

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

IMPACT D'UNE STRATÉGIE D'IMPLANTATION DE L'INDUSTRIE 4.0
DANS UNE PME MANUFACTURIÈRE QUÉBÉCOISE

MÉMOIRE PRÉSENTÉ
COMME EXIGENCE PARTIELLE DE LA
MAÎTRISE EN INGÉNIERIE, CONCENTRATION GÉNIE INDUSTRIEL

PAR
MARC-ANTOINE ROY

AOÛT 2022

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire, de cette thèse ou de cet essai a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire, de sa thèse ou de son essai.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire, cette thèse ou cet essai. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire, de cette thèse et de son essai requiert son autorisation.

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

MAÎTRISE EN INGÉNIERIE, CONCENTRATION GÉNIE INDUSTRIEL

Direction de recherche :

Georges Abdul-Nour, directeur de recherche, Ph. D., ing.

Directeur de recherche, UQTR

Sébastien Gamache, codirecteur de recherche, Ph. D., ing.

Codirecteur de recherche, UQTR

Jury d'évaluation :

Georges Abdul-Nour, Ph. D., ing.

Professeur UQTR

Amin Chaabane, Ph. D., ing.

Professeur ETS

Mustapha Ouhimmou, Ph. D., ing.

Professeur ETS

REMERCIEMENTS

J'aimerais remercier mes deux directeurs de maîtrise Georges Abdul-Nour et Sébastien Gamache. Ces deux personnes m'ont amené à un autre niveau par les réflexions qu'ils m'ont fait vivre, par la confiance qu'ils m'ont donnée et par leur philosophie et leur école de pensée. C'est dans leurs explications, parfois au bureau, parfois dans un cours, parfois dans un aller-retour en Abitibi, qu'ils ont su m'expliquer ce qu'ils ont vécu, les étapes qu'ils ont traversées et les résultats de leurs divers mandats. Les différents projets que vous avez réalisés avec moi m'ont permis de grandir, de me dépasser, de me faire confiance et de devenir qui je suis.

Un second remerciement est dédié à l'entreprise manufacturière dans laquelle j'ai réalisé mon stage Mitacs Accélération pendant deux années. Merci à tout le personnel qui m'a accueilli et avec qui j'ai eu embuches, frictions et réalisations au cours des dernières années.

Enfin, je tiens aussi à remercier tous ceux qui ont pu suivre ma progression de près ou de loin, amis, copine, parents, collègues. Discuter de mon avancement était source de motivation.

RÉSUMÉ

Les PME du Québec font face à un retard de compétitivité par rapport à leurs concurrents des autres provinces et de l'international. Les PME vivent un nombre de perturbations croissant dans un marché évolutif où le client demande des produits plus personnalisés et où les technologies sont désormais plus accessibles. L'hypothèse posée est qu'une stratégie d'implantation de l'Industrie 4.0, basée sur l'agilité et la conception modulaire des produits, aide au succès de la transition vers la production de masse personnalisée des PME. L'objectif de cette recherche était de définir une stratégie d'implantation de l'Industrie 4.0 basée sur l'agilité et la conception de produits modulaires. L'étude consistait à réaliser un cas en entreprise sous forme de recherche-action suivie d'un plan d'expérience réalisé par une simulation.

Le cas en entreprise a permis de valoriser les données présentes en entreprise, d'adapter le logiciel ERP à la production de modules, d'adapter une démarche de conception de produits modulaires basée sur les pratiques de développement de produits et d'implanter une solution infonuagique ainsi que des processus automatisés reliés à cette solution. L'implantation de ces éléments a augmenté la performance de l'entreprise et a orienté l'entreprise vers l'Industrie 4.0 ainsi que la personnalisation de masse. La présence d'une stratégie et d'une vision, la disponibilité des ressources humaines et la présence d'un leadership fort de la direction sont des conditions de réussite à la mise en place de la stratégie définie.

La conception modulaire des produits réalisée dans le cas en entreprise a réduit le temps de conception de 90 % et le temps de dessins de 32 % dans le cas d'un passage de produits personnalisés à des produits modulaires. La conception occupe ainsi une place importante auprès de l'Industrie 4.0. L'adaptation de l'ERP aux produits modulaires a permis de réduire la recherche d'informations et de pièces d'environ 40 %, de réduire le nombre de pièces standards de 4,4 % à la suite de l'élimination de doublons et de diminuer

l'inventaire des pièces produites en surplus de 50 % en 6 mois. L'entreprise a aussi pris connaissance que l'achat de 5 pièces ou plus chez leur fournisseur de découpe et de pliage laser réduit le coût unitaire par pièce de 20 % ou plus. Par l'analyse des produits pour les soumissions, l'entreprise a pris connaissance que 80 % des options vendues sont toujours les mêmes. L'implantation de la technologie infonuagique et de l'automatisation des processus informatiques ont permis de réduire la quantité de documents papiers, la recherche d'informations, le temps de classement des documents, les retranscriptions inutiles, le temps nécessaire aux tâches répétitives, les risques de pertes de données en plus de faciliter le partage d'information à l'interne et à l'externe et d'améliorer le suivi des documents.

La réalisation d'un plan d'expérience, à l'aide d'une simulation de l'entreprise étudiée, a permis de tester les étapes à réaliser par l'entreprise. Les résultats ont permis de constater que l'implantation de produits modulaires, la mise en place de Kanban, l'ajout d'indicateurs de performance combinés aux techniques d'amélioration continue telles que le Lean et la mise en place d'un système d'information augmentent le nombre de projets livrés de 32,7 %. La conception de produits modulaires semble être la solution à mettre en place en premier suivi des Kanbans et de l'amélioration du goulot à mettre en place en parallèle.

Enfin, la recherche démontre clairement un impact positif sur la performance lors de l'implantation d'outils de l'agilité et d'une conception de produits modulaires combinés à l'Industrie 4.0. La mise en place des éléments implantés a amélioré la compétitivité de la PME, l'amenant à une orientation vers l'Industrie 4.0 et vers une production de masse personnalisée.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	iv
RÉSUMÉ.....	v
TABLE DES MATIÈRES	vii
LISTE DES TABLEAUX.....	xi
LISTE DES FIGURES	xiii
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 1 PROBLÉMATIQUE DE RECHERCHE ET OBJECTIFS.....	3
1.1 Problématique	3
1.2 Questions de recherche	4
1.3 Objectif principal	5
1.4 Objectifs secondaires	5
1.5 Concepts importants.....	6
CHAPITRE 2 REVUE DE LA LITTÉRATURE	7
2.1 Méthodologie de la revue de littérature	7
2.2 Industrie 4.0.....	9
2.2.1 Définition de l'Industrie 4.0.....	9
2.2.2 Technologies et autres outils.....	11
2.3 Agilité.....	19
2.3.1 Définition de l'agilité.....	19
2.3.2 Outils d'agilité.....	20
2.4 PME.....	26
2.5 Industrie 4.0 dans les PME.....	27
2.5.1 Situation actuelle des PME par rapport à l'implantation de l'Industrie 4.0....	27
2.5.2 Bénéfices de l'implantation de l'Industrie 4.0	28
2.5.3 Facteurs de succès de l'implantation de l'Industrie 4.0	29
2.5.4 Limites de l'implantation de l'Industrie 4.0 pour les PME.....	30
2.5.5 Préalables à l'Industrie 4.0 pour les PME.....	31
2.5.6 Technologies 4.0 dans les PME	32

2.5.7 Stratégie d'implantation de l'Industrie 4.0 dans les PME	34
2.6 Agilité dans les PME.....	36
2.6.1 Facteurs de succès et freins de l'agilité.....	36
2.7 Stratégie d'implantation combinant agilité, modularité et Industrie 4.0 dans les PME	37
2.8 Matrice de la revue de littérature	38
2.9 Conclusion de la revue de littérature.....	39
CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE DE LA RECHERCHE	40
3.1 Cadre conceptuel.....	40
3.2 Hypothèse de recherche	43
3.3 Méthodologie et stratégie d'implantation	43
3.3.1 Présentation de la stratégie d'implantation de l'Industrie 4.0.....	43
3.3.2 Choix de la méthodologie	47
CHAPITRE 4 CAS EN ENTREPRISE	49
4.1 Présentation de l'entreprise dans sa situation initiale	49
4.2 Méthodologie du cas en entreprise.....	52
4.3 Agilité, Lean et préparation aux produits modulaires.....	54
4.3.1 Ajout d'un commis.....	54
4.3.2 Adaptation de l'ERP - Liaison des pièces standards aux projets clients	54
4.3.3 Adaptation du ERP - Identification et codification des pièces standards	58
4.3.4 Adaptation du ERP - nomenclature informatique d'un équipement.....	64
4.3.5 Revue des méthodes de soumission pour les produits modulaires	65
4.4 Produits modulaires.....	67
4.4.1 Conception des produits modulaires	67
4.5 Implantation de technologies de l'Industrie 4.0	69
4.5.1 Validation des préalables à l'Industrie 4.0.....	69
4.5.2 Stockage des données infonuagique	71
4.5.3 Simplification et automatisation des processus internes.....	72
4.6 Conclusion de la méthodologie du cas en entreprise	75
4.7 Résultats du cas en entreprise	76
4.7.1 Résultats de l'implantation des solutions.....	76
4.7.2 Résultats sur l'audit de la performance numérique.....	78

4.7.3 Résultats sur le ratio du chiffre d'affaires par employé	79
4.7.4 Temps requis pour l'implantation des solutions	80
4.7.5 Barrières et facilitateurs liés au cas en entreprise	82
4.8 Analyse des résultats du cas en entreprise	85
4.8.1 Analyse des résultats de l'audit.....	85
4.8.2 Analyse de l'impact des solutions mises en place	86
4.8.3 Analyse des barrières vécues	88
4.8.4 Analyse du ratio du chiffre d'affaires par employé	90
4.9 Conclusion du cas en entreprise	91
CHAPITRE 5 PLAN D'EXPÉRIENCE RÉALISÉ PAR UNE SIMULATION.....	92
5.1 Choix des variables et de leurs niveaux	92
5.2 Modèle de simulation.....	95
5.3 Données de la simulation	99
5.4 Hypothèses limitatives	100
5.5 Validation du modèle de simulation	101
5.6 Évaluation du régime permanent	102
5.7 Description de l'opérationnalisation des variables	103
5.8 Hypothèses statistiques	106
5.9 Conception du plan d'expérience.....	108
5.9.1 Modèle mathématique.....	108
5.9.2 Plan d'expériences TAGUCHI L16.....	109
5.10 Résultats de la simulation.....	111
5.10.1 Résultats du plan d'expérience TAGUCHI L16.....	111
5.10.2 Analyse des résidus des expériences.....	113
5.10.3 Analyse de la variance des résultats du plan d'expérience	113
5.11 Analyse des résultats de simulation	116
CHAPITRE 6 ANALYSE GLOBALE DES RÉSULTATS ET DISCUSSIONS ...	120
6.1 Retour sur les hypothèses de recherche	120
6.2 Analyse des résultats	121
6.3 Limite de la recherche.....	126
6.4 Perspectives futures.....	126
6.4.1 Pour l'entreprise.....	126

6.4.2 Pour la recherche.....	128
CONCLUSION.....	129
LISTE DES RÉFÉRENCES	131
ANNEXE 1 - MATRICE DE LA REVUE DE LITTÉRATURE DE L'INDUSTRIE 4.0.....	142
ANNEXE 2 - MATRICE DE LA REVUE DE LITTÉRATURE DE L'AGILITÉ	148
ANNEXE 3 –SOMMAIRE ET RECOMMANDATIONS DU RAPPORT DE LA CARTOGRAPHIE DE LA CHAÎNE DE VALEUR.....	151
ANNEXE 4 - QUESTIONNAIRE DE L'ÉTAPE AUDIT SITUATION INITIALE	157
ANNEXE 5 - QUESTIONNAIRE DE L'ÉTAPE AUDIT SITUATION FINALE	161
ANNEXE 6 – DIAGRAMME DES TEMPS D'IMPLANTATION.....	166

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1: Concepts, mesures de performances et mots-clés de la revue de littérature .6	.6
Tableau 2.1: Liste de combinaisons de mots-clés utilisés pour la revue de littérature sur l'agilité.....9	9
Tableau 2.2: Liste de technologies de l'Industrie 4.0 selon la taille d'entreprise basée sur les résultats du sondage en entreprise traduit de (Rauch et al., 2019) 13	13
Tableau 2.3: Liste de technologies de l'Industrie 4.0 selon la taille d'entreprise basée sur des experts traduit de (Rauch et al., 2019)..... 14	14
Tableau 2.4: Fréquence des outils de l'Industrie 4.0 dans la littérature par auteur..... 17	17
Tableau 2.5: Fréquence des outils de l'Industrie 4.0 dans la littérature par auteur (Suite) 18	18
Tableau 2.6: Tableau des outils d'agilité25	25
Tableau 2.7: Recommandations selon les trois premiers niveaux de priorité adapté de Gamache (2019).....35	35
Tableau 4.1: Résultats de la comparaison entre les deux audits réalisés au début et à la fin du cas en entreprise 79	79
Tableau 4.2: Ratio du chiffre d'affaires par employé.....80	80
Tableau 5.1: Liste des variables et de leurs niveaux.....93	93
Tableau 5.2:Analyse Pareto des équipements d'un projet de palettisation98	98
Tableau 5.3: Plan TAGUCHI L16 110	110
Tableau 5.4: Résultats du plan d'expérience TAGUCHI L16 en nombre de projets livrés 112	112
Tableau 5.5: Analyse de la variance (ANOVA) sur le modèle linéaire général 114	114
Tableau ANNEXE 1.1 : Matrice de la revue de la littérature sur l'Industrie 4.0..... 142	142
Tableau ANNEXE 2.1 : Matrice de la revue de la littérature sur l'agilité..... 148	148
Tableau ANNEXE 3.1 : Questionnaire de l'étape audit tiré de Gamache (2019) complété en septembre 2020..... 151	151
Tableau ANNEXE 4.1 : Questionnaire de l'étape audit tiré de Gamache (2019) complété en septembre 2020..... 157	157
Tableau ANNEXE 5.1 : Questionnaire de l'étape audit tiré de Gamache (2019) complété en juillet 2022..... 161	161

Tableau ANNEXE 6.1: Diagramme des temps d'implantation des solutions sélectionnées
.....166

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1:Schéma de concepts de la revue de la littérature	7
Figure 2.2: Classement des technologies en fonction des niveaux de capacité traduit de (Pech & Vrchota, 2020)	13
Figure 2.3: Liste des 15 solutions les plus utilisées par les PME dans le catalogue traduit de (Schönfuß et al., 2021)	15
Figure 3.1: Cadre conceptuel pour l'amélioration des performances d'une PME manufacturière en réorientation vers la personnalisation de masse dans le contexte de l'Industrie 4.0.....	42
Figure 3.2: Présentation de la stratégie d'implantation adapté de (Gamache, 2019)	44
Figure 4.1: Diagramme de la méthodologie d'implantation des outils pour le cas en entreprise	53
Figure 4.2: Exemple d'étiquette générée par le fichier Excel pour les dessins	55
Figure 4.3: Exemple d'étiquette utilisée pour identifier les pièces	56
Figure 4.4:Diagramme expliquant le processus avant l'implantation du module de réservation des pièces, modules et produits finis standards.....	57
Figure 4.5: Exemple de la nouvelle étiquette.....	58
Figure 4.6: Diagramme expliquant la codification des pièces standards présente au début du cas en entreprise	59
Figure 4.7: Diagramme expliquant la codification des modules et produits finis standards présents au début du cas en entreprise	60
Figure 4.8: Diagramme expliquant la codification des pièces, modules et produits finis standards (modèles) implantés dans l'entreprise.....	61
Figure 4.9: Image de la fenêtre de création d'un nouvel élément standard.....	63
Figure 4.10: Présentation de l'affichage de la fenêtre « Voir l'utilisation de la pièce »...63	63
Figure 4.11: Image d'une partie du logiciel de soumission réalisé sur Excel	66
Figure 5.1: Représentation graphique des liens entre les concepts et les variables testés dans la simulation.....	94
Figure 5.2: Représentation du processus d'une commande pour l'entreprise	95
Figure 5.3:Représentation du logiciel de simulation Simio	97
Figure 5.4:Évaluation du temps de réchauffement de la simulation.....	103

Figure 5.5: Graphe linéaire des interactions associé au plan Taguchi L16 sélectionné..	111
Figure 5.6: Graphique de distribution des valeurs résiduelles	113
Figure 5.7: Résultats graphiques de l'impact de chacune des variables indépendantes .	115
Figure 5.8: Graphique de l'interaction Conception modulaire et JAT & Kanban.....	115
Figure 5.9: Graphique de l'interaction Conception modulaire et Indicateurs de performance, Amélioration continue & Lean	116

INTRODUCTION

Le secteur manufacturier du Québec présente « toujours un retard sur le plan de la productivité par rapport à la moyenne canadienne » (STIQ, 2022). Le manque de main-d'œuvre force les entreprises à refuser des contrats, à livrer en retard, à augmenter la quantité d'heures supplémentaires effectuées et à avoir davantage recours à la sous-traitance (STIQ, 2020). Les entreprises font face à de nombreuses perturbations et doivent s'adapter rapidement pour maintenir un avantage compétitif. Elles doivent se distinguer dans un contexte de mondialisation où le client demande des produits personnalisés.

