formulées :

- **H1** : L'application du Kanban dans un environnement HMLV entraîne une baisse de productivité, en raison d'une forte variabilité des temps de cycle et une interdépendance séquentielle entre opérations.
- **H2** : La mise en œuvre du SMED réduit significativement le temps de changement de série, mais accroît la charge de travail physique et mentale des opérateurs.

Cet article est structuré comme suit. La section II propose une revue de la littérature, mettant en évidence les convergences et divergences concernant la compatibilité du Lean et ses modèles d'adoption dans les environnements HMLV. La section III présente la méthodologie, justifiant le choix d'une étude de cas unique sur le site de Manitowoc à Moulins. La section IV analyse en détail la problématique identifiée, en examinant les limites des pratiques Lean existantes et en présentant deux chantiers pilotes illustrant la mise en œuvre concrète des pratiques Lean. Les sections V et VI exposent et discutent les résultats obtenus. Enfin, la section VII conclut l'article et propose des perspectives pour des recherches futures.

2. REVUE DE LA LITTÉRATURE

Le succès historique du Lean dans les environnements de production répétitifs et à fort volume a encouragé son adoption universelle dans des contextes plus diversifiés (Antony et al., 2021). Il est désormais utilisé dans des environnements HMLV, où les clients commandent des produits variés, personnalisés et en faible volume (Schulze & Dallasega, 2023).

Cependant, ces contextes diffèrent fortement des productions répétitives à fort volume. Nous examinerons d'abord les spécificités des environnements HMLV et leurs implications pour l'application du Lean. Nous présenterons ensuite les travaux soutenant son universalité, ceux qui en soulignent la nécessité d'adaptation, ainsi que ceux qui mettent en évidence ses limites dans ces contextes. Enfin, une synthèse comparative permettra de positionner le cas étudié et de mettre en lumière les lacunes persistantes de la littérature.

2.1 Les spécificités des environnements HMLV et conséquences sur le Lean

Les environnements HMLV combinent forte variété de produits et faibles volumes par référence (Kocsi et al., 2020). Cette variété se traduit par des nomenclatures multiples, des options personnalisées et des routages complexes, rendant difficile l'application des logiques Lean classiques basées sur la répétitivité (Tahmina et al., 2022).

La faible taille des lots entraîne des changements fréquents de série, augmentant les temps non productifs et pesant sur la productivité (Shingo, 2019). De plus, les flux non linéaires et peu prévisibles complexifient la synchronisation et rendent les systèmes tirés par Kanban difficilement applicables (Slomp et al., 2009).

À cela s'ajoute la dépendance accrue aux fournisseurs et aux composants spécifiques, parfois avec des délais d'approvisionnement longs ou incertains, ce qui expose les flux HMLV aux ruptures (Derrouiche et al., 2022). Enfin, la variabilité et la personnalisation exigent des opérateurs polyvalents et adaptables, et la standardisation doit rester flexible pour préserver la soutenabilité sociale des démarches Lean (Buer et al., 2018).

Face à cette complexité, la littérature académique s'organise autour de trois courants de pensée.

2.2 Trois courants théoriques sur la compatibilité du Lean en HMLV

2.2.1 Le modèle Lean est-il universel et applicable à tous les contextes notamment ceux du HMLV ?

Le Lean est souvent présenté comme un système de production universel, applicable même dans des environnements HMLV (Pearce et al., 2018 ; Antony et al., 2021). Plusieurs études empiriques confirment ce constat : Kjersem et al. (2015) montrent qu'une application des pratiques Lean (PDCA, Kanban, Takt time, ConWIP) dans la construction navale personnalisée a permis de réduire le lead time de 74 %.

De même, Yassine et al. (2014) rapportent qu'un Takt time planning (amélioration du rythme de séquençement) dans le secteur du bâtiment a entraîné une réduction d'environ 50 % du lead time. Une autre étude menée par Slomp et al. (2009) a également illustré qu'une mise en œuvre du Lean dans une entreprise de produits électriques HMLV a réduit le *lead time* et amélioré le niveau de service et la ponctualité des livraisons grâce à l'usage du Kanban et du flux tiré.

D'autres études (Seth et al., 2017 ; Chaple et Narkhede, 2017) confirment ces effets positifs en utilisant diverses pratiques Lean telles que le Gemba walk et la cartographie des flux de valeur (VSM). Ces interventions ont permis des réductions significatives des activités sans valeur ajoutée (≈ 30 %), du temps de cycle (≈ 17 %), des en-cours (61 %), des délais de livraison (59 %) et une amélioration du ratio valeur ajoutée/non-valeur ajoutée (138 %), démontrant la pertinence du Lean même dans des contextes complexes et fortement variés.

Les travaux de recherche exposés ci-dessus sur la caractéristique universelle 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 HMLV avec une implémentation Lean de plus de 10 ans. Les résultats de cette étude ont illustré des gains significatifs : respect des délais de livraison passé de 57 % à 80 % pour l'une, et de 75 % à 93 % avec un taux de satisfaction client de 98,5 % pour l'autre. Ces résultats confirment que le Lean peut être efficace même dans des environnements HMLV réputés complexes.

Toutefois, plusieurs auteurs soulignent qu'une transposition mécanique des pratiques Lean issues du Toyota Production System (TPS) peut s'avérer problématique. Le TPS, initialement conçu pour des environnements de fabrication à la commande (Make to Order), repose sur une approche socio-technique intégrée, combinant qualité à la source, flexibilité et amélioration continue (Ohno, 1988 ; Liker, 2004). À l'inverse, la diffusion occidentale du Lean a parfois été réduite à une simple application d'outils dans des contextes de fabrication pour stock (Make to Stock), centrés sur la standardisation et les volumes (Beauvallet & Houy, 2009). Cette dérive instrumentale constitue une cause fréquente d'échec dans les environnements HMLV. Par ailleurs, la littérature identifie plusieurs freins à la réussite du Lean, résumés dans **Tableau 1**.

Tableau 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).
• Le manque du management.	• (Pearce et al., 2018).
• 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).
• 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 la formation des salariés.	• (Abu et al., 2019 ; Cherrafi et al., 2017 ; 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).
• L'application partielle et incohérente des outils Lean, limitant l'efficacité de la démarche.	• (Changrih & Creusier, 2015)
• 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).

Un autre courant trouvé dans la littérature adopte une position mitigée, reconnaissant à la fois l'efficacité du Lean et ses limites dans les environnements HMLV. Certaines pratiques peuvent être appliquées avec succès, tandis que d'autres nécessitent des adaptations. Ce courant sera exploré dans la section suivante.

2.2.2 L'universalité du modèle Lean est-elle mitigée dans les contextes HMLV ?

Les entreprises qui cherchent à mettre en œuvre le Lean s'efforcent souvent d'adopter les mêmes pratiques qui ont contribué au succès de Toyota. Cependant, la complexité des environnements HMLV rend cette application difficile (Buer et al., 2018 ; Schulze & Dallasega, 2020).

L'un des défis majeurs auquel sont confrontés les managers est la difficulté de choisir les outils et pratiques Lean adaptés à leur environnement et aux 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'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 fier uniquement à leur expérience ni copier mécaniquement les pratiques Lean de Toyota ou d'autres contextes.