La recherche sur l'Industrie 4.0 gagne de plus en plus de terrain. Malgré que ces nouvelles technologies montrent un taux d'implantation plus élevé dans les grandes entreprises (Pech & Vrchota, 2020; Szász et al., 2020), certains auteurs mentionnent que l'Industrie 4.0 est accessible pour les PME (Pech & Vrchota, 2020). Les préalables commencent à se clarifier et le niveau d'implantation des technologies de l'Industrie 4.0 au Québec est en développement (Charbonneau Genest & Gamache, 2020; Gamache et al., 2020). Les barrières de l'implantation de l'Industrie 4.0 dans les PME commencent aussi à être connues (Rauch et al., 2019). Plusieurs modèles de maturité permettent de mesurer le niveau d'implantation de ces solutions technologiques (Bertolini et al., 2019).

Cependant, l'utilisation de l'Industrie 4.0 est à son début dans les PME manufacturières. La littérature présente très peu d'articles de cas où l'implantation est une réussite. Les méthodes pour implanter l'Industrie 4.0 ne sont pas appuyées par des cas d'expérimentation ou d'observation de l'implantation en entreprise (Mittal et al., 2019).

D'autres auteurs mentionnent que la recherche devrait être orientée vers l'adaptation de modèles pour les projets de l'Industrie 4.0 dans les PME pour couvrir le manque de la littérature (Schmitt et al., 2020).

À ce jour, les bénéfices de l'Industrie 4.0 sont encore très peu connus et encore moins quantifiés (Moeuf et al., 2018).

Ces bénéfices sont encore moins connus pour la PME manufacturière du Québec. Enfin, Črešnar et al. (2020) mentionnent que les entreprises implantent les principes de l'Industrie 4.0 sans preuve justificative.

La présente recherche vise à adapter une stratégie d'implantation de l'Industrie 4.0 pour la PME en transition d'une fabrication sur mesure à une production de masse personnalisée. La stratégie se base sur les concepts de l'agilité et de la conception modulaire. La stratégie proposée est validée par un cas en entreprise sous forme de recherche-action ainsi qu'un plan d'expérience réalisé par simulation. Cette étude prend sa place dans le cadre d'une recherche plus grande qui vise à adapter l'Industrie 4.0 dans les PME de différents secteurs.

CHAPITRE 1 PROBLÉMATIQUE DE RECHERCHE ET OBJECTIFS

Dans ce chapitre, la problématique, les questions de recherche, l'objectif principal et les objectifs secondaires s'y retrouvent de même que les concepts importants.

1.1 Problématique

Dans la plupart des régions du monde, les PME constituent environ 90 % du nombre d'entreprises d'une région (Pech & Vrchota, 2020). Au Québec, les PME font partie du cœur économique de la province, représentant 92 % des entreprises du secteur manufacturier québécois (Industrie Canada, 2020). La survie et la croissance de ces entreprises sont essentielles pour le Québec puisqu'elles sont le moteur de développement de l'économie d'une région (Lucian et al., 2018). Ces entreprises font face à plusieurs perturbations ainsi qu'à un contexte économique et technologique en pleine évolution.

En premier lieu, avec la mondialisation, une ouverture des frontières et une augmentation des échanges se font sentir à travers le monde. Cette situation affecte les PME du Québec en rendant l'achat et la vente de matériel sur le marché mondial plus facile. Plusieurs entreprises se concentrent sur le marché local ou demeurent passives face à cette nouvelle situation (Julien & St-Pierre, 2009). L'exportation des produits fabriqués est plus accessible, notamment par l'utilisation du commerce en ligne (Bettioli et al., 2022).

En second lieu, les entreprises doivent faire face à un manque de main-d'œuvre criant dans de nombreux domaines. En 2019, 84 % des entreprises manufacturières répondant à un sondage du STIQ soulèvent un problème de recrutement de main-d'œuvre dans leur entreprise (STIQ, 2020).

En troisième lieu, l'évolution actuelle du marché amène un besoin d'expérience personnalisée pour les clients. Une demande pour des produits de plus en plus personnalisés amène ainsi les entreprises à répondre à cette demande par une production

de masse personnalisée (Deloitte, 2015). Cette demande amène les entreprises à devoir répondre rapidement à plus de variations dans une même période (Torn & Vaneker, 2019).

En quatrième lieu, les entreprises font face à des perturbations, de nouvelles situations les poussant à devoir réagir rapidement (Kilpatrick & Barter, 2020). Notons par exemple, la pandémie de la COVID-19 amenant une obstruction des chaînes d'approvisionnement, des difficultés à reprendre la production ainsi que des obstructions en matière de transport (Kilpatrick & Barter, 2020).

En plus du contexte et des perturbations mentionnées, les PME ressentent le besoin, plus que jamais, de se différencier de la compétition et d'améliorer leurs performances organisationnelles (Gamache et al., 2020). Les PME manufacturières du Québec présentent un retard au niveau de leur productivité face aux autres provinces du Canada et face aux autres pays (STIQ, 2020).

Pour faire face à ces perturbations et la situation actuelle des entreprises au Québec, la compétitivité des PME doit être augmentée. La compétitivité d'une PME manufacturière est liée à la performance de cette dernière (Ismail et al., 2010). La performance d'une entreprise peut être mesurée par la quantité de ventes, la rentabilité, la productivité (Ismail et al., 2010). De plus, la stratégie des PME est généralement basée sur la flexibilité, la proximité du client et le temps de réponse au client (Moeuf et al., 2018). L'augmentation de la compétitivité des entreprises passe ainsi par l'amélioration de la performance, mais ne doit pas impacter la flexibilité de ces dernières. Ces concepts permettront de cadrer l'augmentation de compétitivité des PME dans cette étude.

1.2 Questions de recherche

La situation actuelle des PME du Québec soulève la question de recherche principale suivante :

- Comment mettre en œuvre la production de masse personnalisée dans une PME manufacturière désirant augmenter sa compétitivité?

Il est par la suite possible de s'interroger de plusieurs façons sur cette question principale afin de cerner plus précisément le cadre de la recherche.

- Quels sont les facilitateurs et les barrières à l'implantation de l'Industrie 4.0 dans les PME manufacturières au Québec?
- Quels sont les constituants de l'Industrie 4.0 à implanter dans les PME manufacturières du Québec dans un contexte de production de masse personnalisée?
- Quelles sont les interventions augmentant l'agilité nécessaire à l'implantation de l'Industrie 4.0 pour les PME manufacturières du Québec?
- Comment les stratégies de l'Industrie 4.0 actuelles doivent-elles être adaptées pour orienter la PME en transition vers la personnalisation de masse?

Les réponses à ces questionnements mènent à l'établissement de lignes directrices pour l'augmentation de la compétitivité des PME manufacturières du Québec en transition vers une production de masse personnalisée. Ces lignes directrices accordent une importance particulière aux technologies de l'Industrie 4.0 tout en considérant que ces technologies ne doivent pas être implantées seules.

1.3 Objectif principal

À la suite des questionnements précédents, l'objectif de la recherche se définit comme suit : l'objectif principal est d'adapter et de valider une stratégie d'implantation de l'Industrie 4.0 pour une PME manufacturière du Québec fabriquant sur mesure en se basant sur l'agilité et la conception modulaire du produit. Le but est d'assurer le succès d'une transition vers une production de masse personnalisée.

1.4 Objectifs secondaires

Les étapes suivantes permettent l'accomplissement de l'objectif principal.

1. Identifier les facilitateurs et les barrières à l'implantation de l'Industrie 4.0 dans les PME manufacturières au Québec.

2. Identifier les constituants de l'Industrie 4.0 à implanter dans les PME manufacturières du Québec dans un contexte de production de masse personnalisée.
3. Identifier l'effet de l'agilité et de la conception modulaire sur le succès de l'implantation de l'Industrie 4.0 pour une PME manufacturière.
4. Adapter et appliquer la stratégie définie dans une PME manufacturière du Québec.

1.5 Concepts importants

La définition des concepts suivants justifie l'augmentation de la performance des entreprises. Les mesures de performance permettent de quantifier chacun des concepts identifiés précédemment présents dans le Tableau 1.1 ci-dessous. Enfin, la dernière colonne du tableau présente les mots-clés principalement utilisés pour la revue de littérature.

Tableau 1.1: Concepts, mesures de performances et mots-clés de la revue de littérature

Concepts	Mesures de performance	Mots-clés
<ul style="list-style-type: none"> • Compétitivité • Agilité (Flexibilité et délai de réaction) • Performance numérique • Rentabilité • Performance Productivité (efficacité) 	<ul style="list-style-type: none"> • Nombre de produits différents pouvant être fabriqués par l'entreprise • Nombre de projets livrés annuellement • Chiffre d'affaires annuel par employé • Niveau de performance numérique 	<ul style="list-style-type: none"> • Industrie 4.0 • Agilité, agile • PME • Personnalisation de masse • Manufacturier

CHAPITRE 2 REVUE DE LA LITTÉRATURE

L'Industrie 4.0, implantée principalement en grande entreprise, nécessite d'être adaptée à la PME vu ses défis spécifiques (Müller, 2019) afin qu'elle en tire aussi les bénéfices. La PME doit adapter les outils et technologies puisqu'elle présente des limites différentes des grandes entreprises. Ces limites et défis seront présentés dans la revue de la littérature.

La revue de littérature présente l'état actuel des recherches sur le sujet. Elle permet aussi de cibler un potentiel de recherche dans ce secteur. La méthodologie de la revue de la littérature est présentée en premier lieu. Ce chapitre définit ensuite l'Industrie 4.0, l'agilité, la conception modulaire comme un élément d'agilité et la PME. Il est ensuite question de la combinaison de ces éléments dans les dernières sections. La Figure 2.1 résume les concepts et l'ordre de présentation des éléments dans le chapitre.

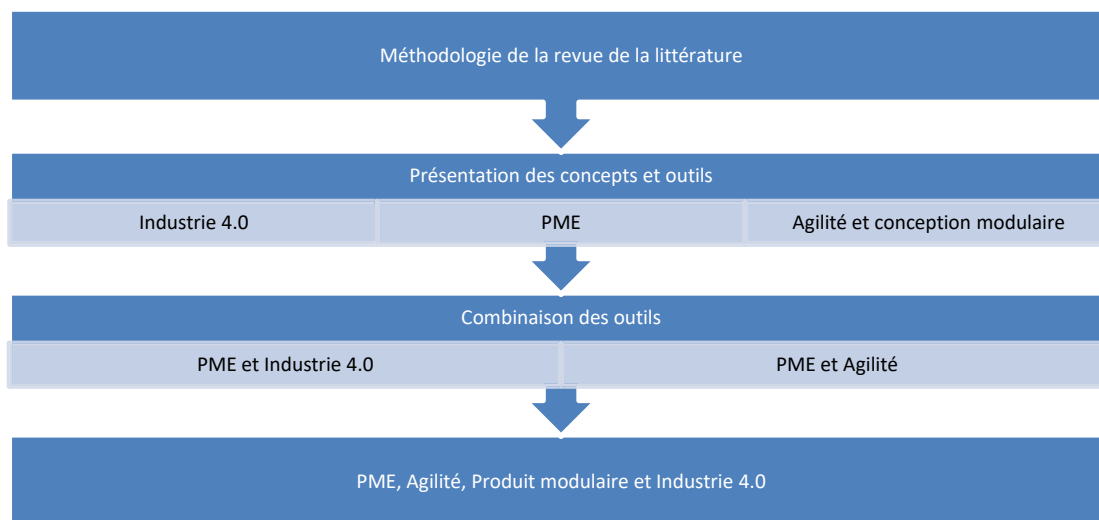


Figure 2.1: Schéma de concepts de la revue de la littérature

2.1 Méthodologie de la revue de littérature

Les articles soulevés dans la revue de la littérature proviennent d'une recherche sur le moteur de recherche SCOPUS.

Les mots-clés suivants combinés à leur équivalent anglais ont été utilisés dans le moteur de recherche pour la revue de la littérature concernant l'Industrie 4.0 : 4.0 ET PME. Les articles des années 2018 à 2022 ont été sélectionnés. Le moteur de recherche a présenté 696 documents en utilisant les paramètres présentés précédemment en date du 21 juin 2022. Des références citées par les articles lus pour la revue de la littérature ont été ajoutées aux références de cette recherche afin de ressortir les articles essentiels antérieurs aux filtres de recherche.

Parmi les 696 documents, les plus pertinents ont été sélectionnés à l'aide du titre de l'article. Ce tri a permis de sélectionner les articles présentant l'un des facteurs suivants : PME manufacturières, études de cas, revues de littérature, autres documents avec titres interpellant face à un des concepts touchés par les questions de recherche.

Des 696 documents, 210 d'entre eux ont été sélectionnés et importés dans le logiciel EndNote. Une recherche des articles intégraux complets sur SCOPUS, Google Scholar et Research Gate a été effectuée afin de trouver les articles complets.

Les sommaires des articles disponibles ont été lus et catégorisés par sujet dans les groupes suivants : Agilité, Bénéfices de l'Industrie 4.0, compétitivité, outils de l'Industrie 4.0 à implanter, facteurs de succès, facteurs limitants, Internet des objets, personnalisation de masse, modèle de maturité, méthodologie d'implantation, préalables à l'Industrie 4.0, PME, social et environnement. L'identification de ces différentes catégories a été réalisée pendant la lecture des articles afin de créer des groupes pour mieux identifier les articles. Ces catégories représentent les éléments importants se retrouvant le plus fréquemment dans les sommaires d'articles.

Les articles ont aussi été catégorisés selon le niveau de pertinence en fonction des quatre catégories suivantes : « Intéressant », « À lire », « Peut-être intéressant », « À ne pas lire ».

Une recherche des articles intégraux a été effectuée. À la suite de la catégorisation des articles selon leur sujet et leur pertinence, 18 articles présents dans les catégories « Intéressant » et « À lire » ont été utilisés pour concevoir la matrice de la revue de

littérature. D'autres articles des catégories « Intéressant » et « À lire » ont été utilisés, de même que certains auteurs cités par les articles de ces catégories pour compléter la revue de la littérature.

Pour la revue de la littérature sur l'agilité et la conception modulaire, la même méthode de recherche a été utilisée avec d'autres mots-clés. Les combinaisons de mots-clés utilisées se retrouvent dans le Tableau 2.1 ci-dessous. Aucun filtre de date n'a été utilisé pour la revue de la littérature sur l'agilité et la conception modulaire.

Tableau 2.1: Liste de combinaisons de mots-clés utilisés pour la revue de littérature sur l'agilité

Combinaison de mots-clés	Nombre de documents
Personnalisation ET masse ET (agilité OU agile) ET PME	11 documents
PME ET Agilité ET manufacturier	16 documents
PME ET (Agilité OU Agile)	596 documents
(Taxonomie OU Revue de la littérature) ET (Agilité OU Agile) ET PME	47 documents

2.2 Industrie 4.0

2.2.1 Définition de l'Industrie 4.0

L'Industrie 4.0, l'industrie du futur, l'usine intelligente ainsi que la « Smart Factory » sont tous des termes utilisés pour parler de la nouvelle révolution industrielle (Gamache, 2019). Il existe plus d'une centaine de définitions de l'Industrie 4.0 et aucune définition universellement acceptée de ce concept n'existe, puisque chaque chercheur de chaque région met l'accent sur des éléments différents (Blanchet, 2016). Dans cette recherche, la définition de l'Industrie 4.0 de (Gamache, 2019) a été utilisée et se présente comme suit :

« L'utilisation des technologies numériques et des données en temps réel pour améliorer la prise de décision, l'efficacité et l'agilité de ses processus administratifs et opérationnels, tout en permettant la personnalisation de masse, tant au niveau des produits que des services offerts à ses clients. (Gamache, 2019) »

L'Industrie 4.0 est un regroupement de plusieurs technologies et méthodes d'organisation touchant le produit et le processus de production dans son ensemble. Le regroupement de ces éléments permet un partage d'informations en temps réel par l'interconnexion entre les acteurs et les machines (Forschungsunion, 2013; Garay-Rondero et al., 2019). Ces interactions permettent la prise de décisions autonome basée sur les données amassées (Sopadang et al., 2020).

L'Internet des objets (IoT), l'Internet des services (IoS), les systèmes cyberphysiques (CPS) et l'infonuagique sont les éléments primaires de l'Industrie 4.0 selon Hermann et al. (2016). L'acquisition de compétences, l'agilité et l'innovation, la maîtrise des technologies, l'utilisation des données (Gamache, 2019) sont aussi des exemples d'éléments au centre des pratiques de l'Industrie 4.0 ne se limitant pas seulement aux technologies.

L'Industrie 4.0 peut être vue comme un environnement de production se contrôlant et s'optimisant par lui-même, permettant ainsi de mieux répondre à l'augmentation de la variation causée par la personnalisation des produits et à la création de service en lien avec les produits (Bressanelli et al., 2018; Huxtable & Schaefer, 2016). Cette nouvelle culture à mettre en place dans les PME amène les entreprises à s'améliorer puisqu'elle fixe un nouveau standard de performance en repoussant les limites du passé (Szász et al., 2020).

Selon Gamache (2019), « L'Industrie 4.0 prend ses racines du besoin des entreprises à gagner en efficacité et en flexibilité pour répondre aux exigences de la personnalisation de masse. » L'agilité doit être vue comme une base permettant d'avancer vers l'Industrie 4.0 (Gamache, 2019). L'agilité nécessite le contrôle initial des processus ainsi que la réduction des gaspillages (Abdul-Nour et al., 1999). Le Lean est l'une des premières

étapes à mettre en place pour atteindre l'agilité et l'Industrie 4.0 (Tortorella & Fettermann, 2018). Le Lean rejoint les racines de l'Industrie 4.0 et peut être implanté préalablement, puis conjointement avec les autres technologies et outils de l'Industrie 4.0.

2.2.2 Technologies et autres outils

À la suite de deux entrevues semi-structurées réalisées dans des PME de Suisse, il est constaté que les opérateurs de production n'ont généralement pas de technologies à leur disposition. La première étape de l'Industrie 4.0 consiste à rendre les technologies numériques accessibles pour les opérateurs afin qu'ils arrivent au même niveau que le personnel d'administration. L'implantation de l'Industrie 4.0 consiste à mettre en place les technologies, le personnel et la structure organisationnelle, mais il ne faut surtout pas oublier la culture d'entreprise qui consiste en la fondation de l'Industrie 4.0 (Li et al., 2019).

Dans un autre cas d'évaluation d'une petite entreprise de fabrication, l'importance est principalement accordée à l'analyse du taux de rendement global, aux interfaces personne-machine, au partage d'informations, au système informatique, aux ressources non techniques et à l'intégration horizontale et verticale (Sopadang et al., 2020). Dans leur étude de cas, il a été constaté que l'entreprise avait une faible agilité puisqu'il n'y avait pas de partage d'informations. Le processus de décision était alors inefficace.

Une autre recherche au niveau des facteurs d'impact et de deux études de cas soulevé que la vision et la stratégie, l'implication des travailleurs et la création de partenariats avec des entreprises d'implantation de technologies sont des éléments clés de l'implantation de l'Industrie 4.0. Plusieurs difficultés ont été rencontrées dans les études de cas réalisées dû à l'absence de ERP et de MES (Arcidiacono et al., 2019).

À la suite d'une revue de littérature, Mittal et al. identifient neuf éléments de l'Industrie 4.0 comme étant les plus importants. Ils identifient ces éléments comme étant les systèmes de contrôle intelligents, les systèmes de partage des données, l'analyse des données, la multidisciplinarité des travailleurs, les systèmes de gestion de la production (ERP et

MES), l'identification des produits, pièces et matériel avec les technologies d'identification par radio fréquence (RFID) par exemple, la cybersécurité, l'économie d'énergie et les produits modulaires (Mittal et al., 2019).

Moeuf et al. (2018) distinguent quatre types de façon d'utiliser les technologies. Les éléments implantés peuvent être utilisés pour effectuer de la surveillance, du contrôle, de l'optimisation ou encore rendre les équipements ou processus autonomes. La surveillance présente un nombre d'auteurs beaucoup plus important que les trois autres regroupements chez les PME. Parmi les technologies liées à la surveillance, on retrouve le stockage de données sur l'infonuagique, l'Internet des objets et les technologies RFID. Ces technologies ont un faible coût et sont accessibles pour les PME (Moeuf et al., 2018). Le stockage des données sur des solutions infonuagiques est la technologie la plus implantée en PME. L'infonuagique peut être utilisée à cinq effets : le partage de documents, l'ajout de services au produit fabriqué, la collaboration, la distribution de la production et l'optimisation des ressources (Moeuf et al., 2018).

Pech et Vrchota présentent la priorisation d'implantation non pas par fréquence d'utilisation dans la littérature, mais en utilisant des niveaux d'implantation. Les auteurs définissent trois niveaux dans lesquels plusieurs technologies s'y retrouvent. Le premier niveau comprend l'analyse, l'infonuagique, les données ainsi que l'humain ou l'opérateur 4.0. Ces éléments sont la base de l'Industrie 4.0 pour les PME et nécessitent leur implantation dès le début de la mise en place. Le second niveau comprend les capteurs, les robots, l'interconnexion entre les machines, l'ERP ou le MES, la structure de technologie de l'information et les technologies mobiles. Le dernier niveau comprend la réalité virtuelle, le partage de données ainsi que l'intelligence artificielle. Le classement des technologies se retrouve dans la Figure 2.2 (Pech & Vrchota, 2020).

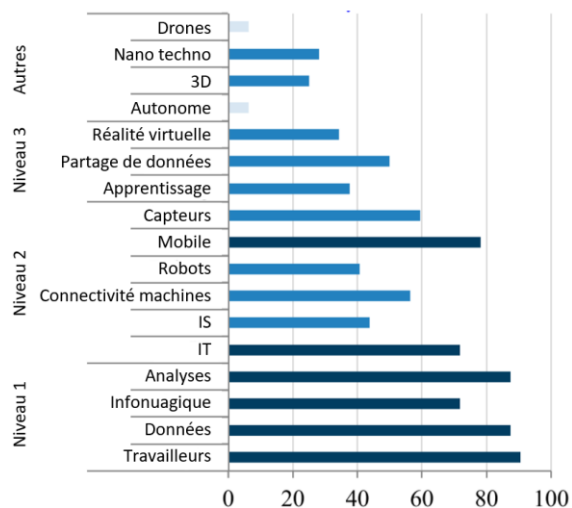


Figure 2.2: Classement des technologies en fonction des niveaux de capacité traduit de (Pech & Vrchota, 2020)

Rauch et al. mentionnent les outils et les technologies de l'Industrie 4.0 les plus importantes selon les entreprises et selon les experts à la suite de deux sondages. Ces éléments sont classés par taille d'entreprise. Le sondage présente des technologies à implanter différentes selon la taille d'entreprise. Les résultats des sondages réalisés dans l'article de Rauch sont présentés dans le Tableau 2.2 et le Tableau 2.3.

Tableau 2.2: Liste de technologies de l'Industrie 4.0 selon la taille d'entreprise basée sur les résultats du sondage en entreprise traduit de (Rauch et al., 2019)

Rang	Petite	Moyenne	Grande
1	Système de collecte de données en temps réel	Système de production agile	Cyber Sécurité
2	ERP/MES	Transformation de culture d'entreprise	ERP/MES
3	Stratégie/Plan d'action 4.0	Modèle à flux continu de matériel	Stratégie/Plan d'action 4.0
4	Stations de travail numériques et connectées	Stations de travail numériques et connectées	Système de collecte de données en temps réel
5	Calculs infonuagiques	Système de collecte de données en temps réel	Transformation de culture d'entreprise
6	Cyber Sécurité	Rôle de l'opérateur	Analyse de données
7	Système de production agile	Système de production adaptatif	Système de production agile
8	Réseaux collaboratifs	Analyse de données	Stations de travail numériques et connectées
9	Transformation de culture d'entreprise	ERP/MES	Rôle de l'opérateur
10	Formation 4.0	Cyber Sécurité	E-Kanban

Tableau 2.3: Liste de technologies de l'Industrie 4.0 selon la taille d'entreprise basée sur des experts traduit de (Rauch et al., 2019)

Rang	Petite	Moyenne	Grande
1	Rôle de l'opérateur	Formation 4.0	Système de collecte de données en temps réel
2	Transformation de culture d'entreprise	Stratégie/Plan d'action 4.0	Maintenance prédictive
3	Cyber Sécurité	Technologies d'identification et de suivi	Formation 4.0
4	Stratégie/Plan d'action 4.0	Maintenance prédictive	Modèle à flux continu de matériel
5	Formation 4.0	Cyber Sécurité	Cyber Sécurité
6	Système de production agile	Modèle à flux continu de matériel	Suivi des produits à distance
7	Modèle à flux continu de matériel	Transformation de culture d'entreprise	Technologies d'identification et de suivi
8	Réseaux collaboratifs	ERP/MES	Intelligence artificielle
9	Maintenance prédictive	Assemblage et production automatisés	PDM et PLM
10	Innovation	Robots collaboratifs	

Les éléments importants, présentés à la fois par les experts ainsi que les entreprises, se retrouvent en gras dans le Tableau 2.2 et dans le Tableau 2.3. Les PME ainsi que les experts du sondage conviennent que les PME doivent changer leur culture d'entreprise, implanter des éléments de la cybersécurité, avoir un système de production agile, avoir un plan d'action pour implanter l'Industrie 4.0, se diriger vers un modèle de réseaux collaboratifs, mettre en place un ERP, intégrer un MES et produire un flux de matière en continu et former leurs travailleurs à l'Industrie 4.0 (Rauch et al., 2019).

L'utilisation d'un système ERP, d'un logiciel MES, d'indicateurs de performance significatifs par rapport au plan stratégique, de tableaux d'indicateurs de performance en temps réel et d'un système de gestion des connaissances sont les éléments nécessaires pour les PME manufacturières (Gamache et al., 2020). Les auteurs de l'article en concluent que les PME ont un besoin d'avoir de l'information en temps réel. Ce besoin est plus important que celui d'automatiser certaines opérations de leur entreprise. De plus, les entreprises ayant implanté un ERP ont une performance numérique 23 % supérieure aux autres entreprises (Gamache et al., 2020).

La Figure 2.3 présente les résultats d'un catalogue de solution répondant chacune à une problématique présente en PME (Schönfuß et al., 2021). La solution mise en place le plus fréquemment consiste à avoir le statut des bons de travail de l'entreprise en temps réel.

Les quatre autres solutions mises en place le plus fréquemment consistent à intégrer les systèmes d'information entre la conception et la production, mettre en place des instructions de travail numérique, ajouter une surveillance de la capacité de production et mettre en place la surveillance des variables importantes d'un procédé (Schönfuß et al., 2021). Le groupe de solutions « collecte de données et observation » correspond au groupe présentant le plus d'éléments parmi les quinze solutions les plus importantes. Ce groupe doit être priorisé pour plusieurs PME selon les auteurs (Schönfuß et al., 2021).

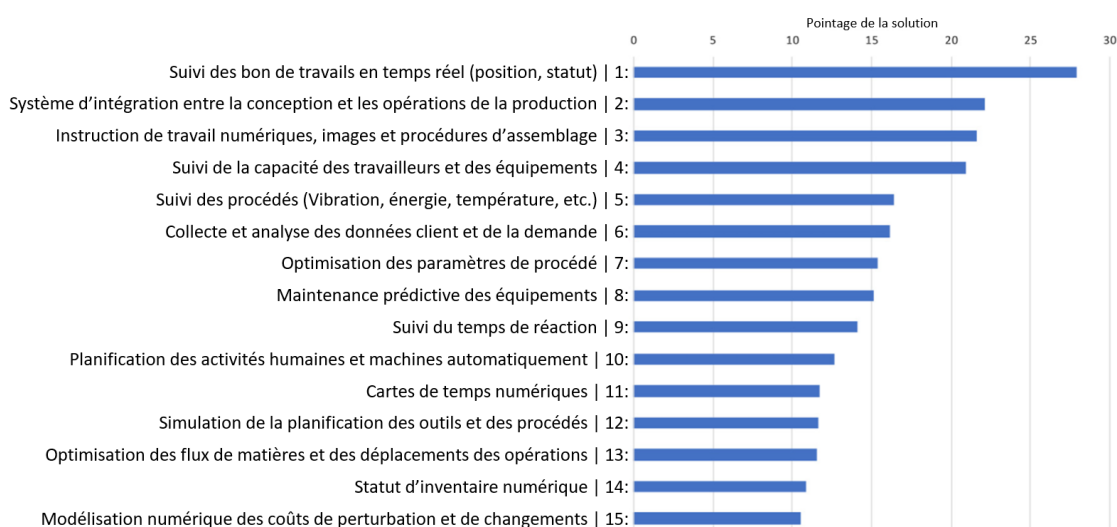


Figure 2.3: Liste des 15 solutions les plus utilisées par les PME dans le catalogue traduit de (Schönfuß et al., 2021)

Selon un sondage réalisé auprès de gestionnaires de PME de Roumanie, les technologies les plus importantes à implanter sont les robots autonomes, l'intégration horizontale et verticale, l'analyse des données et le Big Data, l'Internet des objets et la cybersécurité (Türkeş et al., 2019).

Certains auteurs distinguent deux groupes d'éléments, soit les technologies ainsi que les principes de conception (Menon & Shah, 2020).

On retrouve parmi les principes de conception : les produits modulaires, l'orientation service, l'intégration verticale et horizontale ainsi que la capacité en temps réel (Menon & Shah, 2020).

L'analyse des résultats de séances de travail, réalisées avec des PME de plusieurs régions du monde, regroupe plusieurs catégories telles que le Lean, la culture, les travailleurs, l'agilité, le besoin de données en temps réel, l'automatisation et la connectivité (Rauch & Vickery, 2020). Ceci vient appuyer l'ajout d'autres outils. Les requis nécessaires à l'implantation de l'Industrie 4.0 sont à tous les niveaux. L'Industrie 4.0 ne se résume pas simplement à des technologies et la connectivité en temps réel entre celles-ci. Toute l'organisation doit évoluer avec ces technologies.

Pour donner suite à la compilation des 18 articles sélectionnés provenant de la base de données SCOPUS, les Tableau 2.4 et Tableau 2.5 présentent les fréquences des technologies et outils adaptables à la PME selon la littérature sélectionnée. Tels que présentés par certains auteurs, les éléments sont divisés en plusieurs groupes. On retrouve les technologies dans le premier groupe, les autres outils dans le second groupe et certains facteurs ayant un effet sur l'implantation de l'Industrie 4.0 dans le troisième groupe. Les éléments sont classés par ordre de fréquence laissant au bas du tableau les éléments moins mentionnés par les auteurs.