La Tableau 2 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. Cette liste, non exhaustive, a été choisie pour sa pertinence dans le contexte de l'entreprise Manitowoc et permet aux lecteurs de consulter les sources pour des informations détaillées sur chaque outil ou pratique Lean. 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.

Tableau 2 : Bénéfices et limites à l'universalité de certains outils/pratiques

Outils et pratiques Lean	Bénéfices	Limites à l'universalité	Auteurs
Kaizen	<ul style="list-style-type: none"> • 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. 	<ul style="list-style-type: none"> • Manque de standardisation du processus de mise en œuvre ; • Besoin d'une vision globale, difficile à atteindre dans les environnements complexes ; • Inadaptation à des environnements spécifiques. 	<ul style="list-style-type: none"> • (Liker, 2004 ; Cannas et al., 2018 ; Villar-Fidalgo et al., 2019 ; Rossini et al., 2021 ; Schulze & Dallasega, 2020).
JIT (Juste-à-Temps)	<ul style="list-style-type: none"> • Amélioration de l'efficacité opérationnelle ; • Réduction des coûts de stockage ; • Meilleure gestion des ressources. 	<ul style="list-style-type: none"> • Difficultés de synchronisation avec la demande en forte variabilité ; • Instabilité des processus ; • Prévisions de demande précises requises ; • Dépendance forte aux fournisseurs • Complexité des flux en grande variété de produits 	<ul style="list-style-type: none"> • (Bortolotti et al., 2013 ; Birkie & Trucco, 2016 ; King, 2019 ; Braglia et al., 2020).
Kanban	<ul style="list-style-type: none"> • Visualisation du travail en cours ; • Optimisation des processus. • Réduction des stocks ; • Amélioration de la synchronisation entre la production et la demande réelle. 	<ul style="list-style-type: none"> • Sensibilité à la variabilité de la demande ; • Sensibilité à l'instabilité des processus ; • Inefficacité en présence d'une grande variété de produits. 	<ul style="list-style-type: none"> • (Ohno, 1988 ; Crute et al., 2003 ; Matt & Rauch, 2014 ; Leonardo et al., 2017 ; Dallasega et al., 2019 ; Irani, 2020).
SMED	<ul style="list-style-type: none"> • Réduction du temps de changement de série ; • Réduction des stocks inter-opérateurs ; • Réduction des coûts et augmentation de la productivité. 	<ul style="list-style-type: none"> • Allongement du lead time en cas de variabilité ; • Inefficacité avec une grande variété de produits ; • Nécessité d'une stabilité des processus pour fonctionner efficacement. 	<ul style="list-style-type: none"> • (Bortolotti et al., 2013 ; Wang et al., 2019 ; Amrani & Ducq, 2020 ; Irani, 2020 ; Possik et al., 2022).

Au-delà des outils, plusieurs chercheurs soulignent que la réussite du Lean dépend de la culture organisationnelle et de l'appropriation par les équipes. Dans les environnements HMLV, la formation et l'apprentissage jouent un rôle central (Houé & Guimarães, 2014), et une approche trop instrumentale, appliquant quelques outils sans engagement managérial, conduit souvent à l'échec (Beauvallet & Houy, 2009 ; Chanegrih & Creusier, 2015).

Dans cette perspective, l'adaptation du Lean en HMLV exige une véritable transformation managériale, fondée sur des standards flexibles, l'implication active des opérateurs dans l'amélioration continue et la reconnaissance de leur rôle central dans la gestion de la variabilité.

La littérature récente explore également la possibilité d'hybridations entre le Lean et d'autres approches mieux adaptées aux environnements instables. Le Quick Response Manufacturing (QRM) propose par exemple une alternative centrée sur la réduction des délais dans des contextes de forte variabilité (Suri, 2010). D'autres travaux suggèrent de combiner Lean et technologies numériques issues de l'Industrie 4.0 (MES, simulation, jumeaux numériques) afin de mieux piloter les flux complexes et d'anticiper les aléas (Derrouiche et al., 2022). Ces combinaisons ne remettent pas en cause les principes fondamentaux du Lean, mais en

élargissent l'applicabilité et la pertinence dans des environnements HMLV.

Un autre courant repéré 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.

2.2.3 Le modèle Lean est-il inefficace dans des environnements de type HMLV ?

Moins de 10 % des organisations HMLV parviennent à maintenir les initiatives Lean de manière pérenne et performante (Lopes et al., 2023), ce qui illustre les limites du Lean dans ces contextes. Le Lean rencontre des difficultés à s'adapter à l'évolution de la demande, où les clients exigent non seulement qualité et prix compétitifs, mais également personnalisation et rapidité de livraison (Hong et al., 2019 ; Groten & Gallego-García, 2021 ; Yusoof et al., 2022).

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

- La variabilité dysfonctionnelle : non souhaitée ou perturbatrice, résultant d'erreurs, de systèmes inefficaces, de machines défectueuses, etc ;
- La variabilité stratégique : intentionnelle et planifiée, introduite pour répondre aux besoins

imprévisibles et aux préférences spécifiques des clients.

Le Lean vise à réduire la variabilité dysfonctionnelle, mais il montre ses limites dans les contextes HMLV, où la variabilité stratégique est centrale et valorisée par les clients (Suri et al., 2010 ; Siong et al., 2018 ; Tomasevic et al., 2021).

Les échecs s'expliquent également par la transposition inappropriée d'outils conçus pour des productions de masse stables : certaines améliorations locales s'accompagnent d'effets négatifs comme l'augmentation du lead time et du coût unitaire (Normand & Bradley, 2024). De même, Gan et al. (2023), dans une revue de 152 études, soulignent que les bénéfices du Lean en HMLV sont souvent fragiles, partiels ou obtenus au prix de compromis coûteux. Enfin, Gill et al. (2008) soulignent que dans les environnements HMLV, la réduction des stocks et la forte dépendance aux fournisseurs fragilisent les chaînes d'approvisionnement, entraînant ruptures, retards et coûts supplémentaires.

Ces constats rejoignent une critique plus globale de la dimension organisationnelle et culturelle du Lean. Les pratiques de standardisation, de formation et de participation des employés, souvent présentées comme ses piliers, sont parfois contre-productives dans le HMLV. Selon la revue systématique de Selimović (2022), la standardisation peut réduire l'autonomie et centraliser la prise de décision, tandis que la formation, censée renforcer les compétences, est parfois perçue comme une source de pression supplémentaire. Par ailleurs, la coopération entre direction et employés est parfois jugée superficielle, limitant leur participation réelle aux décisions. Par exemple, Selimović (2022) propose ainsi de repenser l'approche Lean dite « traditionnelle ». Enfin, les succès rapportés reposent majoritairement sur des cas isolés, sans validation empirique robuste, ce qui fragilise la transférabilité du modèle (Rossini et al., 2019 ; Adlin et al., 2020 ; Amrani & Ducq, 2020 ; Schulze & Dallasega, 2023).