Tableau 2.4: Fréquence des outils de l'Industrie 4.0 dans la littérature par auteur

Technologies de l'Industrie 4.0	Pourcentage (%)	Fréquence	(Schönfuß et al., 2021)	(Klimecka-Tatar et al., 2021)	(Mofolasayo et al., 2022)	(Busto Parra et al., 2021)	(Mittal et al., 2020)	(Mittal et al., 2019)	(Menon & Shah, 2020)	(Rauch & Vickery, 2020)	(Schmitt et al., 2020)	(Arcidiacono et al., 2019)	(Gamache et al., 2020)	(Li et al., 2019)	(Moeuf et al., 2018)	(Türkeş et al., 2019)	(Pech & Vrchota, 2020)	(Szász et al., 2020)	(Sopadang et al., 2020)	(Rauch et al., 2019)	
Collecte de données en temps réel	56 %	10	X	X	X	X	X		X	X					X		X				
Analyse des données / Big Data	50 %	9	X				X		X						X	X					
Infonuagique / Partage d'informations	39 %	7	X			X			X						X						
Système cyberphysique	33 %	6	X						X				X								
MES/ERP	33 %	6	X									X	X				X				
Robots/Cobots	33 %	6							X						X	X					
Identification des pièces (RFID, GPS)	33 %	6	X							X					X	X					
Cybersécurité	33 %	6	X						X				X								
Fabrication additive (Impression 3D, ...)	33 %	6	X						X				X								
Réalité augmentée et réalité virtuelle	28 %	5							X	X	X						X				
Internet des objets (IoT)	28 %	5							X	X	X				X	X					
Indicateurs de performance	28 %	5											X							X	X
Connectivité Machine-Machine	22 %	4											X		X						
Intelligence artificielle (AI) (Adaptation à des conditions)	22 %	4	X							X							X				X
Partage de données avec les fournisseurs / Réseau collaboratifs	22 %	4	X							X						X					
Simulation	22 %	4							X						X						
Infrastructure informatique (IT)	22 %	4											X	X							
Station de travail connectée	17 %	3	X										X								
Interaction personne-machine	6 %	1																X			
Processus autonomes	6 %	1																X			

Tableau 2.5: Fréquence des outils de l'Industrie 4.0 dans la littérature par auteur (Suite)

Autres outils et éléments ayant un effet		Pourcentage (%)	Fréquence	(Schönfuß et al., 2021)	(Klimecka-Tatar et al., 2021)	(Mofolasayo et al., 2022)	(Busto Parra et al., 2021)	(Mittal et al., 2020)	(Mittal et al., 2019)	(Menon & Shah, 2020)	(Rauch & Vickery, 2020)	(Schmitt et al., 2020)	(Arcidiacono et al., 2019)	(Gamache et al., 2020)	(Li et al., 2019)	(Moëuf et al., 2018)	(Türkes et al., 2019)	(Pech & Vrchota, 2020)	(Szász et al., 2020)	(Sopadang et al., 2020)	(Rauch et al., 2019)	
Autres outils	Rôle de l'opérateur / Formation / Opérateur 4.0	61 %	11	X	X		X	X	X		X		X	X	X		X	X				
	Changement de culture	39 %	7	X		X		X		X	X			X								
	Stratégie 4.0 / Plan d'action (Roadmap)	39 %	7	X			X		X	X	X			X				X				
	Ressources humaines techniques	39 %	7		X					X				X	X				X			
	Lean et amélioration continue	33 %	6					X			X									X	X	X
	Intégration horizontale ou verticale	28 %	5		X					X	X							X				X
	Agilité de production	17 %	3	X							X			X								
	Modularité, structures modulaires	17 %	3							X	X					X						X
	Gestion de l'innovation	11 %	2		X										X							
	Orientation service	11 %	2	X							X											
Effet	Flux de matières en continu	6 %	1	X																		
	Taille entreprise	6 %	1												X							
	Niveau multinational	6 %	1												X							
	Compétitivité de la région	6 %	1												X							

2.3 Agilité

2.3.1 Définition de l'agilité

Le concept d'agilité est devenu un nouvel élément compétitif largement répandu au début des années 2000 (Zhang, 2011). Ce concept a pour objectif de rendre les entreprises dynamiques face au marché en constant changement (Vázquez-Bustelo et al., 2007).

Historiquement, la compétition entre les entreprises était établie principalement par les prix. La compétition est désormais établie par la qualité, la rapidité à prendre le marché et l'exécution des commandes clients (Sharifi & Zhang, 2001).

Vázquez-Bustelo et al. (2007) définissent l'agilité comme un modèle de production qui permet de répondre aux changements de l'environnement procurant ainsi flexibilité, rapidité, qualité, service et efficacité par la synergie et l'intégration entre les technologies, les ressources humaines qualifiées et l'organisation.

Selon l'article de Gunasekaran and Yusuf (2002), les éléments mentionnés le plus fréquemment dans la littérature dans la définition d'agilité sont : la flexibilité, la réactivité, les entreprises virtuelles et les technologies de l'information.

De son côté, la flexibilité permet à une entreprise de fabriquer une grande variété de produits en petite quantité. Cette flexibilité permet de produire ces produits au coût de la production de masse et de s'adapter à la variation de la demande et de la production. Pour répondre au marché dynamique, une entreprise agile nécessite d'utiliser la flexibilité de son système efficacement pour répondre rapidement à la demande dynamique du marché (Abdul-Nour et al., 1999). Une entreprise agile est par le fait même flexible, mais une entreprise flexible n'est pas nécessairement agile.

Les entreprises agiles répondent à un marché de produits hautement personnalisés et sont en relation avec leurs clients pour le long terme. Ces entreprises ont des équipes multidisciplinaires partageant l'information et utilisant les technologies ainsi que leur

environnement flexible, modulaire et reconfigurable pour assurer la satisfaction (Leite & Braz, 2016).

L'agilité se distingue des autres philosophies par le concept de reconfigurabilité et d'adaptabilité face aux environnements turbulents (Leite & Braz, 2016). Cependant, l'agilité est la suite logique d'autres philosophies. Elle est un concept multidimensionnel ne pouvant être séparé des anciennes philosophies de gestion encore présentes (JinHai et al., 2003).

2.3.2 Outils d'agilité

Telle que mentionnée dans la section 2.2.1-Définition de l'Industrie 4.0, l'agilité est la base de l'Industrie 4.0. Ces deux philosophies cherchent à augmenter la flexibilité et l'efficacité requise pour atteindre l'objectif de la personnalisation de masse. Les outils d'agilité retrouvés les plus fréquemment dans la littérature se retrouvent dans les sous-sections suivantes.

2.3.2.1 Produits modulaires et outils de la personnalisation de masse

Parmi les outils augmentant l'agilité, la littérature mentionne la personnalisation de masse. La standardisation ainsi que la conception des produits sous forme de structures modulaires sont les deux concepts utilisés pour y parvenir (Gamache et al., 2017; Nakayama & De Mesquita Spinola, 2015). Ismail et al. (2007) présentent quatre formes de standardisation : la standardisation des pièces, des procédés, des produits et de l'approvisionnement. Abdul-Nour et al. (1999) soulèvent principalement la standardisation des produits et des procédés.

Un produit modulaire consiste en un assemblage de modules standards ayant des fonctions indépendantes et joint par des interfaces ou des connexions. Le produit fini abouti en une combinaison de ces différents modules. Le réarrangement des mêmes modules dans un positionnement différent permet d'obtenir un produit différent tout en combinant les mêmes modules (Zhang et al., 2019).

Selon Gamache et al. (2017), l'objectif d'une conception des produits modulaires est d'augmenter la disponibilité des machines notamment par la réduction du nombre de mises en courses. Selon le même auteur, l'implantation d'outils tels que la standardisation est nécessaire à l'implantation de l'Industrie 4.0.

La conception de produits modulaires aide à gérer la complexité de la variété des produits conçus pour chaque client. De plus, la conception modulaire permet d'orienter l'entreprise vers une chaîne d'approvisionnement afin de s'alimenter de différents modules chez des fournisseurs. L'entreprise peut alors passer de l'ingénierie sur commande à l'assemblage sur commande (Gosling & Naim, 2009).

Plusieurs auteurs mentionnent l'utilisation de pratiques telles que le « benchmarking » et l'évaluation des besoins clés des clients dans le processus de développement de leurs produits (Leite & Braz, 2016; Zhang, 2011). Ces pratiques peuvent être utilisées dans la création de produits modulaires.

Pour arriver à créer des produits modulaires, Bouchard et al. (2022) ont sélectionné un groupe d'équipement ayant un indice de similarité élevé. Les modules représentant plus de 80 % des ventes ont été identifiés afin de cibler les éléments les plus vendus. Les chercheurs ont ensuite réalisé une analyse de la conception actuelle pour déterminer les modules à standardiser. La conception des modules sélectionnés a ensuite été réalisée en prenant en compte les contraintes des équipements.

L'étude a démontré une réduction de 70 % et de 63 % du nombre de composantes pour la conception modulaire des deux équipements sélectionnés.

La conception de modules utilisant des pièces standards permet de réduire l'impact de la variabilité des besoins clients sur les processus et les procédés internes de l'entreprise (Ismail et al., 2007; Nakayama & De Mesquita Spinola, 2015). Plus précisément, la standardisation des pièces pour en faire des structures modulaires engendre plusieurs avantages tels que la simplification de la planification de la production, la réduction du nombre de mises en courses et l'utilisation de quantité économique à commander (Sheu & Wacker, 1997). L'utilisation de pièces standards diminue le risque d'erreur et ainsi de

devoir reprendre ou retravailler une pièce fabriquée (Nakayama & De Mesquita Spinola, 2015).

Pour mettre en production des produits modulaires, Abdul-Nour et al. (1998) ont proposé et testé une stratégie en entreprise. La stratégie visait à codifier et rendre disponible les dessins des pièces, créer une nomenclature sous forme de module et à planifier la production pour l'équipement selon le chemin critique des modules. L'entreprise a ensuite modifié sa stratégie de planification en CONWIP permettant ainsi de produire les modules qui sont le plus fréquemment utilisés à l'avance et les modules options sur demande.

2.3.2.2 Outils d'agilité à grande échelle

À la suite de la conception de produits modulaires, d'autres outils peuvent appuyer le changement de stratégie d'une entreprise vers la personnalisation de masse. Pour une entreprise qui transforme sa production de produits personnalisés sur mesure vers la production de masse personnalisée, la mise en inventaire de pièces ou de modules standards devient maintenant possible. Les outils tels que le Juste-À-Temps (JAT), le Lean, les entreprises virtuelles ou réseaux et l'aménagement de production deviennent alors des solutions possibles.

Certains auteurs utilisent la philosophie JAT pour augmenter l'agilité des entreprises réseau, aussi nommées entreprises distribuées (Abdul-Nour et al., 1999; Gunasekaran & Yusuf, 2002). Selon Brox and Fader (2002), le JAT comprend notamment les outils suivants : les entreprises spécialisées, les technologies de groupe, la réduction des temps de mise en course, la maintenance préventive, les travailleurs polyvalents, des temps de cycle stable, le balancement de ligne de production, la livraison des composantes en Juste-À-Temps et le concept de Kanban.

En plus du JAT et de la conception de structure modulaires, l'entreprise nécessite maintenant un aménagement approprié à sa nouvelle réalité de production de pièces en petits lots tout en demeurant flexible. La littérature propose d'implanter un aménagement flexible hautement personnalisable à la demande client (Leite & Braz, 2016) ou un aménagement cellulaire et une ligne d'assemblage mixte (Abdul-Nour et al., 1999) ou

encore des cellules dynamiques (Gamache et al., 2017; Gunasekaran & Yusuf, 2002). Le concept de cellules dynamiques est un aménagement de production adapté à la fabrication sur mesure dans un environnement turbulent (Rheault et al., 1996). Gamache et al. (2017) soulèvent que l'implantation de produits sous forme de structures modulaires facilite la mise en place de cellules dynamiques dans l'entreprise.

Aussi en lien avec la philosophie JAT et la conception modulaire, l'élaboration de partenariats avec d'autres entreprises peut être mis en place pour améliorer la compétitivité. Le concept d'entreprise virtuelle permet de développer des produits ou services en collaboration avec d'autres entreprises partenaires (Leite & Braz, 2016; Zhang, 2011). Cette collaboration permet d'élaborer de nouveaux produits en combinant les ressources des entreprises alors qu'une entreprise seule pourrait difficilement obtenir un résultat similaire (Bessant et al., 2000).

L'intégration avec les fournisseurs dans la chaîne d'approvisionnement (Nakayama & De Mesquita Spinola, 2015; Sriariyawat, 2019), les entreprises réseau (Abdul-Nour et al., 1999) ou entreprises distribuées (Gunasekaran & Yusuf, 2002) sont d'autres outils similaires au concept d'entreprises virtuelles ayant des objectifs communs.

2.3.2.3 Outils d'agilité à l'interne pour les procédés et processus

Tout en changeant sa philosophie à grande échelle, l'entreprise peut implanter d'autres outils à l'interne tels que les pratiques du Lean, les outils de l'amélioration continue et l'équilibrage naturel (Gamache et al., 2017).

L'agilité des ressources est un critère important pour atteindre la flexibilité de nouveaux produits, l'adaptation en cas de turbulences du marché et de variation de volume de production (Alavi, 2016).

L'agilité est la suite naturelle du concept du Lean selon Gunasekaran and Yusuf (2002). La philosophie Lean permet de détecter et d'éliminer les sources de gaspillages (Gamache et al., 2017; Gunasekaran & Yusuf, 2002). L'agilité doit permettre non seulement la flexibilité et de courts temps de réaction, mais aussi une réduction des coûts et une

amélioration de la qualité des produits (Gunasekaran & Yusuf, 2002). Les consommateurs désirent des produits personnalisés dans un court délai et à un tarif raisonnable en plus d'avoir la qualité attendue. C'est pourquoi le Lean comprenant l'élimination des gaspillages est une partie intégrante de l'agilité (Abdul-Nour et al., 1999). L'inverse n'est toutefois pas vrai (Narasimhan et al., 2006).

En plus d'une culture Lean, une philosophie d'amélioration continue est aussi à considérer. Les outils de l'amélioration continue tels que le SMED, le 5S et le Kaizen en font partie et permettent d'augmenter la performance des entreprises (Gamache et al., 2017). Les entreprises québécoises doivent mettre en place une stratégie et une méthode de gestion basée sur l'innovation et l'amélioration continue (Gamache et al., 2017) (Abdul-Nour et al., 1999).

2.3.2.4 Technologies et agilité

L'accumulation de technologies est une stratégie qui n'est pas suffisante pour devenir agile (Bessant et al., 2000; Gunasekaran & Yusuf, 2002). De plus, l'adoption de nouvelles technologies peut dans certains cas faire l'effet contraire, soit rendre l'entreprise plus rigide (Bessant et al., 2000).

L'objectif est d'avoir des technologies permettant d'être flexibles aux changements de produits, aux changements de production tout en facilitant la conception pour rendre le tout plus efficace. La création de partenariat avec des centres de technologies ou des experts ressortent d'autres pratiques pour améliorer l'agilité des entreprises (Leite & Braz, 2016).

Les technologies sont des outils qui sont peu utilisés par les PME puisqu'elles sont dispendieuses (Sriariyawat, 2019). Lorsqu'elles sont achetées et mises en place, plusieurs technologies sont utilisées à une fraction de leur capacité (Bessant et al., 2000). L'ajout de technologies doit aussi être jumelé à une augmentation des compétences des travailleurs, du savoir-faire, des processus et des partenariats développés afin d'avancer vers l'agilité (Burgess, 1994). Les technologies doivent aussi être jointes à une stratégie adéquate, une culture d'entreprise et d'autres outils (Gunasekaran & Yusuf, 2002).

2.4 PME

La recherche présentée cible les petites et moyennes entreprises manufacturières. Il est essentiel de cibler et définir la PME puisqu'une entreprise de très petite taille ou de grande taille n'a pas les mêmes ressources humaines, financières et techniques pour réaliser l'implantation de projets. La taille et le secteur des PME auxquelles s'adresse cette recherche doivent être bien cadrés afin que les conclusions puissent s'appliquer à l'entièreté de la population des entreprises ciblée.

Au Canada, il n'y a pas de définition normalisée des PME. Lors d'enquête au Canada, la définition utilisée pour les PME regroupe les entreprises ayant moins de 500 employés et ayant un chiffre d'affaires inférieur à 50 millions de dollars canadiens (Organisation de coopération et de développement économiques, 2004).

La littérature définit la PME principalement selon les critères du nombre de travailleurs et du chiffre d'affaires (Rauch et al., 2019). Les auteurs définissent la PME comme étant une entreprise ayant moins de 250 travailleurs (Sopadang et al., 2020; Türkeş et al., 2019). Plusieurs auteurs classent les PME sous trois groupes : microentreprises (0 à 9 employés), petites entreprises (10 à 49 employés), moyennes entreprises (50 à 249 employés) (Organisation de coopération et de développement économiques, 2004); Pech and Vrchoťa (2020); (Türkeş et al., 2019).