Ce courant soutient que l'échec du Lean en HMLV résulte d'une contradiction structurelle entre un modèle conçu pour la stabilité et des environnements où la variabilité stratégique crée de la valeur pour le client.

2.3 Synthèse comparative des courants Lean en environnement HMLV

Afin de comparer de manière homogène les travaux portant sur l'application du Lean en environnement HMLV, neuf spécificités structurelles ont été retenues. Ces spécificités ne renvoient pas à des caractéristiques génériques du HMLV, mais à des dimensions opératoires observables, susceptibles d'influencer directement l'efficacité des dispositifs Lean : Forte variété et faibles volumes (S1), forte variabilité de la demande (S2), variabilité extrême des temps de cycle (S3), flux non linéaires ou routages complexes (S4), dépendance à des fournisseurs ou composants spécifiques (S5), changement fréquent de série (S6), interdépendance physique et spatiale entre postes (S7), Interdépendance forte et séquentielle entre opérations (S8), et facteur humain critique (S9).

Le Tableau 3 présente cette synthèse comparative. Les spécifications S1 à S9 ont été identifiées à partir des descriptions empiriques fournies dans chaque article et codées selon leur présence explicite (✓), partielle ou implicite (○), ou absente (–).

Le tableau met en évidence une différenciation nette des courants Lean selon le nombre et la nature des spécificités HMLV considérées.

Les travaux relevant du Lean universel portent surtout sur des environnements à forte variété et faibles volumes (S1), en supposant des temps de cycle relativement maîtrisés et une faible interdépendance structurelle. Le rôle humain y est présent mais rarement central.

À l'inverse, les approches dites adaptables intègrent davantage de spécificités, notamment la variabilité de la demande, la fréquence des changements de série et certaines formes d'interdépendance. Toutefois, ces travaux considèrent rarement le cumul simultané d'une variabilité extrême des temps de cycle (S3), d'une interdépendance physique via convoyeur (S7) et d'une interdépendance séquentielle forte (S8).

Les études classées dans le courant critique ou inadapté sont précisément celles qui documentent ce cumul de contraintes. Elles montrent que, dans ces contextes, les dispositifs Lean standards cessent de réguler le flux et tendent plutôt à rigidifier le système.

Le cas Manitowoc s'inscrit explicitement dans cette configuration extrême, en combinant l'ensemble des spécificités S1 à S9. Il constitue ainsi un cas

critique permettant d'analyser les conditions structurelles dans lesquelles les principes du Lean atteignent leurs limites de transférabilité.

Tableau 3 : Synthèse comparative des courants Lean en environnement HMLV

Étude	S1 : Forte variété /faibles volumes	S2: Forte variabilité de la demande	S3: Variabilité extrême des temps de cycle	S4: Flux non linéaires / routages complexes	S5 : Dépendance à des fournisseurs ou composants spécifiques	S6 : Changement fréquent de série	S7: Interdépendance physique et spatiale entre postes	S8 : Interdépendance forte et séquentielle entre opérations	S9 : Facteur humain critique	Courant
(Kjersem et al., 2015)	✓	○	–	✓	–	–	✓	✓	✓	Universel
(Yassine et al., 2014)	✓	–	–	○	–	–	–	✓	✓	Universel
(Slomp et al., 2009)	✓	○	–	✓	–	–	–	✓	✓	Universel
(Seth et al., 2017)	✓	–	○	✓	–	–	–	✓	✓	Universel
(Chaple et Narkhede, 2017)	✓	–	–	✓	–	–	–	✓	○	Universel
(Hussain et al., 2020)	✓	–	–	✓	–	–	–	✓	✓	Universel
(Birkie et al., 2017)	✓	–	○	–	–	–	–	✓	✓	Universel
(Rossini et al., 2021)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	○	○	○	Adaptable
(Possik et al., 2022)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	○	✓	✓	Adaptable
(Leksic et al., 2020)	✓	✓	○	○	✓	✓	○	✓	○	Adaptable
(Zhang et al., 2020)	✓	○	✓	○	✓	✓	✓	✓	○	Adaptable
(Schulze et Dallasega, 2020)	✓	✓	✓	✓	○	✓	○	○	✓	Adaptable
(Gill et al., 2008)	✓	✓	○	✓	✓	–	–	–	○	Inadapté
(Lopes et al., 2023)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	○	○	✓	Inadapté
(Normand et Bradley, 2024)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Inadapté
Manitowoc (cas d'étude)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	?

3. METHODOLOGIE

Cette recherche adopte une démarche de recherche-intervention à travers une étude de cas unique menée au sein de l'entreprise Manitowoc (Moulins, France). Engagée depuis plus de vingt ans dans une démarche d'amélioration continue, l'entreprise a sollicité une intervention académique après avoir atteint les limites des solutions Lean conventionnelles dans un environnement HMLV.

Nous avons adopté une posture de chercheur-intervenant, participant à la conception, à l'implémentation et à l'ajustement des solutions testées (Kanban, SMED) en collaboration avec les équipes opérationnelles. Sans aucun rôle hiérarchique ou décisionnel ; les arbitrages relevaient de l'encadrement industriel. Cette proximité avec le terrain a facilité l'accès aux données, les biais potentiels étant limités par une triangulation systématique des sources.

La recherche repose sur une approche multiméthodes combinant données qualitatives et quantitatives.

Les données qualitatives comprennent :

- Des observations participantes sur six mois ;
- Quatorze entretiens semi-directifs réalisés auprès de 9 opérateurs, 3 chefs d'équipes et de 2 superviseurs (environ 20 minutes chacun). Les entretiens ont été conduits en face-à-face sur le terrain et ont été documentés par des prises de notes structurées, complétées par des observations et échanges informels ;
- Des enregistrements vidéo d'opérations critiques, lors des changements de configuration.

Les données quantitatives ont été collectées dans le cadre de deux chantiers pilotes :

- Un Kanban, déployé sur deux semaines et trois équipes, couvrant 1935 opérations de pendage ;
- Un SMED, appliqué à 2100 changements de configuration sur une période de deux mois.

Les données qualitatives ont été analysées par codage thématique manuel afin d'identifier les principales régularités (arbitrages locaux, autonomie décisionnelle, appropriation des outils). Les résultats ont ensuite été triangulés avec les observations et les données quantitatives.

La validité interne a été renforcée par une confrontation régulière avec les acteurs du terrain, tandis que la validité externe reste limitée par le caractère mono-site, même si la description détaillée du contexte permet une transférabilité vers d'autres environnements HMLV comparables.

4. ETUDE DE CAS : ANALYSE DU PRADIGME LEAN DANS LE PERIMETRE D'ETUDE

L'entreprise Manitowoc (site de Moulins, France) est spécialisée dans la fabrication des Grues à tour, connues sous la marque POTAIN. Face à une concurrence de plus en plus forte et des clients de plus en plus exigeants, elle propose une large gamme de produits, de teintes et d'options, pour conquérir de nouveaux marchés. Chaque produit est unique et spécifique. Cette diversité amène à gérer un nombre important de pièces et composants, ce qui complexifie la gestion de la chaîne logistique et la fabrication sur de nombreux points.

Face à ces défis, il est nécessaire d'analyser plus en profondeur les problématiques opérationnelles spécifiques du périmètre d'étude, ainsi que les méthodes et outils susceptibles d'améliorer la performance de l'entreprise. Dans cette section, nous commencerons par examiner le contexte et les problématiques opérationnelles (4.1), suivis de la présentation du Lean (4.2), qui met en avant une approche d'amélioration continue dépendant du contexte. Nous aborderons ensuite la mise en œuvre de deux chantiers pilotes illustrant l'application concrète de pratiques Lean (4.3).

4.1 Contexte et problématiques opérationnelles du périmètre d'étude

La plupart des Eléments Mécano-Soudés (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 (voir Figure 1). Le convoyeur est alimenté en EMS dans des zones de pendage. Il dessert ensuite l'atelier de traitement de surface (grenailleuse puis les postes de peinture), et l'atelier de montage. 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 attribuer d'autres EMS. 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.

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 séquençement établi.

Pour mieux cerner ces difficultés, le processus de production et le flux d'informations a été modélisé sous forme de VSM (Value Stream Mapping) pour localiser les problèmes (voir Figure 2)

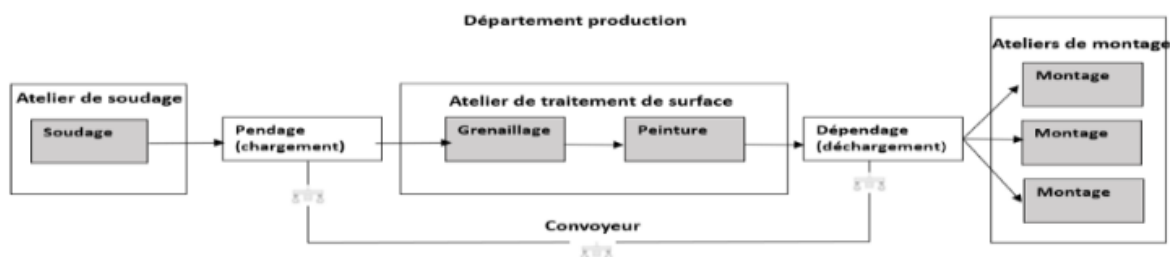


Figure 1 : Convoyeur aérien

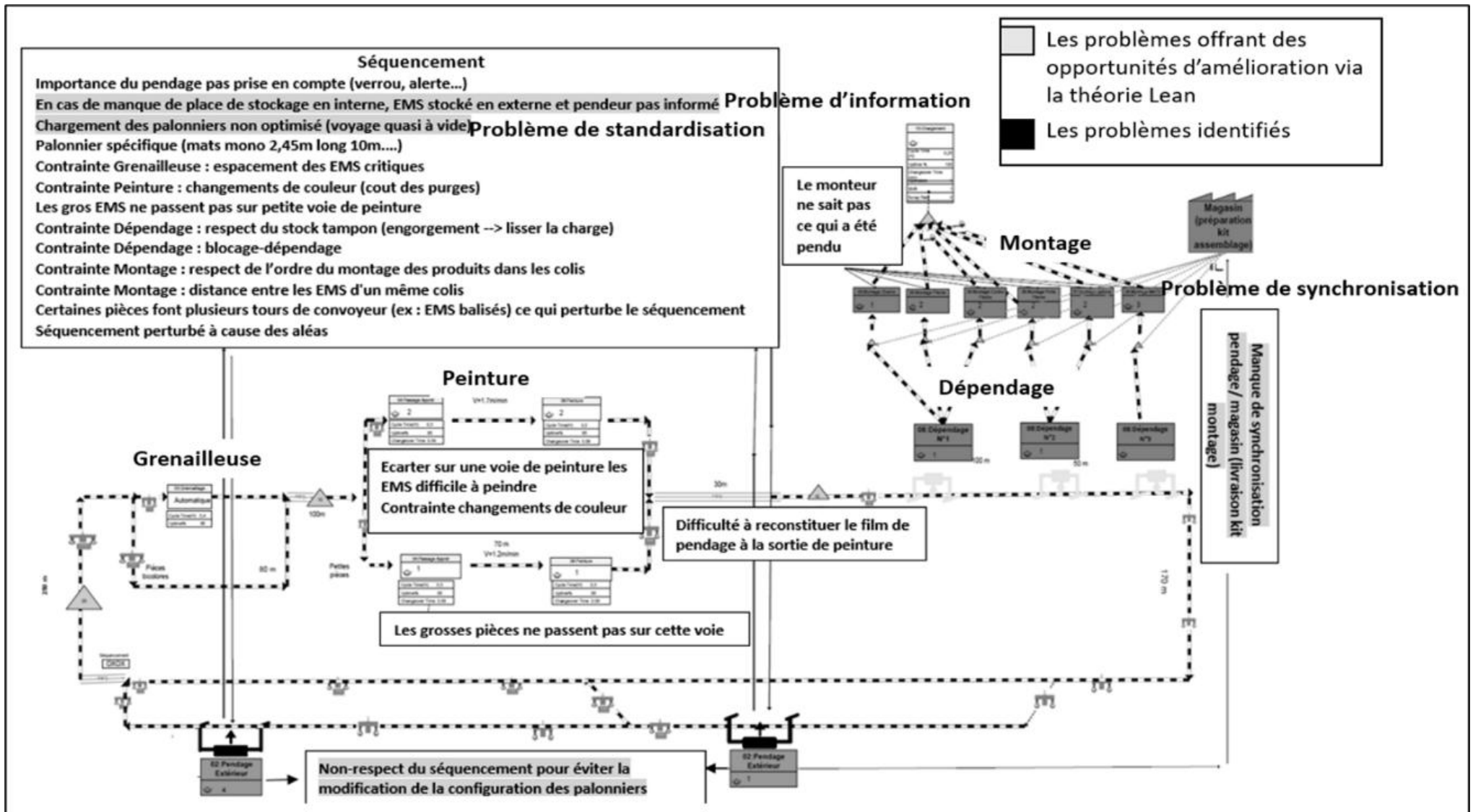


Figure 2: Différents problèmes identifiés sur la chaîne de production

4.2 Le paradigme Lean : Une efficacité conditionnelle et contextuelle

L'usine de Moulins est confrontée à des défis majeurs pour maintenir un séquençement 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.

4.2.1 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 : un interne pour les EMS fabriqués et un externe pour les EMS achetés. Ces postes sont essentiels au bon déroulement de la production. En effet, ils doivent suivre le bon séquençement 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.

4.2.2 Le manque de travail standardisé dans le chargement des palonniers

Plusieurs EMS peuvent être candidats pour être chargés sur un palonnier. 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, le chargement des palonniers n'est pas toujours optimisé, entraînant des voyages presque à vide et une augmentation du lead time.
- D'autre part, la difficulté à choisir les supports de pendage appropriés, exacerbée par la forte diversité des EMS et l'accès limité aux standards de pendage entraîne une utilisation excessive des

palonniers, augmentant le stock en cours et le gaspillage de ressources.

4.2.3 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 séquençement prévisionnel. Cependant, la date de livraison des EMS (qui proviennent du pendage) varie considérablement, en raison du non-respect du séquençement initial.