La définition des PME utilisée pour cette recherche correspond aux entreprises de 10 à 249 employés ayant un chiffre d'affaires annuel inférieur à 50 millions de dollars provenant d'organisations de coopérations et de développement économique (2004). Ce mémoire s'adresse aux entreprises manufacturières dans la province du Québec au Canada. La limite de la région est appliquée puisque la productivité des entreprises du Québec est différente de celles des autres provinces du Canada. L'étude se limite au secteur manufacturier puisque les entreprises d'autres secteurs pourraient avoir des limites différentes et ainsi s'intéresser à d'autres technologies ou d'autres outils plus rapidement.

2.5 Industrie 4.0 dans les PME

2.5.1 Situation actuelle des PME par rapport à l'implantation de l'Industrie 4.0

Une différence marquante dans le niveau d'implantation de l'Industrie 4.0 est présente entre les grandes entreprises et les PME (Woods et al., 2022). Les grandes entreprises ont une opportunité de gain plus intéressante à implanter les technologies que les PME. Cette opportunité pousse les grandes entreprises à mettre de l'avant les concepts de l'Industrie 4.0 plus rapidement (Pech & Vrchota, 2020).

Les PME ont de la difficulté à mettre de l'avant les concepts de l'Industrie 4.0, mais elles sont de plus en plus prêtes à ce changement (Moeuf et al., 2018; Stentoft et al., 2021). Les entreprises de la Suède (Li et al., 2018), de la France (Chengula et al., 2018), et de l'Allemagne (Bittighofer et al., 2018; Sommer, 2015) mettent en place les éléments nécessaires pour accueillir ce changement.

Les PME du monde entier ont entrepris l'implantation des technologies modernes dans leur processus de production (Sahi et al., 2020). Au niveau du Québec, les PME manufacturières tardent à commencer leur transformation (Gamache et al., 2017). Les PME ont commencé à adopter certains concepts de l'Industrie 4.0 principalement pour le suivi des procédés de production et pour l'amélioration de la capacité de production (Moeuf et al., 2018).

Selon le (STIQ, 2020), seulement 39 % des PME manufacturières québécoises connaissent le concept d'Industrie 4.0. Parmi ces 39 % d'entreprises, 52 % d'entre elles croient que les effets de l'Industrie 4.0 seront faibles pour les 3 prochaines années, soit jusqu'en 2023. 12 % des PME manufacturières du Québec ont obtenu les résultats de leur audit Industrie 4.0. Cet audit leur fournit une démarche d'implantation claire pour démarrer le changement. Cependant, 74 % des PME du secteur manufacturier visent à augmenter leur utilisation des technologies d'ici trois années, soit en 2023 et 26 % des PME manufacturières du Québec forment leurs travailleurs afin qu'ils développent des compétences numériques.

Ces deux signes positifs démontrent un fort intérêt pour l'implantation des nouvelles technologies. 48 % des PME du secteur manufacturier québécois ont implanté une technologie ou moins (STIQ, 2020) amenant à penser que les entreprises ont de la difficulté à implanter ces nouvelles technologies. L'implantation de l'Industrie 4.0 au Québec chez les PME manufacturières est encore à son début.

2.5.2 Bénéfices de l'implantation de l'Industrie 4.0

Plusieurs auteurs mentionnent que les entreprises peuvent s'attendre à un impact positif sur les coûts, la qualité, les délais et la flexibilité de production (Garay-Rondero et al., 2019; Szász et al., 2020). D'autres auteurs mentionnent seulement un impact sur la vitesse de production, la flexibilité et la productivité (Lee et al., 2015; Rübmann et al., 2015). Bouchard et al. (2022) ont démontré que l'implantation de leur stratégie amenait une réduction du nombre de pièces de 70 %, des temps d'assemblage, des niveaux d'inventaires et du temps de réaction. Par la mise en place d'une stratégie similaire, Abdunour et al. (2022) ont obtenu une réduction du temps de fabrication et une augmentation du nombre de produits fabriqués. L'étude démontre une augmentation de 20 % du nombre de produits fabriqués par l'implantation de pratiques Lean et une augmentation totale de 36,6 % en implantant Lean et Industrie 4.0.

L'augmentation de la flexibilité est l'objectif le plus souvent visé dans les recherches alors que cet élément permet aux PME de se différencier des autres entreprises (Moeuf et al., 2018).

Peu de recherches démontrent une réduction des coûts ou des délais à la suite de l'implantation de l'Industrie 4.0 par rapport au nombre d'études démontrant une augmentation de la flexibilité. Un manque à gagner au niveau de la littérature est à combler au niveau de la réduction des coûts et des délais (Moeuf et al., 2018). La conclusion de la recherche de Szász stipule que l'effet sur la réduction des coûts est moins important que ceux des autres bénéfices. Selon l'auteur, cette conclusion laisse croire que la réduction des coûts n'est pas l'objectif principal de l'Industrie 4.0 (Szász et al., 2020).

Réduire les coûts de la personnalisation des produits, augmenter la flexibilité, améliorer le contrôle de la qualité et diminuer les délais de livraison par rapport aux produits de masse pousse les PME à considérer sérieusement l'Industrie 4.0 dans leurs prochaines actions à mettre en place (Torn & Vaneker, 2019).

Seules quelques recherches avec des cas empiriques discutent de modèles conceptuels pour l'implantation de l'Industrie 4.0 pour les PME. Les recherches sont clairement insuffisantes pour démontrer les bénéfices de l'Industrie 4.0 (Buer et al., 2018; Moeuf et al., 2018). À la suite de la lecture des articles de la revue de la littérature, peu d'auteurs ne présentent des données quantitatives sur l'amélioration de la performance des PME à la suite de l'implantation de l'Industrie 4.0. Plusieurs auteurs mentionnent cette avenue intéressante sans qu'elle soit encore pleinement adressée (Buer et al., 2018; Frank et al., 2019).

2.5.3 Facteurs de succès de l'implantation de l'Industrie 4.0

Trois facteurs clés semblent être au cœur d'une implantation de l'Industrie 4.0 réussie (Arcidiacono et al., 2019) :

- Une approche d'innovation proactive.
- Un développement de partenariat à long terme avec les fournisseurs de technologie.
- L'implication des travailleurs dans le changement dès le départ.

Le personnel est au cœur du changement de culture d'entreprise et est au cœur d'une transition Industrie 4.0 (Arcidiacono et al., 2019). La quantité de personnel et les compétences suffisantes des ressources humaines sont un élément clé pour les PME ayant un degré d'implantation de l'Industrie 4.0 plus avancé (Pech & Vrchota, 2020). Avec les bonnes ressources bien formées, il est possible de bien maîtriser et de bien intégrer les technologies entre elles afin d'exploiter leur potentiel.

Un changement de culture et les changements organisationnels sont des éléments incontournables à une implantation de l'Industrie 4.0 avec succès (Mofolasayo et al., 2022).

La stratégie numérique est aussi facteur de succès (Türkeş et al., 2019). C'est l'élément sur lequel la structure des projets de l'Industrie 4.0 est appuyée. Elle est essentielle au bon déroulement de ce changement.

2.5.4 Limites de l'implantation de l'Industrie 4.0 pour les PME

La majorité des chercheurs s'entendent sur les principales limites des PME face à l'implantation de l'Industrie 4.0. Le manque de ressources financières et le manque d'expertise ou de connaissances à l'interne au niveau de l'Industrie 4.0 sont les deux limites mentionnées par la grande majorité des auteurs (Gamache et al., 2020; Türkeş et al., 2019). Pour les PME manufacturières du Québec, la limite financière semble la moins importante puisque seulement 38 % des entreprises rencontrent cette limite (STIQ, 2020). La littérature présente un troisième élément limitant les PME, soit la quantité de ressources humaines disponibles pour implanter les technologies et autres outils (Moeuf et al., 2018; Türkeş et al., 2019). Avec le manque de ressources financières et le manque d'expertise, ces trois limites regroupent les principales conditions de l'Industrie 4.0 dans la PME.

Parmi les éléments susmentionnés, deux d'entre eux sont aussi les plus importants chez les PME manufacturières du Québec. Le manque de temps et le manque de personnel qualifié touchent respectivement 72 % et 63 % des PME québécoises, soit les limites ayant le plus haut nombre d'entreprises touchées (STIQ, 2020).

D'autres limites mentionnées moins fréquemment se retrouvent dans la littérature telles que le manque de stratégie et de l'importance associée à cette dernière (Huang et al., 2019; Türkeş et al., 2019), le manque de standards, la concentration sur les opérations aux dépens du développement de la compagnie (Türkeş et al., 2019), le manque de culture ainsi que le manque de spécialistes en implantation (Emmer et al., 2017).

Pour les PME manufacturières du Québec, le manque de connaissance sur ce qui est pertinent pour l'entreprise en matière de technologie numérique et la difficulté à évaluer le retour sur investissement sont deux autres limites atteignant respectivement 50 % et 45 % des entreprises (STIQ, 2020).

Malgré les éléments soulevés par la littérature, aucune étude en entreprise ne confirme ces limites pour la PME québécoise.

2.5.5 Préalables à l'Industrie 4.0 pour les PME

Les préalables ont pour but d'assister les PME en facilitant l'implantation de l'Industrie 4.0 par l'amélioration de l'efficacité et la productivité de chacun des départements (Mittal et al., 2019). Plusieurs entreprises n'ont pas la compréhension des préalables tels que l'utilisation des données déjà présentes dans l'entreprise et la présence d'un alignement de l'entreprise vers l'Industrie 4.0 (Mittal et al., 2019).

Plusieurs PME utilisent encore de vieux équipements de fabrication, n'ont pas d'ordinateurs ou d'Internet, utilisent en grande partie le travail humain et n'ont pas la vision permettant d'adopter de nouvelles technologies (Müller et al., 2018). C'est en partie pour ces raisons qu'un niveau de maturité à 0 doit être considéré pour les modèles de maturité numérique. Cette transition de niveau 0 au niveau 1 peut inclure un changement de culture important puisque la transition vers l'Industrie 4.0 requiert de nouvelles technologies, une capacité d'apprentissage et une culture d'organisation en conséquence (Mittal, Muztoba, et al., 2018)

Les premiers éléments à mettre en place pour préparer les PME manufacturières à l'Industrie 4.0 sont les pratiques Lean ainsi que des outils augmentant l'agilité. Ces éléments ont un faible coût et nécessitent peu de connaissances technologiques. Ce sont des éléments pouvant facilement être mis en place par les PME en plus d'obtenir des gains de productivité intéressants lors de l'implantation (Abdulnour et al., 2022; Bouchard et al., 2022).

D'autres préalables consistent à avoir accès en temps réel aux données de production ainsi qu'à une connexion Internet haut débit. La définition d'une stratégie facilite le processus de prise de décision augmentant les chances de succès de l'implantation de l'Industrie 4.0. Il est suggéré de former les travailleurs afin d'acquérir les connaissances et l'expertise nécessaire à l'implantation des technologies futures (Charbonneau Genest & Gamache, 2020).

Enfin, comme pour plusieurs projets d'amélioration, l'engagement des acteurs dans le projet dès le départ est d'une importance cruciale (Črešnar et al., 2020). La définition d'une mission et d'une vision supporte l'implantation de l'Industrie 4.0 (Črešnar et al., 2020). Selon Beaudoin (2016), la première étape pour entreprendre une transition vers l'Industrie 4.0 est la définition d'une stratégie.

Pour les pratiques Lean, elles doivent être considérées autant que les nouveaux outils de l'Industrie 4.0 puisque l'élimination des gaspillages apportée par le Lean est tout aussi importante que l'interconnectivité. Ces deux cultures d'amélioration doivent être considérées comme un tout unique pour viser l'excellence opérationnelle (Moeuf et al., 2018). Le Lean comme l'Industrie 4.0 permettent d'augmenter la compétitivité des entreprises.

Ainsi, on retrouve les préalables principaux dans la littérature : l'utilisation des données présentes dans l'entreprise, la présence d'une vision et d'un alignement stratégiques, la présence du Lean, le changement de culture et l'implantation d'outils de l'agilité. Avec une vue des préalables les plus importants en main, il est maintenant possible de prioriser et mieux définir un ordre d'implantation.

2.5.6 Technologies 4.0 dans les PME

Les PME nécessitent des solutions adaptées à leur réalité. Les PME nécessitent des outils nécessitant peu d'investissement, peu d'effort ainsi que des solutions simples (Torn & Vaneker, 2019).

À la suite de la présentation de la matrice des outils présentée au Tableau 2.4, certaines des technologies les plus dispendieuses se retrouvent moins fréquemment dans la littérature telles que l'intelligence artificielle, la connectivité entre les machines et la réalité virtuelle. L'intelligence artificielle se retrouve au bas de la liste des technologies les plus importantes selon les gestionnaires du sondage de Türkeş et al. (2019) appuyant ainsi les résultats de la matrice des technologies. Les technologies de communication entre les machines (M2M) ainsi que les cobots sont moins utilisés auprès des PME puisqu'elles sont des technologies dispendieuses ayant un retour sur investissement à long terme tel que mentionné par Moeuf et al. (2018). Avec le temps, ces solutions deviendront plus abordables, les rendant ainsi plus intéressantes pour les PME. Mittal et al. (2019) soulèvent que les robots et les technologies visuelles telles que la réalité virtuelle et la réalité augmentée sont aussi au bas de la liste des technologies pour les PME.

Les technologies à implanter en PME se retrouvent au haut du Tableau 2.4 soit, la collecte de données en temps réel, l'analyse des données, l'infonuagique et le partage des données, les systèmes cyberphysiques, les logiciels ERP/MES, les cobots ainsi que l'identification et le suivi des pièces.

Pour les autres outils, les éléments les plus fréquents parmi la littérature sont l'opérateur 4.0, le changement de culture, la stratégie 4.0 ou le plan d'action numérique, les ressources humaines techniques, le Lean et l'amélioration continue, l'intégration horizontale et verticale, l'agilité de production ainsi qu'une conception modulaire des produits.

Aucune approche unique pour toutes les entreprises manufacturières n'est présentée puisque plusieurs facteurs de l'entreprise doivent être considérés. La taille de l'entreprise, la situation financière de l'entreprise et les politiques internes liées au changement sont à considérer pour choisir les technologies et outils à mettre en place (Mofolasayo et al., 2022). Une approche par étape peut être considérée dans le but de mettre en place la fondation de l'Industrie 4.0.

2.5.7 Stratégie d'implantation de l'Industrie 4.0 dans les PME

À la suite de la liste d'éléments à implanter pour orienter la PME manufacturière vers l'Industrie 4.0, l'ordre d'implantation et la stratégie d'implantation doivent être définis avant d'entamer la mise en place des technologies.

Sufian et al. (2021) présentent une stratégie d'implantation composée de six étapes : la stratégie, la connectivité, l'intégration, l'analyse des données, l'intelligence artificielle et la croissance. Chacune de ces étapes est liée à des technologies appropriées pour l'implantation.

Une autre stratégie d'implantation de l'Industrie 4.0 adaptée à la PME suggère cinq conditions favorisant la mise en place de technologies (Ghobakhloo et al., 2022). La stratégie consiste principalement à mettre en place les conditions gagnantes pour l'implantation de l'Industrie 4.0 et décrit les étapes nécessaires pour obtenir chacune des cinq conditions. Les cinq conditions sont : les connaissances et compétences, le « readiness » et la maturité technologique interne, le « readiness » de la chaîne de valeur, les compétences de gestions internes ainsi que le support externe à la transformation vers l'Industrie 4.0. La stratégie d'implantation est conçue ainsi étant donné que les PME ont de la difficulté à prendre les premières décisions pour adopter l'Industrie 4.0. La mise en place de cette stratégie favorise l'initiation de la transition vers l'Industrie 4.0 par l'implantation de technologies simples tout en assurant le succès de leur implantation. L'entreprise peut ensuite capitaliser sur ces succès et utiliser les bénéfices pour aller plus loin dans l'implantation de l'Industrie 4.0.