Les postes de montage sont souvent confrontés à une désynchronisation des flux entre le pendage et le magasin. Ceci provoque des arrêts temporaires et des accumulations de stock en bord de ligne.

Pour remédier à cette problématique sur la chaîne de valeur globale, le paradigme Lean, via le Juste à Temps et le flux tiré/lissé, propose de réduire le lead time et d'améliorer la flexibilité. Deux pratiques opérationnelles ont été retenues : le système Kanban pour piloter les flux et le SMED pour accroître la flexibilité. Ces deux systèmes semblent en théorie prometteurs pour résoudre le problème du **non-respect du séquençement**. Ils viennent compléter les pratiques Lean existantes (VSM, 5S, TPM) et seront testés sur le terrain dans le cadre des chantiers pilotes présentés ci-dessous.

4.3 Déploiement de deux chantiers pilotes Lean dans le périmètre d'étude

4.3.1 Exploration du Kanban

Le Kanban est un mécanisme de contrôle du flux de pièces, qui régule la quantité et le moment de production des composants ou sous-ensembles consommés (Powell, 2018 ; Mohamad et al., 2023). 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 (Pekarcikova et al., 2021).

Les pendeurs reçoivent un séquençement (voir Figure 3) dont l'horizon couvre la journée. Ce séquençement donne l'ordre de pendage des EMS pour les trois équipes de production (matin, soir et

nuits). La gamme d'EMS comprend 1700 références avec des caractéristiques diverses. Ces EMS sont stockés dans un parc occupant une superficie totale d'environ 5000 m². La photo de la Figure 4 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 séquençage 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 séquençage 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 séquençage prévisionnel, perturbant ainsi le séquençage 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 CDS	MODELE	PENDAGE EXTERIEUR
MAT K447A2	JAUNE 92	MDT	PRC BLOC
SUIVANT FAR INTERNE	5300010568	PR RAL 3020	PR NU 33349
	5300017132	PR	BLOC LEST R 51
MAT K447C2	JAUNE 92	PR	
	5300017035	MDT289	VERROU Q52
SUIVANT RECEPTION	300203705	MDT289	CHS WT ENG6
SUIVANT RECEPTION	300202089	JAUNE 92	MAT RAL K40K40
	5300037136	PR	TRIANT BRIDAGE
	300199008	MD438	CHR MOUFLE ACCESS
SUIVANT RECEPTION	300203702	MDT	CHS COUSAGE
COLIS 30	300202868	MD569	FL COUSAGE
MAT KMT449A2	JAUNE 92	MDT249	MAT KMT449A2
SUIVANT RECEPTION	300202853	MDT249	OR POTENCE
	4400051785	PR	TRIANGLE GAGE
	300195786	MDT389	CE DEWRES G+D
COLIS 70	300202868	MD569	FL SM 76144
COLIS 70	300202868	MD569	FL SM 76147
MAT K449A2	JAUNE 92	MDT	OR SUP CAR 387
MAT K447C2	JAUNE 92	MDT	MAT K447C2

Figure 3 : Le séquençage journalier



Figure 4 : Parc de stockage des EMS

Afin de remédier à cette situation, le site de Moulins a mis en œuvre le système Kanban pour mieux respecter le séquençage. L'objectif essentiel est

de restreindre la visibilité des pendeurs sur les EMS à venir, afin d'éviter toute anticipation excessive par rapport au séquençage planifié. Plutôt que d'afficher l'intégralité du séquençage 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 5. Seuls les pendages à court terme sont visibles par les pendeurs qui correspondent à la colonne « en cours » dans la Figure 5.

Basé sur le principe des encours standard, le tableau Kanban doit limiter le nombre d'EMS visibles à 20, nombre calculé en fonction du temps de cycle moyen. Dans notre exemple (voir Figure 5), 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.

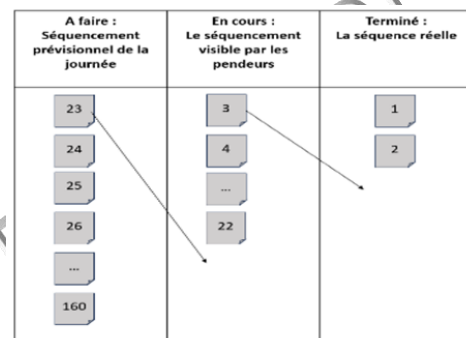


Figure 5 : Tableau Kanban pour le pendage

4.3.2 Exploration du SMED

Le **SMED** (**S**ingle **M**inute **E**xchange of **D**ies) est l'un des outils les plus largement reconnus du Lean par les entreprises du monde entier (Junior et al., 2022 ; Braglia et al., 2023). Sa mise en œuvre permet d'accroître la flexibilité dans les environnements HMLV, d'augmenter la capacité des goulets d'étranglement et de réduire les coûts de production. (Van Goubergen & Van Landeghem, 2002).

Les EMS sont pendus sur des palonniers (voir Figure 6) 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 séquençement, le pendeur doit effectuer un changement de configuration du palonnier (enlever, déplacer ou remettre des accessoires de pendage).

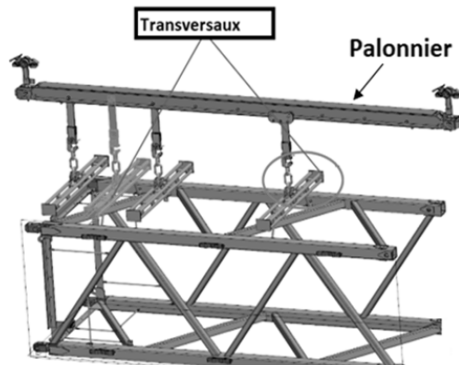


Figure 7 : Pendage d'un EMS

Cette opération de changement d'équipements est indispensable. Elle nécessite du temps et se révèle parfois peu ergonomique. Pour l'éviter, les pendeurs préfèrent souvent modifier le séquençement des EMS. Ils choisissent des EMS qui s'adaptent plus facilement à la configuration du palonnier présent. Mais cette modification du séquençement 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 séquençement 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 7).

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 8).

Time Observation Form - SMED

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

Étape/Opération	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 chaîne	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
Fixation du transverseaux: enlève goupille de sécurité, lève la tige de la bielle A, engage la chaîne sur la bielle A, refixe tige puis goupille sur bielle A	00:03:04	00:03:33	00:29	I
9 bielle A, refixe tige et goupille sur bielle B				
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 6 : Changement de configuration avant SMED

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 9). Ces observations soulignent la nécessité d'apporter des améliorations sur ces opérations afin de réduire les risques de troubles musculosquelettiques.



Figure 8 : Posture forcée des membres supérieurs



Figure 9 : 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 10) ;

- Munie de 2 roues fixes et 2 roues mobiles (versus 4 roues mobiles) pour faciliter son déplacement.