Gamache (2019) présente une stratégie et une liste de recommandations pour les PME manufacturières du Québec plus adaptées au contexte de personnalisation de masse. L'auteur propose une base commune pour les PME manufacturières, soit des pratiques minimales à mettre en place, pour évoluer vers l'Industrie 4.0 (Gamache, 2019). Le Tableau 2.7 présente les outils à mettre en place, classés par priorité et par dimension.

Tableau 2.7: Recommandations selon les trois premiers niveaux de priorité adapté de Gamache (2019)

Priorité	Dimension	Pratique d'affaires
Essentiel	Leadership	Développer une vision et une stratégie numérique
		Démontrer un engagement et une exemplarité
	Gestion des technologies	Développer et clarifier l'écosystème et l'architecture numérique
		Maîtriser les outils numériques (ERP, MES, IoT)
		Automatiser les processus
	Gestion de la donnée	Assurer la qualité de la donnée
Expérience client	Bénéficier des avantages du commerce électronique	
Prioritaire	Culture et organisation	Améliorer la gestion du changement
		Encourager l'agilité et l'innovation
		Mettre en œuvre le Lean et l'amélioration continue
	Gestion des technologies	Assurer la Cybersécurité
	Gestion de la donnée	Optimiser la livraison de la donnée
	Expérience client	Mettre en place la personnalisation de masse
Non prioritaire	Leadership	Développer de nouveaux modèles d'affaires
		Déployer des ressources et investissements
	Culture et organisation	Déployer des ressources et investissements
		Optimiser l'acquisition et le développement des compétences
		Maximiser la communication à l'interne
	Gestion de la donnée	Améliorer le système de collecte de données
Expérience client	Assurer la fidélisation des clients	

L'auteur propose la méthodologie suivante composée de six étapes pour implanter l'Industrie 4.0 dans les PME manufacturières québécoises (Gamache, 2019).

1. Étape préliminaire

- a. Développer une vision et une planification stratégique dans l'entreprise
- b. Cartographier la chaîne de valeur pour assurer le contrôle des processus

2. Étape Audit
 - a. Répondre au questionnaire proposé selon l'échelle de Likert pour chaque processus d'affaires.
3. Étape Planifier
 - a. À partir des résultats du questionnaire, identifier les sources d'amélioration et prioriser les projets dans un plan numérique en fonction des niveaux de priorités et des recommandations liées aux pratiques d'affaires du Tableau 2.7.
4. Étape Tester
 - a. Mettre en place les recommandations numériques et non numériques, au départ dans les processus d'affaires jugés prioritaires et optimiser avant le déploiement.
5. Étape déployer
 - a. Déployer les solutions numériques et non numériques dans l'ensemble des processus d'affaires.
6. Étape optimiser
 - a. Corriger, optimiser et mettre en œuvre le prochain projet sur la liste.

Ces trois stratégies d'implantation s'adressent toutes aux PME. Cependant, l'orientation de chacune des stratégies présentées diffère. L'orientation de l'entreprise et le niveau de « readiness » de l'entreprise peut amener une entreprise à choisir l'une ou l'autre de ces stratégies d'implantation.

2.6 Agilité dans les PME

2.6.1 Facteurs de succès et freins de l'agilité

Pour ce qui est des freins de l'implantation de l'agilité, la littérature mentionne certains éléments qui peuvent retarder ou diminuer les chances de succès de l'implantation de ces outils.

Les petites entreprises familiales conservent généralement leur pouvoir de décision dans un faible nombre de dirigeants, centralisant ainsi toutes les décisions vers les propriétaires. On observe généralement une perception différente entre les propriétaires actuels et les héritiers causant ainsi de multiples problèmes. Les futurs gestionnaires n'ont pas le pouvoir de décision et ont ainsi de la difficulté à changer les processus internes de l'entreprise vu la résistance des propriétaires actuels (Sriariyawat, 2019).

Pour les facteurs de succès, la littérature mentionne aussi plusieurs éléments à prendre en compte. L'entreprise doit mettre en place une culture d'entreprise propice à l'agilité (Bessant et al., 2000; Zhang, 2011). Cette culture doit favoriser l'adaptation au changement, l'amélioration continue ainsi que l'apprentissage en continu (Sriariyawat, 2019). L'entreprise doit avoir des gestionnaires et propriétaires enthousiastes à l'idée d'implanter une telle philosophie et présenter leur support tout au long de l'implantation (Gunasekaran & Yusuf, 2002; Sriariyawat, 2019).

En plus d'offrir son support, la direction doit établir une stratégie qui dirigera les efforts concentrant les compétences, le savoir-faire, les processus et les alliances avec les partenaires vers une seule et unique direction (Bessant et al., 2000). La stratégie demande des travailleurs efficaces et impliqués à tous les niveaux pour l'implantation de l'agilité dans les PME (Sriariyawat, 2019).

L'enjeu de l'implantation d'une philosophie agile demeure dans les nouvelles méthodes utilisées par l'organisation et l'équipe de gestion. Comme pour la philosophie Lean et JAT, l'implantation de nouvelles technologies n'est pas la clé. C'est un changement des façons de voir les choses ou de faire les choses au point de vue organisationnel en utilisant de nouveaux outils (Bessant et al., 2000).

2.7 Stratégie d'implantation combinant agilité, modularité et Industrie 4.0 dans les PME

Dans leur recherche, Bouchard et al. (2022) ont implanté la conception modulaire des produits. En parallèle, les chercheurs ont adapté la codification de leurs produits et pièces,

implanté un nouveau progiciel de gestion intégré (ERP), mis en place une méthode de gestion de l'inventaire par Kanban et implanté des cellules dynamiques. En plus, la recherche a orienté l'entreprise vers le commerce en ligne pour la vente de pièces de rechange amenant ainsi l'entreprise vers l'Industrie 4.0. L'entreprise était prête à l'implantation de ces éléments et a eu un temps important avant de confirmer sa réorientation stratégique.

Dans une autre recherche, Abdunour et al. (2022) ont cherché à implanter l'Industrie 4.0 en commençant par intégrer l'agilité et les principes Lean. Dans leur étude, les auteurs ont commencé par la mise en place de méthodes de travail standards, une matrice des compétences, une réduction des temps de mises en course, l'amélioration du goulot, l'implantation de pratiques 5S et l'utilisation de chariots de transport pour les pièces. À la suite de ces interventions Lean, les auteurs ont orienté l'entreprise vers les outils de la personnalisation de masse tels que la conception de produits modulaires, l'implantation de cellules dynamiques et l'automatisation de la production étape par étape.

2.8 Matrice de la revue de littérature

À la suite de la revue de littérature, les principaux éléments des articles en lien avec la recherche ont été résumés sous la forme d'une matrice. Seuls les auteurs les plus pertinents par rapport aux technologies adaptables à la PME ou à l'agilité des PME se retrouvent dans les grilles. La matrice de la revue de la littérature sur l'Industrie 4.0 s'inscrit dans le Tableau ANNEXE 1.1 présenté à l'ANNEXE 1- MATRICE DE LA REVUE DE LITTÉRATURE DE L'INDUSTRIE 4.0 afin d'alléger le chapitre. La matrice de la revue de la littérature sur l'agilité s'inscrit dans le Tableau ANNEXE 2.1 présenté à ANNEXE 2- MATRICE DE LA REVUE DE LITTÉRATURE DE L'AGILITÉ pour la même raison. Les variables indépendantes ne sont pas présentées dans la matrice puisqu'elles ont été présentées dans le Tableau 2.6 et le Tableau 2.4.

2.9 Conclusion de la revue de littérature

La revue de la littérature démontre que la situation actuelle des PME du Québec n'est pas très avancée au niveau de l'implantation de l'Industrie 4.0. Ces PME sont principalement limitées par le manque d'expertise et de ressources humaines.

Les premières études sur les préalables pour la PME manufacturière québécoise sont publiées. La revue de littérature présente plusieurs technologies et outils applicables à la PME ainsi que certaines études priorisant ces technologies. L'agilité et le Lean sont des préalables à l'Industrie 4.0 et doivent être implantés ensemble puisque ces outils ont un objectif commun avec l'Industrie 4.0, soit d'augmenter la compétitivité.

Des études de cas sont encore nécessaires pour démontrer empiriquement les bénéfices réels de l'Industrie 4.0 pour la PME (Moeuf et al., 2018). Bien que les bénéfices ne soient pas quantifiés, cette transformation place la PME avançant vers ce changement en bonne position pour survivre dans un environnement de mondialisation (Türkeş et al., 2019).

Le cadre conceptuel présenté dans la section méthodologie de la recherche regroupe les éléments les plus pertinents présentés dans les grilles et se base sur la revue de la littérature.

CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE DE LA RECHERCHE

La revue de la littérature soulève les pratiques importantes de l'agilité, de la conception modulaire et de l'Industrie 4.0 pour la PME. Les concepts choisis dans la revue de la littérature pour cette recherche sont mis en relation dans le cadre conceptuel. Le chapitre présente ainsi la stratégie d'implantation utilisée pour la recherche ainsi que la justification du choix de la méthodologie.

3.1 Cadre conceptuel

L'augmentation de la fréquence des perturbations, les besoins clients de plus en plus personnalisés et le retard de compétitivité des PME du Québec amènent un lot de défis. Pour être en mesure de concurrencer dans ces conditions, les PME nécessitent de revoir leurs outils et leurs méthodes de travail.

L'évolution de la concurrence et les perturbations actuelles nécessitent que les PME réagissent rapidement en devenant plus agiles. Les PME doivent utiliser les outils de la personnalisation de masse pour répondre aux demandes client de plus en plus personnalisées tout en produisant à un coût compétitif. Les entreprises de la compétition, maintenant mondiale, misent sur les technologies qui sont de plus en plus accessibles afin d'accroître leurs performances.

L'agilité et la conception modulaire agissent comme des catalyseurs à l'implantation de l'Industrie 4.0. La mise en place de l'Industrie 4.0 est accélérée à la suite de l'implantation de l'agilité et de la conception modulaire d'abord. L'implantation de l'Industrie 4.0 en parallèle à l'agilité et la conception modulaire est possible. L'objectif de l'Industrie 4.0 est de répondre à la personnalisation de masse augmentant du même fait l'agilité. La conception modulaire peut aussi s'agencer dans une stratégie de l'Industrie 4.0 répondant elle aussi à la personnalisation de masse.

L'agilité et la conception modulaire sont des concepts fortement reliés puisque plusieurs éléments de l'agilité deviennent possibles à la suite de la conception modulaire de même que l'implantation de la conception modulaire est simplifiée à la suite de l'implantation de l'agilité. L'interrelation de ces trois concepts étant forte, une stratégie les combinant facilitera la mise en place de l'Industrie 4.0 amenant ainsi l'entreprise à transitionner vers la personnalisation de masse.

Le cadre conceptuel présenté à la Figure 3.1 permet de visualiser les différents concepts liés au contexte actuel des PME manufacturières du Québec.

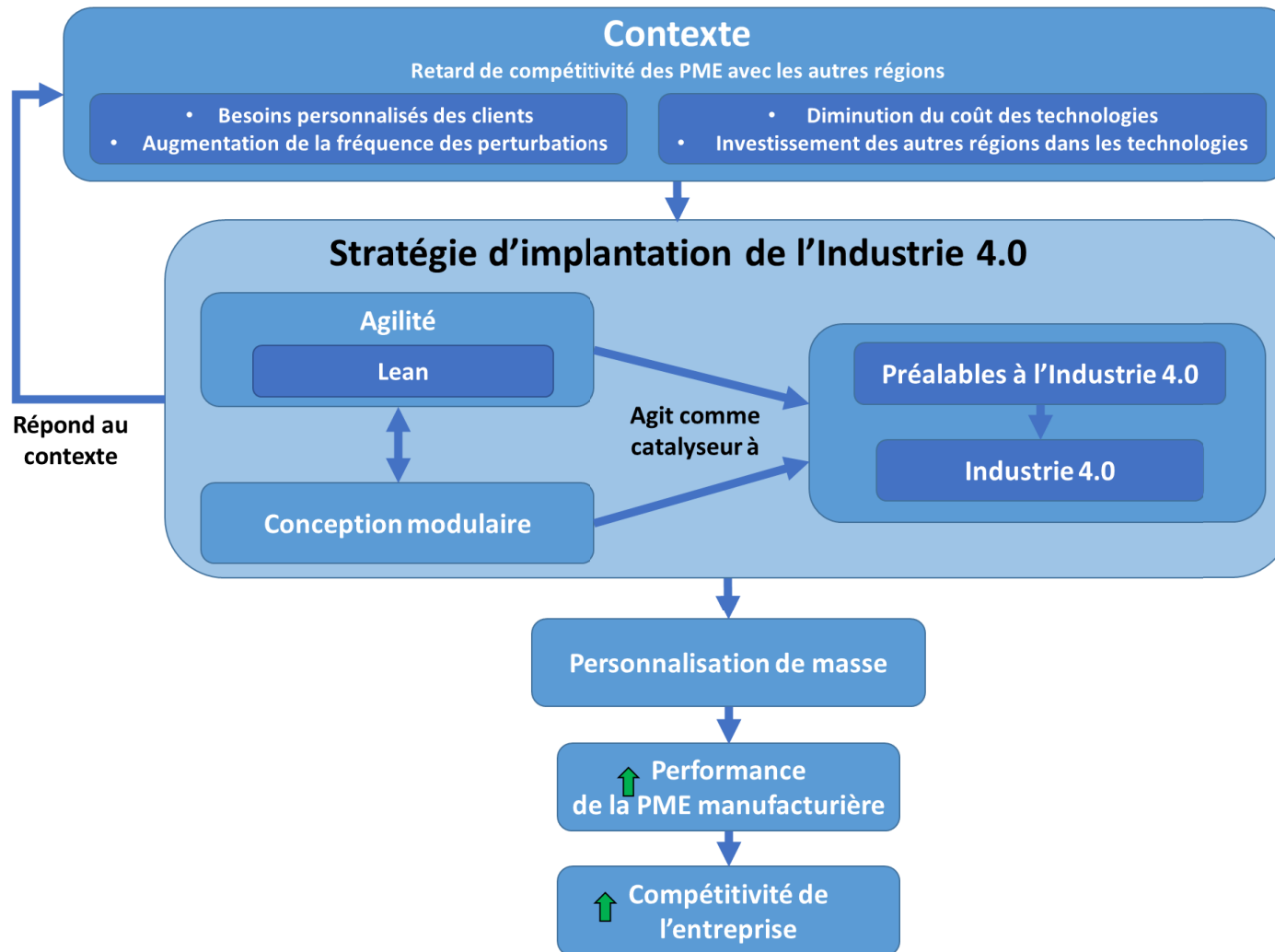


Figure 3.1: Cadre conceptuel pour l'amélioration des performances d'une PME manufacturière en réorientation vers la personnalisation de masse dans le contexte de l'Industrie 4.0

3.2 Hypothèse de recherche

L'hypothèse principale de cette recherche est que la mise en place d'une stratégie de l'Industrie 4.0 reposant sur la conception de produits modulaires et des outils augmentant l'agilité aide au succès de la transition vers la production de masse personnalisée des PME.

3.3 Méthodologie et stratégie d'implantation

La revue de la littérature soulève les technologies et outils importants pour les PME en lien avec l'agilité, la personnalisation de masse et l'Industrie 4.0. Cependant, ce ne sont pas toutes ces solutions qui doivent être implantées par les PME dès le virage vers l'Industrie 4.0. L'entreprise doit être prête afin de réduire le risque d'échec de l'implantation de ces technologies et choisir les solutions à mettre en place selon le contexte.

3.3.1 Présentation de la stratégie d'implantation de l'Industrie 4.0

Le choix des étapes d'implantation et des technologies implantées prend en compte le Tableau 2.6 et le Tableau 2.4 des fréquences par outil ainsi que les limites de l'entreprise étudiée dans la méthodologie. La stratégie prend en compte l'opinion des différents auteurs sur le sujet de certaines technologies hors de portée des PME.

La stratégie d'implantation utilise les six étapes de la démarche proposée par Gamache (2019) présentée dans la revue de la littérature pour implanter les technologies. La stratégie proposée a été adaptée afin de prendre en compte les préalables, les limites de l'entreprise étudiée ainsi que l'agilité et la conception des produits modulaires. Les six étapes adaptées dans la méthode de Gamache (2019) ont pour but d'implanter les technologies et les outils de l'Industrie 4.0, soit : l'étape d'audit, l'étape de planification, l'étape de test, l'étape de déploiement et l'étape d'optimisation.