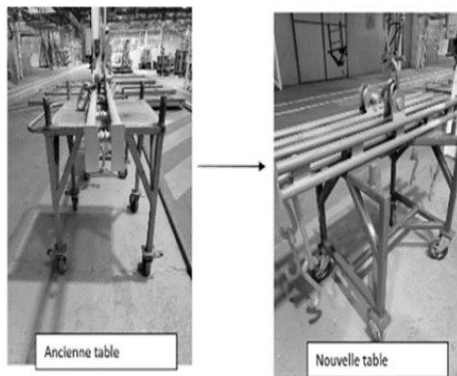


Figure 10 : Conception d'une nouvelle table pour atténuer les postures inconfortables

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 7), 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.

5. RESULTATS

5.1 Résultats du kanban

Le chantier pilote Kanban a été mené sur deux semaines auprès de trois équipes de production, couvrant un total de 1935 opérations de pendage.

Les résultats présentés dans le Tableau 4 révèlent une légère amélioration du taux de respect du séquençement, passant de 37% à 43%. En revanche, une dégradation de la productivité de 22% a été constatée.

Tableau 4 : Résultats de mise en œuvre du Kanban

Equipe	Taux de respect du séquençement		Nombre de palonniers effectués/poste	
	Pré-kanban	Post-kanban	Pré-kanban	Post-kanban
Matin	34%	42%	66	49
Soir	30%	40%	46	42
Nuit	45%	48%	46	38

Cette baisse de productivité s'explique par la variabilité extrême des temps de cycle (10 à 90 minutes selon l'EMS et sa localisation dans le parc) et par la perte d'anticipation des pendeurs. Le Kanban, en limitant strictement la visibilité des ordres à court terme, a supprimé la marge d'initiative que les opérateurs utilisaient pour regrouper les déplacements et optimiser l'utilisation des engins de manutention.

De plus, certains EMS nécessitent des palonniers spécifiques, et le manque de visibilité sur le séquençement a empêché de les préparer à l'avance. Dans de nombreux cas, les palonniers repartaient à vide, et l'EMS concerné n'était disponible que plus tard, retardant l'opération jusqu'au prochain passage du palonnier.

En conséquence, le Kanban strict a entraîné plus de déplacements, des temps non productifs et une utilisation sous-optimale des palonniers, générant en aval des situations alternées de famine et d'encombrement et perturbant la continuité du flux. Ces résultats montrent que l'échec du Kanban observé n'est pas uniquement lié à la configuration spécifique du site (palonniers dédiés, organisation du convoyeur), mais à une combinaison de caractéristiques structurelles fréquemment rencontrées dans les ateliers HMLV : variabilité extrême des temps de cycle, forte interdépendance entre postes et dépendance à des ressources critiques non stockables. Le chantier a été interrompu pour des raisons managériales, afin de préserver les livraisons clients.

5.2 Résultats du SMED

Le chantier pilote SMED a été mené sur deux mois, couvrant un total de 2100 changements de configuration. 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 11), représentant une réduction de 32%.

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 chaîne	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 chaîne 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 11: Changement de configuration après SMED

Avant l'implémentation, le temps total nécessaire pour pendre un palonnier avec changement de configuration était de 16,74 min, supérieur au Takt Time de 15,9 min, limitant la possibilité de changer de série à chaque palonnier. Après le SMED, ce temps est descendu à 14,04 min, rendant possible un changement de série systématique sans créer de goulet d'étranglement potentiel et améliorant la performance technique globale.

Cependant, l'analyse de huit vidéos de changements récurrents ont été analysées pour documenter la pénibilité physique des opérations. Les constats principaux sont présentés par le Tableau 5 :

Tableau 5 : Analyse de la pénibilité physique lors des changements de configuration

Critère observé	Occurrence
Bras au-dessus des épaules lors de la fixation des transversaux	6/8 (75 %)
Flexion du tronc pour positionner les supports	5/8 (62,5 %)
Efforts de poussée / traction de tables et accessoires lourds	7/8 (87,5 %)
Port de charges	8/8 (100 %)

Ces observations montrent que, les améliorations sur le plan ergonomique n'ont permis qu'une réduction partielle de la pénibilité physique.

Trois vagues d'entretiens semi-directifs ont été menées auprès de 12 pendeurs pour compléter les observations vidéo. :

- T1 : une semaine après le déploiement du SMED,
- T2 : après quatre semaines de déploiement,
- T3 : en fin de période d'observation.

Lors du premier entretien, moins de 20 % des opérateurs, évoquent spontanément des difficultés physiques. Le reste mettaient en avant la réduction du temps de changement comme un bénéfice immédiat. En revanche, lors des entretiens suivants, une convergence progressive des discours a été observée : plus de 90 % des opérateurs rapportent une fatigue cumulée, localisée principalement au niveau des épaules, du dos et des bras.

Ces difficultés ne sont pas associées à une pression temporelle accrue liée au takt time, mais à la répétition imprévisible des changements de configuration, qui empêche tout lissage de la charge physique. La pénibilité n'apparaît donc pas immédiatement après le déploiement de l'outil, mais émerge progressivement, soulignant l'importance d'une analyse longitudinale des effets sociaux des dispositifs Lean.

6. DISCUSSION

Les résultats empiriques montrent que l'application d'un Kanban dans l'atelier étudié améliore marginalement le respect du séquençement, mais au prix d'une baisse notable de la performance globale. Ce phénomène n'est pas un simple dysfonctionnement local : il révèle des spécificités structurelles propres aux environnements HMLV, rarement combinées dans les études précédentes. Le cas étudié cumule en effet : (i) une variabilité extrême des temps de cycle, largement supérieure au takt de référence ; (ii) une forte interdépendance entre postes et opérations, favorisant la propagation des retards ; (iii) une dépendance à des ressources critiques spécifiques et non stockables (palonniers dédiés) ; et (iv) un rôle central de la régulation humaine pour anticiper, synchroniser et absorber les aléas.

La littérature « universelle » sur le Kanban (Kjersem et al., 2015 ; Slomp et al., 2009 ; Yassine et al., 2014) repose implicitement sur des environnements où la variabilité reste maîtrisable et où les opérateurs disposent d'une visibilité suffisante pour ajuster localement leurs décisions. À l'inverse, les travaux

sur le Kanban adaptable (Rossini et al., 2021 ; Possik et al., 2022) suggèrent des hybridations, mais ne considèrent pas le cumul simultané de ces spécificités, ce que notre étude met en évidence.

Lorsque la variabilité et l'interdépendance sont extrêmes, le Kanban limite la visibilité sur le flux réel et la capacité d'anticipation des opérateurs, transformant le flux tiré en flux contraint par des artefacts rigides de pilotage. Ce constat invite à repenser la notion de flux tiré en environnement HMLV, non plus comme une règle universelle, mais comme un dispositif contingenté selon : le niveau de variabilité tolérable, le degré d'interdépendance entre opérations, le rôle accordé à la régulation humaine et à l'usage des ressources critiques.

Concernant le SMED, les résultats confirment son efficacité technique, avec une réduction significative des temps de changement permettant de respecter le Takt Time et d'éviter la création de goulets d'étranglement (Van Goubergen & Van Landeghem, 2002 ; Braglia et al., 2023). Cependant, l'analyse longitudinale des observations ergonomiques et des entretiens révèle un compromis structurel entre performance et soutenabilité humaine. Si la réduction des temps permet techniquement d'absorber un nombre élevé de changements, l'imprévisibilité de leur fréquence empêche tout lissage de la charge de travail. La pénibilité n'est donc pas liée à la pression temporelle, mais à la répétition non anticipable des gestes contraignants, phénomène peu documenté dans les études SMED classiques. Cette pénibilité n'apparaît pas immédiatement après le déploiement de l'outil, mais émerge progressivement avec la répétition des changements, soulignant que l'évaluation des effets sociaux des dispositifs Lean ne peut se limiter à des mesures ponctuelles et nécessite une analyse dans la durée.

Ce résultat prolonge les travaux critiques récents sur le Lean en HMLV (Normand & Bradley, 2024 ; Lopes et al., 2023), en montrant que la soutenabilité sociale dépend moins de la réduction des temps que de la fréquence effective des sollicitations physiques. Il souligne la nécessité de coupler les dispositifs Lean à des mécanismes adaptatifs (séquençage dynamique, pilotage hybride, digitalisation temps réel) pour préserver simultanément performance et conditions de travail.

Enfin, cette étude apporte un éclairage complémentaire aux travaux sur les configurations hybrides (Kanban-CONWIP, QRM, digitalisation temps réel). Elle suggère que l'enjeu ne réside pas uniquement dans la combinaison d'outils, mais dans la cohérence entre le mode de pilotage, la variabilité structurelle du système et le degré d'autonomie laissé à la régulation locale. Les solutions hybrides ne sont pertinentes que dans la mesure où elles restaurent de la visibilité, de la capacité d'anticipation et des marges de manœuvre pour les opérateurs, plutôt que d'ajouter des couches de pilotage centralisé dans des systèmes déjà fortement contraints.

7. CONCLUSION ET PERSPECTIVES DE RECHERCHE

Bien que le paradigme 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.

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.

L'un des principaux apports de cette étude est de mettre en évidence que l'inefficacité du Kanban ne tient pas uniquement à la diversité produit ou à l'instabilité de la demande, mais à l'existence d'une variabilité extrême des temps de cycle, combinée à une dépendance forte à des ressources critiques et à la régulation humaine. Ce résultat permet de dépasser une critique générique du Lean en HMLV, en identifiant un mécanisme opérationnel précis qui limite la transférabilité du flux tiré dans certains ateliers.

Concernant le SMED, l'étude confirme son efficacité technique, avec une réduction de 32 % des temps de changement de configuration rendant leur réalisation compatible avec le takt time. Toutefois, l'analyse longitudinale met en évidence un compromis structurel entre performance technique et soutenabilité humaine : lorsque les changements deviennent fréquents et imprévisibles, la répétition des gestes contraignants génère une fatigue physique cumulée, indépendamment de toute pression temporelle. Ce résultat souligne que la soutenabilité des dispositifs Lean en HMLV dépend moins de la réduction des temps unitaires que de la dynamique réelle de sollicitation du travail humain.

Sur le plan managérial, ces résultats permettent de dégager plusieurs enseignements structurants pour les responsables d'unités HMLV. Premièrement, l'implantation d'outils de pilotage des flux suppose un diagnostic préalable approfondi des régimes de variabilité et des interdépendances opérationnelles, au-delà des seules caractéristiques de la demande. Deuxièmement, lorsque la régulation humaine joue un rôle central dans l'absorption de la variabilité, les dispositifs Lean doivent être conçus comme des supports à cette régulation, et non comme des mécanismes visant à la restreindre. Troisièmement, les démarches de type SMED gagnent à être articulées à une réflexion ergonomique et organisationnelle dès leur conception, afin d'anticiper leurs effets cumulatifs sur la soutenabilité du travail.

Sur le plan théorique, cette recherche contribue aux débats actuels sur les limites du Lean en environnements complexes en proposant une lecture contingente des outils, fondée sur leurs effets concrets sur la visibilité, l'anticipation et la régulation locale. Elle invite à repenser le flux tiré non comme un principe universel, mais comme une configuration de pilotage dont la pertinence dépend de compromis entre variabilité, coordination et autonomie.

Dans ce contexte complexe et fortement contraint, les recherches futures pourraient explorer les conditions d'inadéquation des outils Lean standards, en particulier les seuils critiques de variabilité, d'interdépendance et d'imprévisibilité, ainsi que tester d'autres pratiques Lean adaptées au HMLV et des configurations hybrides Lean-QRM.

L'intégration de la digitalisation constitue également une perspective prometteuse pour renforcer l'efficacité de certaines pratiques Lean dans ce type d'environnement (Mrabbaj et al., 2024). En s'appuyant sur des technologies de gestion en temps réel, telles que les systèmes MES, le séquençage dynamique et la visualisation des flux, il serait possible d'assurer une remontée d'informations plus rapide, une meilleure synchronisation des opérations et une gestion plus fine des priorités et des flux, tout en maintenant l'autonomie décisionnelle des équipes de terrain. L'évaluation empirique de ces solutions numériques, associée à des études longitudinales et multi-sites, permettra de mieux comprendre leur rôle dans l'amélioration durable de la performance et des conditions de travail en HMLV.

8. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 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. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.279>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.10.191>
- Aljubiri A. (2019). *An implementation strategy for Lean Manufacturing in high mix and low volume (HMLV) environment* (Doctoral dissertation, University of Akron). http://rave.ohiolink.edu/etdc/view?acc_num=akron1564787755980795
- 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. <https://doi.org/10.1080/09537287.2019.1706197>
- 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. <https://doi.org/10.1080/09537287.2020.1776410>
- 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. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/471/2/022002>

Beauvallet, G., & Houy, T. (2009). L'adoption des pratiques de gestion lean. *Revue française de gestion*, 197(7), 83-106. <https://shs.cairn.info/revue-francaise-de-gestion-2009-7-page-109?lang=fr>

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. <https://doi.org/10.1108/IJLSS-12-2016-0077>

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. <https://doi.org/10.1080/09537287.2015.1127446>

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. <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1639224>

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. <https://doi.org/10.1108/JMTM-12-2022-0430>

Buer, S. V., Fragapane, G. I., & Strandhagen, J. O. (2018). The data-driven process improvement cycle: Using digitalization for continuous improvement. *IFAC-PapersOnLine*, 51 (11), 1035-1040. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.471>

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. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1427898>

Chanegrih, T., & Creusier, J. (2015). Le lean manufacturing dans l'industrie française : états des lieux et implications pratiques. *Revue française de gestion industrielle*, 34(4), 59-71. <https://doi.org/10.53102/2015.34.04.831>

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. <https://doi.org/10.59160/ijscm.v6i1.1353>

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. <https://doi.org/10.1080/09537287.2017.1324184>

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. [https://doi.org/10.1016/S0166-4972\(03\)00081-6](https://doi.org/10.1016/S0166-4972(03)00081-6)

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. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2019.08.003>

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. <https://doi.org/10.1111/ijmr.12156>

Derrouiche, R., Lamouri, S., & Naoui-Outini, F. (2022). Supply Chain 4.0: rôles et opportunités de la gestion industrielle. *Revue Française De Gestion Industrielle*, 36(1), 3-6. <https://doi.org/10.53102/2022.36.01.1112>