La stratégie d'implantation utilisée dans cette recherche vise à amener l'entreprise vers une production de masse personnalisée dans le contexte de l'Industrie 4.0. La stratégie a été développée en utilisant le modèle proposé par Gamache (2019) et est présentée dans la Figure 3.2. La stratégie est expliquée dans les paragraphes suivants.



Figure 3.2: Présentation de la stratégie d'implantation adapté de (Gamache, 2019)

Plusieurs PME ne sont pas prêtes à l'implantation de l'Industrie 4.0. La revue de la littérature mentionne qu'il est nécessaire de vérifier en premier que les préalables soient bien en place avant de se diriger vers des technologies. La revue de la littérature soulève que les éléments préalables à l'implantation de technologies de l'Industrie 4.0 sont : les pratiques du Lean, les pratiques d'affaires augmentant l'agilité, l'accès aux données en temps réel, l'utilisation des données présentes en entreprise, la présence d'une stratégie, la connexion Internet à haut débit, les connaissances et l'expertise.

Afin d'adapter la stratégie à la réalité des PME, la stratégie proposée débute l'étape « préliminaire » et l'étape « audit » pendant l'implantation des préalables à l'Industrie 4.0, la conception modulaire des produits ainsi que de la mise en place des premiers éléments de l'agilité. Ces outils formeront une base solide pour atteindre la personnalisation de masse. L'entreprise amorcera ensuite sa transformation numérique avec les étapes 3 à 6 pour implanter les différentes technologies sous forme de projets afin de poursuivre vers la personnalisation de masse.

La stratégie propose de débiter avec la mise en place d'un processus de création de produits, la conception de structures modulaires et l'implantation des pratiques Lean telles

que l'élimination des gaspillages. Le processus de développement de produit doit prendre plusieurs éléments en compte pour arriver à des produits modulaires compétitifs. En parallèle, l'entreprise doit clarifier sa vision et sa stratégie, commencer à utiliser les données déjà présentes et s'orienter vers les techniques Lean et l'agilité.

Une fois la base stabilisée avec la création de produits modulaires et d'autres outils sélectionnés, l'agilité de production, le Lean tout comme les technologies de l'Industrie 4.0 doivent être implantés en continu et en parallèle. Cependant, un certain niveau d'implantation d'agilité et de Lean augmente les chances de réussite de l'implantation des technologies est à prendre en compte. L'élimination des gaspillages, une culture d'entreprise proactive, les outils du JAT tels que les Kanban, la mise en production de petits lots de pièces sont des éléments augmentant l'agilité des entreprises. Ces éléments aident à implanter les technologies de l'Industrie 4.0.

Dans une deuxième phase après l'implantation d'une base stable bien établie et des produits modulaires créés, un aménagement d'assemblage des modules standards sous forme d'aménagement flexible ou de cellule dynamique peut permettre l'assemblage en parallèle des modules. L'entreprise doit effectuer ce changement tout en favorisant la polyvalence des travailleurs.

Dans une troisième phase, ces modules assemblés peuvent ensuite être combinés à la plateforme de l'équipement sur une chaîne de montage mixte avec le concept d'équilibrage naturel. Une fois standards, certains modules peuvent aussi être fabriqués à l'externe en développant des partenariats avec des fournisseurs. L'entreprise se dirige alors vers le concept d'entreprise réseau. L'ensemble de ces solutions permet de réduire le temps de réaction pour répondre au client et ainsi augmenter la performance de la PME.

En parallèle à l'implantation d'une conception de produits modulaires et à des outils d'agilité, les technologies de base peuvent être implantées. Parmi ces technologies, la stratégie présente l'entreposage infonuagique des données, l'implantation ou l'adaptation d'un ERP et d'un MES, l'implantation d'indicateurs de performance et l'ajout d'interface humain/machine sur les équipements en misant sur la formation des travailleurs en lien

avec les technologies, l'analyse des données et le changement de culture. Ces étapes sont des éléments accessibles à la PME qui doivent être implantées en utilisant les étapes « Planifier », « Tester », « Déployer » et « Optimiser ». Les indicateurs de performance implantés peuvent comprendre les composantes du taux de rendement global, soit le taux d'efficacité, le taux de disponibilité et le taux de qualité analysés sous forme d'une cartographie de la chaîne de valeur telle que suggérée dans certaines publications (Mofolasayo et al., 2022; Müller, 2019). Il sera alors possible de cibler le poste goulot avec ces outils et d'améliorer une des composantes du taux de rendement global le plus faible avec les outils du Lean. L'effet de ces pratiques et des solutions suivantes peut être simulé afin d'orienter l'entreprise vers les étapes à mettre en place en premier.

La mise en place d'une stratégie itérative afin de déterminer les prochaines technologies à implanter est privilégiée à la suite de l'implantation des technologies de base dans cette stratégie. L'idée est de mettre l'accent sur les pertes de temps et les problèmes afin de cibler les technologies à implanter.

Les solutions présentes prennent en considération les différentes limites de la taille d'entreprise telle que définie comme une PME dans la revue de la littérature. Les technologies prennent aussi en compte que l'entreprise est au niveau 0 de maturité numérique et nécessite de mettre en place une fondation avant d'aller vers l'implantation de technologies plus importantes. D'autres technologies sont accessibles à la PME. Les outils sélectionnés sont considérés comme étant les étapes à implanter en premier pour la PME ciblée dans la méthodologie.

L'étude consiste à adopter la stratégie intégrant conjointement les pratiques de l'agilité, une conception de produits modulaires et l'Industrie 4.0 dans le but d'amener l'entreprise à répondre au besoin de personnalisation de masse. Répondre aux besoins du client par la personnalisation de masse tout en augmentant la performance de l'entreprise permettra d'augmenter la compétitivité de la PME. La performance de l'entreprise est définie dans cette étude par la rentabilité, la productivité et la flexibilité.

Ces trois composantes sont sélectionnées puisqu'elles sont directement reliées à la compétitivité dans le contexte de personnalisation de masse et de faible performance des PME.

Le concept de profitabilité vise à générer plus de profits en maximisant l'utilisation des ressources. De son côté, la productivité est définie par le ratio d'extrants sur les intrants. L'augmentation de la productivité correspond à réaliser plus avec les mêmes ressources ou en utilisant moins de ressources. Enfin, la flexibilité vise à avoir une variété de produits et à être en mesure de faire face à la variation de ces produits. Ainsi, la combinaison de ces trois concepts correspond à fabriquer une grande variété de produits avec moins de ressources qu'il est actuellement nécessaire afin de rendre l'entreprise plus profitable. L'impact de l'implantation de la stratégie est mesuré par ces concepts dans les chapitres suivants.

3.3.2 Choix de la méthodologie

Cette section présente la méthodologie de la recherche et explique les raisons justifiant l'utilisation de cette méthodologie. En premier lieu, la recherche a défini une stratégie. Cette recherche combine ensuite un cas en entreprise sous forme de recherche-action et un plan d'expériences réalisé par une simulation à événements discrets afin d'implanter et valider la stratégie proposée.

L'étude en entreprise permet de valider les facteurs de succès de la littérature en plus de ressortir les freins principaux de l'implantation de ces outils. Un cas réel en entreprise vient répondre au besoin soulevé dans la littérature, soit le manque flagrant de données quantifiées dans des cas en entreprise. Le cas en entreprise consiste à réaliser l'étape « Préliminaire » et l'étape « Audit » de la stratégie proposée de même que l'implantation des premières étapes puisque le temps de l'étude en entreprise était limité à deux années. L'entreprise sélectionnée conçoit et fabrique une large gamme de produits présentant une forte complexité de personnalisation. L'entreprise présente aussi une culture typique d'une PME et vit un choc de changement de génération occasionnant des complexités à évoluer vers les technologies.

Le plan d'expérience réalisé par la simulation permet par la suite d'évaluer l'impact individuel de chacun des outils ou technologies à mettre en place. Cette seconde partie de la méthodologie vient valider l'implantation des outils proposés dans la stratégie jusqu'à la seconde phase d'implantation de l'agilité. La simulation est choisie puisqu'elle permet d'évaluer un effet quantitatif sans implanter les solutions en entreprise ce qui pourrait prendre quelques années à implanter. Cette méthodologie permet également d'évaluer différents scénarios qui seraient autrement coûteux pour une entreprise. La simulation permet aussi de contrôler le bruit en fixant les paramètres qui pourraient impacter le résultat et qui ne sont pas à l'étude. Cette étape de la méthodologie permet de valider rapidement les prochaines solutions à mettre en place pour l'entreprise.

Nous retrouvons en premier lieu dans le chapitre suivant la présentation du cas en entreprise. En second lieu, le chapitre subséquent présente le plan d'expériences réalisé par la simulation conçue à partir des données de l'entreprise.

CHAPITRE 4 CAS EN ENTREPRISE

Le cas en entreprise sous forme de recherche-action est réalisé dans une entreprise sélectionnée par le Conseil National de Recherches du Canada. La sélection des entreprises par cet organisme est réalisée en utilisant les critères suivants : finances, innovation et croissance. Les entreprises correspondant à ces critères et ayant fait la demande effectuent une cartographie de la chaîne de valeur subventionnée afin d'amorcer l'implantation d'une démarche Lean. L'entreprise sélectionnée a demandé à poursuivre son amélioration à la suite de la cartographie de la chaîne de valeur. Elle a été choisie comme cas de validation pour la recherche dans le cadre d'un stage Mitacs Accélération.

4.1 Présentation de l'entreprise dans sa situation initiale

L'entreprise sélectionnée est une entreprise manufacturière dans le domaine métallique qui conçoit, fabrique et installe des solutions de palettisation, d'encaissage et de remplissage de sacs en vrac. L'entreprise, située au centre du Québec depuis 36 ans, répond aux besoins de ses clients avec une large gamme d'équipements conçus sur mesure et présentant une forte complexité. L'entreprise a vendu jusqu'à présent plus de 600 solutions automatisées depuis sa création. Initialement, chaque plan d'équipement était unique au client à l'exception de quelques supports de capteurs qui étaient des pièces standards depuis plusieurs années. L'entreprise fabriquait les produits sur demande et ne possédait pas d'inventaire. L'entreprise présentait peu de changements depuis les dernières années au niveau de l'organisation. La culture de l'entreprise vivait un choc de changement de génération.

L'entreprise livrait de 10 à 15 projets par année selon la taille des projets, leur complexité et leur niveau de personnalisation. Certains clients étaient réputés pour demander plus de personnalisation sur le produit que d'autres clients. Les clients sont régulièrement nouveaux, mais il arrive fréquemment qu'un client désire avoir une solution pour chacune de ses usines ou qu'un ancien client désire avoir un équipement complémentaire à sa

première commande. L'entreprise vivait un problème de compétitivité présentant un délai de livraison de 20 à 26 semaines en temps normal. Cependant, le temps d'attente à la suite d'une commande était initialement de 52 semaines ou plus. Avec la COVID-19, l'entreprise voit aussi son délai de réaction s'allonger étant donné le temps de livraison de certaines pièces critiques de plus en plus long et les pénuries de pièces. L'entreprise cherche à augmenter sa capacité de production et à réduire son temps de réaction tout en maintenant, pour le moment, un nombre de travailleurs fixe.

L'entreprise vit actuellement plusieurs problématiques avec la mise en production des produits modulaires :

- La codification actuelle des pièces et des modules ne permet pas de retrouver les articles dans le système.
- Les pièces standards mises en production sont régulièrement perdues ou utilisées pour un autre projet plus urgent.
- Des pièces standards sont produites en trop puisque les travailleurs lancent en production plus de pièces pour combler le problème de pièces manquantes.
- Les gestionnaires de production n'ont pas le statut de production des pièces standards qui sont utilisées pour un projet.
- Les travailleurs passent beaucoup de temps à chercher de l'information, des pièces ou des plans entraînant un faible taux d'efficacité.

Plusieurs autres problématiques sont aussi présentes dans l'entreprise au moment du début du stage Mitacs Accélération. Ces problématiques sont regroupées par catégories :

- Prise de décisions et stratégie
 - Les travailleurs craignent d'être tenus responsables d'une décision les amenant à toujours se référer à la direction pour toutes les décisions importantes ou non.
 - La prise de décision est centralisée à l'équipe de direction et parfois seulement au président.

- Les décisions sont généralement prises selon le jugement du président et ne sont pas toujours appuyées sur des données.
- La vision et le plan stratégique de l'entreprise ne sont pas établis.
- Communication et informations
 - Les concepteurs et dessinateurs n'ont pas d'information concernant les coûts de fabrication ou les temps de fabrication.
 - La communication interne est défaillante et l'information a de la difficulté à circuler.
 - L'information des processus de mise en production, l'envoi des commandes, la facturation et les services circulent par papier.
- Processus des ventes
 - Étant donné les délais et les problèmes de communication entre la soumission et l'ingénierie de projet, plusieurs détails sont oubliés et plusieurs questions sont posées au client afin de retrouver l'information.
 - L'information de ce qui est vendu au client n'est pas claire amenant l'équipe d'ingénierie à ajouter des éléments qui n'ont pas été vendus occasionnellement. La documentation de vente comprend seulement le nom des équipements avec les détails les plus importants, sans spécifications techniques.
 - Les ajouts du client et les modifications des projets en cours de fabrication sont fréquents.
 - La modification de la date de livraison d'un client est occasionnelle et entraîne des conséquences majeures au niveau de la production qui se retrouve engorgée.
 - Seuls 10 % des soumissions réalisées sont obtenues pour la conception et la fabrication.
- Coût de revient
 - Le profit d'une commande peut être positif ou négatif et est variable.
- Rôles et responsabilités

- Les rôles et les responsabilités ne sont pas clairement définis. Certaines responsabilités ne sont pas prises, alors que d'autres sont divisées à plusieurs, engendrant la confusion chez les travailleurs. Par exemple, le rôle du département informatique est divisé en cinq personnes, soit la réseautique, les achats, l'installation du programme Autocad, la mise en place des nouveaux ordinateurs et la résolution des autres problématiques.
- Non-valeur ajoutée
 - Plusieurs retranscriptions d'informations sont présentes dans les systèmes informatiques.
 - La qualité des pièces produites n'est pas contrôlée.

Ces constats soulèvent plusieurs problématiques réparties dans tous les processus de l'entreprise. Ces constats amènent à croire que l'entreprise possède plusieurs occasions d'amélioration.

4.2 Méthodologie du cas en entreprise

Tout en respectant les recommandations de la cartographie de la chaîne de valeur réalisée par M. Abdul-Nour Ing., Ph. D. et M. Payette M. Sc. A, Bachelier en ingénierie en 2020, la stratégie vise à mettre en place une gamme de produits modulaires. Les principales recommandations de la cartographie de la chaîne de valeur présentées dans leur ordre d'importance et tirées du rapport étaient :

1. Développer des produits modulaires afin de produire de façon plus flexible et efficace.
2. Aménager l'usine sous forme de cellules reconfigurables.
3. Instaurer l'alimentation des cellules par un commis afin d'augmenter l'efficacité des opérateurs.
4. Produire des sous-assemblages en petits lots de production afin de diminuer l'impact des mises en courses.
5. Passer à l'ère de l'Industrie 4.0.

Les recommandations tirées du rapport de la cartographie de la chaîne de valeur réalisée par M. Abdul-Nour et M. Payette en 2020 sont présentées en ANNEXE 3.

À la suite de l'étape de la cartographie de la chaîne de valeur et de la description de la situation initiale de l'étape « préliminaire » de la stratégie définie, l'étape « Audit » a été réalisée. Le questionnaire d'évaluation tiré de Gamache (2019) a été rempli afin d'évaluer la situation initiale de l'entreprise face à l'Industrie 4.0. Cette étape a permis de constater que l'entreprise n'était pas prête à implanter des technologies d'envergure et qu'elle devait mettre l'accent sur la mise en place d'outils d'agilité afin de structurer l'entreprise à plusieurs niveaux.

La Figure 4.1 ci-dessous présente les étapes réalisées dans le cas en entreprise. L'entreprise a implanté neuf solutions regroupées sous trois groupes réalisés en parallèle. La figure présente aussi la chronologie des étapes d'implantation en débutant par le haut du diagramme et terminant par le bas de ce dernier.