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. <https://doi.org/10.1080/09537287.2015.1050477>

Duret, R. (2016). *De l'émergence des risques à leur intégration dans une organisation : le cas de l'industrie de la construction* (Doctoral dissertation, Paris 1). Paris. <https://theses.hal.science/tel-01816348>

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. <https://doi.org/10.3390/app12031530>

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. <https://doi.org/10.3390/app13031687>

Gill, H., Lopus, M., & Camelon, K. (2008). *Overcoming supply chain management challenges in a very high mix, low volume and volatile demand manufacturing environment*. <https://fabrinet.com/wpcontent/uploads/2017/03/LEA-N-Manufacturing-Paper.pdf>. Gill.-Sept.-08.pdf

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. <https://doi.org/10.3390/app112311112>

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. <https://doi.org/10.1016/j.ijspe.2019.01.036>

- 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. <http://hdl.handle.net/10454/18203>
- Irani, S. A. (2020). *Job shop lean: an industrial engineering approach to implementing lean in high-mix low-volume production systems*. CRC Press. <https://doi.org/10.4324/9781003034186>
- 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. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-08534-w>
- King, P. L. (2019). *Lean for the process industries: dealing with complexity*. CRC Press. <https://doi.org/10.4324/9780429400155>
- Kjersem, K., Halse, L. L., Kiekebos, P., & Emblemavåg, 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. <https://inria.hal.science/hal-01431102v1>
- 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. <https://doi.org/10.3390/pr8080912>
- 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). <https://doi.org/10.14743/apem2020.1.351>
- 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. <https://doi.org/10.1108/JMTM-03-2016-0043>
- Liker J. K. (2004): *The Toyota way – 14 management principles from the world's greatest manufacturer*, McGraw-Hill, New York.
- Lopes, N. R., Filho, M. G., Ganga, G. M. D., Tortorella, G. L., Calfe, 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. <https://doi.org/10.1504/EJIE.2023.127740>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.01.057>
- Mrabbaj, Z., Masmoudi, M., Messaoudene, Z., Penz, B., & Depale, B. (2024, November). Digital Lean Practices in High-Mix, Low-Volume Manufacturing: A Case Study of Manitowoc. In *2024 IEEE International Conference on Technology Management, Operations and Decisions (ICTMOD)* (pp. 1-6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICTMOD63116.2024.10878216>
- Normand, A., & Bradley, T. H. (2024). An experimental investigation of Lean Six Sigma philosophies in a high-mix low-volume manufacturing environment. *PloS one*, 19(5), e0299498. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0299498>
- Ohno T (1988). *Toyota production system: beyond large-scale production*. Productivity Press, Oregon (USA). <https://doi.org/10.4324/9780429273018>
- Pearce A., Pons D., Neitzert T. (2018). Implementing lean—Outcomes from SME case studies. *Operations Research Perspectives*, 5, 94-104. <https://doi.org/10.1016/j.orp.2018.02.002>
- 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. <https://doi.org/10.3390/su13147989>
- Powell D. J. (2018). Kanban for lean production in high mix, low volume environments. *IFAC-PapersOnLine*, 51(11), 140-143. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.248>
- 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. <https://doi.org/10.3389/fcomp.2020.00026>
- 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. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03990-x>
- 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. <https://doi.org/10.1108/JMTM-12-2020-0467>
- 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.
<https://doi.org/10.1080/09537287.2021.1888159>

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.
<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.10.190>

Selimović, I. (2022). Advantages and Disadvantages of Principles of Scientific Management and Lean Organisation. *Challenges of the Future*, 7(1).
<https://doi.org/10.37886/ip.2022.001>

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.
<https://doi.org/10.1080/09537287.2017.1300352>

Shingo, S. (2019). *A revolution in manufacturing: the SMED system*. Routledge.
<https://doi.org/10.4324/9781315136479>

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.
<http://dx.doi.org/10.14419/ijet.v7i2.28.12879>

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.
<https://doi.org/10.1080/09537280903086164>

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. https://doi.org/10.1007/978-3-031-18326-3_24

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.
<https://doi.org/10.1139/cjce-2018-0408>

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.
<https://doi.org/10.1080/09537287.2020.1782094>

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.
[https://doi.org/10.1016/S0736-5845\(02\)00011-X](https://doi.org/10.1016/S0736-5845(02)00011-X)

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.
<https://doi.org/10.1080/09537287.2019.1566281>

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. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/598/1/012058>

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. 159.
<https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2600967>

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.

Yassine, T., Bacha, M. B. S., Fayek, F., & Hamzeh, F. (2014, June). Implementing takt-time planning in construction to improve workflow. In *Proc. 22nd Ann. Conf. of the Int'l Group for Lean Construction* (pp. 23-27).

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. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.09.271>

Zhang, B., Niu, Z., & Liu, C. (2020). Lean tools, knowledge management, and lean sustainability: The moderating effects of study conventions. *Sustainability*, 12(3), 956. <https://doi.org/10.3390/su12030956>

9. BIOGRAPHIE



Zineb MRABBAJ est docteure de l'université Grenoble Alpes. Ses travaux de recherches portent sur l'optimisation des systèmes de production, en mettant l'accent sur le Lean Manufacturing, la digitalisation et l'ordonnancement.

¹**Zineb MRABBAJ**, Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, G-SCOP, 38000 Grenoble, France, zinebmrabbaj0@gmail.com ,

²**Zahir MESSAOUDENE**, ECAM Lasalle Campus de Lyon, 69351 Lyon, France, zahir.messaoudene@ecam.fr ,

^{ID} : <https://orcid.org/0009-0004-2971-3861>



Zahir MESSAOUDENE est enseignant-chercheur à l'ECAM Lasalle. Ses travaux sont focalisés sur l'apprentissage organisationnel ainsi que le rôle du Lean-SMART pour accélérer les processus de prises de décision dans un environnement incertain.

³**Bernard PENZ**, Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, G-SCOP, 38000 Grenoble, France, bernard.penz@grenoble-inp.fr,

^{ID} : <https://orcid.org/0000-0002-2375-9349>



Bernard PENZ est professeur des universités à Grenoble INP. Il est spécialiste de Recherche Opérationnelle et de ses applications à la logistique (Planification, ordonnancement)

⁴**Malek MASMOUDI**, College of Engineering, University of Sharjah, Sharjah, United Arab Emirates, 5Université Jean-Monnet, Saint-Étienne, France, mmasmoudi@sharjah.ac.ae ,

^{ID} : <https://orcid.org/0000-0003-4040-3608>



Malek MASMOUDI est professeur associé à l'Université de Sharjah, EAU. Ses travaux de recherche portent sur l'application de la science des données et des techniques d'optimisation dans les domaines de l'ingénierie et de la gestion.

⁵**Bertrand DEPALE**, Manitowoc Crane Group France, 03000 Moulins, France, bertrand.depale@manitowoc.com



Bertrand DEPALE est manager de l'amélioration continue sur le site Manitowoc – POTAIN de Moulins (03)