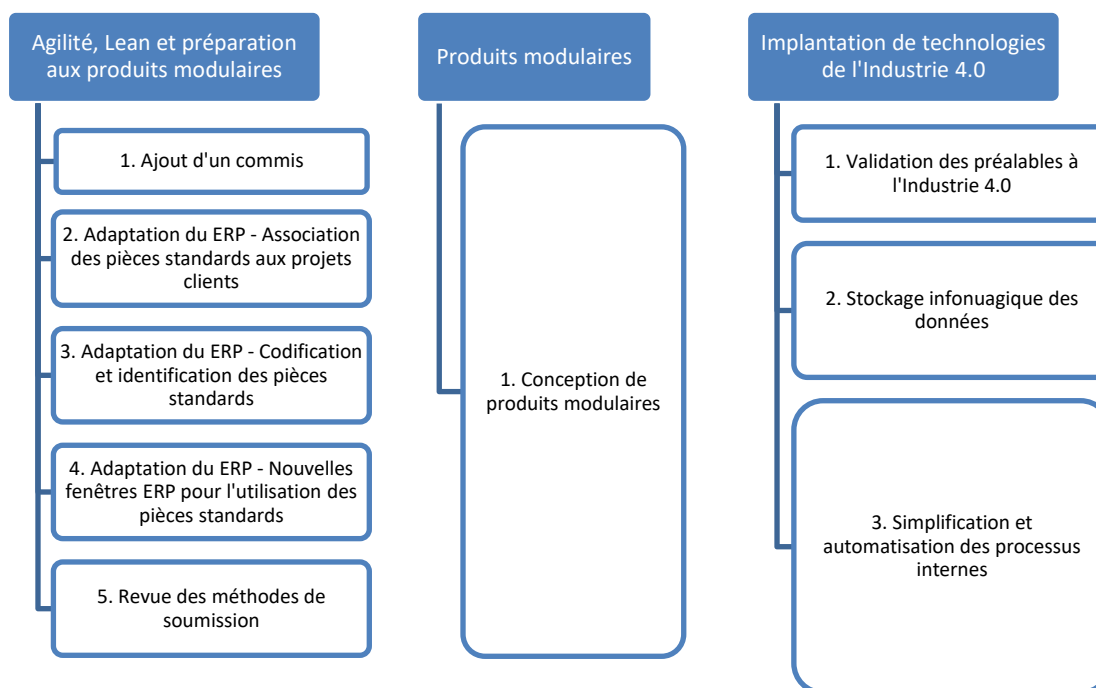


Figure 4.1 : Diagramme de la méthodologie d'implantation des outils pour le cas en entreprise

Les prochaines sections décrivent la problématique, l'objectif et la méthode d'implantation pour chacun des projets réalisés dans la méthodologie. Les résultats et leur analyse sont présentés à la suite de la méthodologie.

4.3 Agilité, Lean et préparation aux produits modulaires

Avant la conception des produits modulaires, la validation des fenêtres requises dans le logiciel de gestion de la production permettant l'utilisation de modules standards a été réalisée. L'entreprise a choisi de conserver son logiciel ERP et de l'adapter à la production de produits modulaires.

4.3.1 Ajout d'un commis

Le taux d'efficacité des ressources de production et d'assemblage de l'usine étaient faibles à la suite des observations de la cartographie de la chaîne de valeur. Le faible taux d'efficacité des ressources était causé par les recherches de pièces, les réceptions de matières premières, la recherche d'information et les déplacements des pièces.

L'objectif du premier projet consistait à augmenter l'efficacité des travailleurs de production afin qu'ils passent plus de temps à ajouter de la valeur à leur poste de travail.

Une définition de tâche a été réalisée avec le directeur de production et un commis a été mis en place pour alimenter les postes de travail. Cette nouvelle ressource vise à réaliser les tâches à non-valeur ajoutée afin d'augmenter l'efficacité des ressources de production.

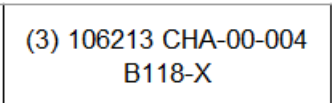
4.3.2 Adaptation de l'ERP - Liaison des pièces standards aux projets clients

Afin de mieux comprendre la nécessité de cette étape, les prochaines lignes décrivent le processus de mise en production et d'association des pièces standards présent au début du cas en entreprise.

En premier lieu, la machine était conçue et dessinée en combinant des pièces standards, des modules standards ainsi que des pièces personnalisées pour le projet. Les dessinateurs et concepteurs effectuaient la recherche dans le lot de dessins informatiques afin de trouver les dessins correspondant à leurs besoins.

Une fois les dessins terminés, les dessins étaient imprimés et envoyés au directeur de production. Le directeur de production indiquait la liste de numéros de pièces personnalisées et standards à fabriquer dans l'ERP ainsi que la gamme de fabrication des pièces personnalisées. Les pièces standards étaient sélectionnées depuis une liste de pièces standards créées auparavant.

Les pièces standards étaient alors reportées dans la liste de pièces standards à mettre en production. Le commis mettait en production les pièces standards en créant un seul bon de travail pour les pièces à produire pour tous les projets. Les dessins de ces pièces étaient alors imprimés. On collait une étiquette réalisée manuellement sur le dessin afin d'indiquer le projet et la section sur laquelle la pièce était nécessaire ainsi que la quantité à produire entre parenthèses. On retrouve un exemple d'étiquette collée sur le dessin en Figure 4.2. Il était fréquent de retrouver plusieurs étiquettes sur un dessin lorsque plusieurs pièces du même numéro étaient destinées à plusieurs projets et mises en production sur un même bon de travail. La liaison entre le bon de travail des pièces standards et les projets nécessitant ces pièces était réalisée dans un fichier Excel puisque les pièces n'étaient pas reliées dans le logiciel de gestion de la production.



(3) 106213 CHA-00-004
B118-X

Figure 4.2: Exemple d'étiquette générée par le fichier Excel pour les dessins

Chaque dessin était positionné dans le pigeonier correspondant au premier poste de travail de la gamme de fabrication. À la première étape, le premier travailleur imprimait l'étiquette de la pièce prenant son information de l'ERP. Cette étiquette contenait la quantité à produire, le numéro de bon de travail ainsi que le numéro de la pièce. On peut voir un exemple d'étiquette identifiant les pièces à la Figure 4.3. Les pièces passaient ensuite par tous les postes de travail selon les opérations indiquées par la gamme de fabrication de la pièce. Lorsque la pièce était terminée, elle était déposée sur le chariot de pièces identifié au numéro de projet mentionné sur l'étiquette du dessin.

Lorsqu'on retrouvait plusieurs étiquettes sur le même dessin, les pièces devaient être séparées selon les quantités indiquées et positionnées dans les bons chariots.

Le dessin était alors séparé de la pièce terminée à ce moment et ce dernier retournait dans le pigeonier de pièces terminées.



Figure 4.3: Exemple d'étiquette utilisée pour identifier les pièces

Au moment de faire l'assemblage de l'équipement du projet, le responsable de l'assemblage validait la liste de pièces nécessaires ainsi que les quantités de chaque pièce dans le chariot du projet à partir de la liste inscrite sur le dessin de l'assemblage. En cas de pièces manquantes, plusieurs situations pouvaient arriver telles que le vol de pièces sur d'autres chariots, la remise en production de la pièce manquante, la validation sur tous les autres chariots pour trouver la pièce en question, etc. L'assemblage de la machine débutait même si quelques pièces étaient manquantes dans le chariot. La Figure 4.4 présente les étapes de mise en production initialement présentes dans l'entreprise.

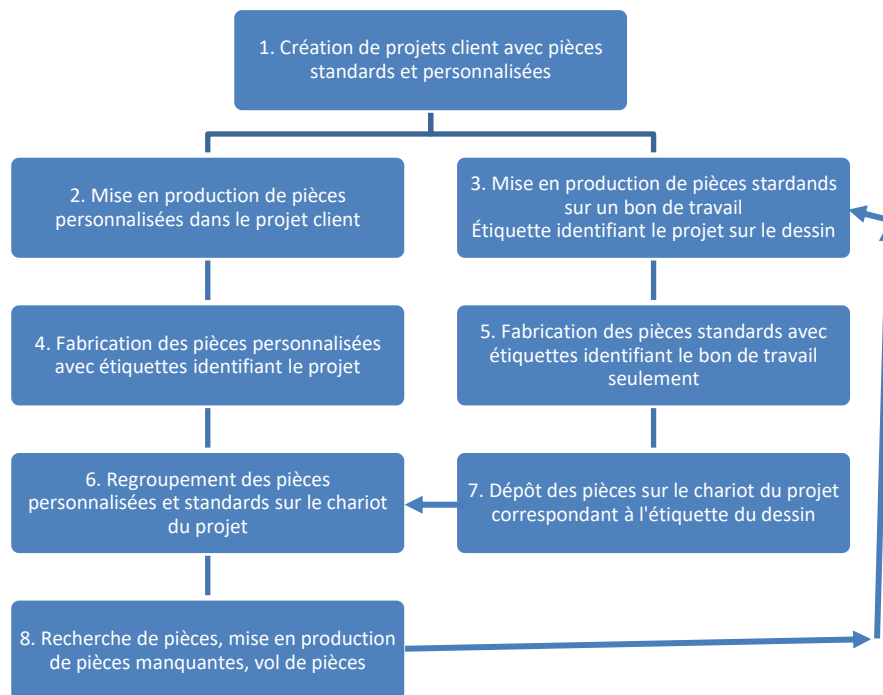


Figure 4.4: Diagramme expliquant le processus avant l'implantation du module de réservation des pièces, modules et produits finis standards

Les problématiques vécues dans la situation initiale étaient les suivantes :

- Les pièces standards mises en production étaient régulièrement perdues ou utilisées pour un autre projet plus urgent.
- Il était difficile de différencier les erreurs après qu'un travailleur ait déposé sa pièce sur un chariot.
- Des pièces standards étaient produites en trop puisque les travailleurs envoyaient en production plus de pièces pour éviter les pièces manquantes.
- Impossibilité de connaître les pièces standards en production pour un projet dans le logiciel de production.
- Difficulté à retrouver l'information de la destination de la pièce standard lors de perte du plan suivant la pièce en production.

L'objectif de ce premier projet consistait à éliminer ces problématiques de recherche pour les pièces standards. Pour ce faire, l'amélioration consistait à lier les productions de pièces standards directement aux projets nécessitant ces pièces.

C'est un système de réservation des pièces standards en fabrication, celles en inventaire, ou celles fraîchement en production qui a été instauré.

Le programme de gestion de la production a été modifié afin de produire des étiquettes contenant toutes les informations nécessaires à l'association des pièces aux projets. La base de données et les interfaces ont été modifiées afin de refléter ces nouvelles associations. La mise à jour du logiciel a été implantée. Les pièces en cours de production au moment de la mise à jour ont été associées dans la base de données au projet nécessitant chacune de ces pièces.

À la suite de la mise à jour du logiciel, l'identification du projet pour lequel une pièce est nécessaire est réalisée au moment de la création du bon de travail. Les étiquettes apposées sur les dessins et les pièces proviennent maintenant du logiciel ERP. L'étiquette contient maintenant le numéro de la pièce, le numéro de bon de travail, la quantité à produire, le numéro de projet auquel la pièce est destinée ou une indication que la pièce sera mise en inventaire ainsi que le numéro de bon de travail du projet. Un exemple de la nouvelle étiquette est présenté en Figure 4.5.

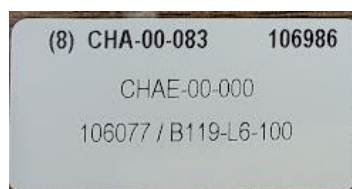


Figure 4.5: Exemple de la nouvelle étiquette

La validation de la liste de pièces dans les chariots d'assemblage se fait maintenant avec les étiquettes contenant l'information. L'ERP indique directement dans le projet l'avancement de la pièce standard réservée sur production. Le commis peut maintenant déterminer l'avancement de la pièce et localiser à quel poste de travail elle se trouve visualisant la gamme de fabrication partiellement remplie.

4.3.3 Adaptation du ERP - Identification et codification des pièces standards

À la suite de l'amélioration de la production des pièces standards, d'autres problématiques étaient toujours présentes limitant leur utilisation.

La codification et les affichages initiaux dans l'ERP ne permettaient pas de retrouver les pièces dans le système. La recherche était laborieuse nécessitant l'ouverture de plusieurs dessins et le questionnement des collègues pour trouver la pièce nécessaire au dessin. Plusieurs pièces déjà existantes ont été redessinées vu la complexité de recherche des pièces standards existantes.

L'entreprise comportait initialement quatre numérotations de dessins similaires soit : la numérotation des pièces personnalisées, la numérotation des pièces standards, la numérotation des modules standards et la numérotation des pièces de sous-traitance standards. Dans la présente section, deux numérotations standards initiales sont expliquées. La numérotation des pièces personnalisées n'a pas été modifiée dans le cadre de cette étude de cas puisque les problématiques n'étaient pas vécues avec ces pièces.

La numérotation des pièces standards était subdivisée en quatre parties : le nom de la machine représenté par un acronyme de deux lettres, la version du dessin représenté par une lettre incrémentale, le numéro de la section de la machine ainsi qu'un numéro incrémental de trois chiffres. La Figure 4.6 présente un exemple de numérotation de pièce standard.

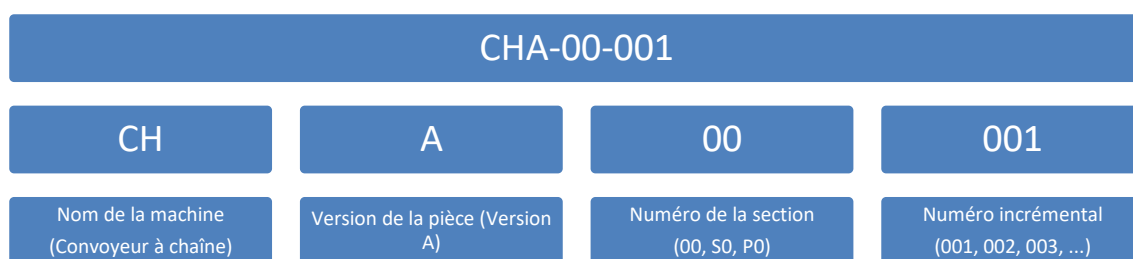


Figure 4.6: Diagramme expliquant la codification des pièces standards présente au début du cas en entreprise

La numérotation des modules standards était subdivisée en cinq parties : le nom de la machine représenté par un acronyme de deux lettres, la version du dessin représenté par une lettre incrémentale, un code incrémental à deux lettres, deux répétitions du chiffre zéro ainsi que trois répétitions du chiffre zéro. La Figure 4.7 présente un exemple de numérotation de modules standards.

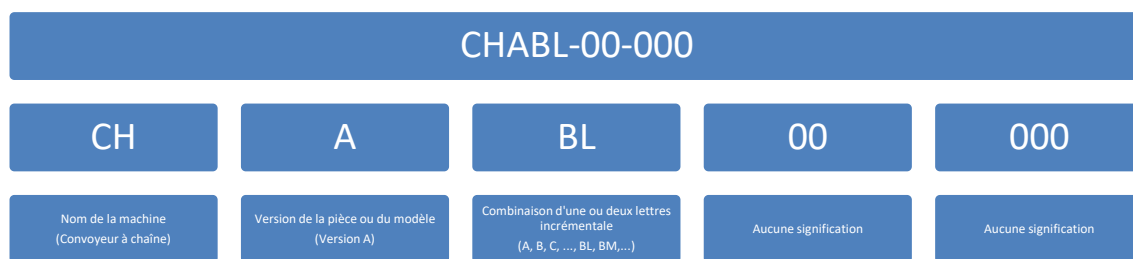


Figure 4.7: Diagramme expliquant la codification des modules et produits finis standards présents au début du cas en entreprise

En plus de la codification, toutes les pièces standards et personnalisées ont une description associée. Cette description n'était pas standard et était définie par le dessinateur concevant la pièce. Cette description était affichée dans le dessin et dans le logiciel ERP. La recherche de pièces dans le ERP n'était pas utilisée puisqu'elle était peu conviviale.

L'objectif du projet d'identification était de faciliter la recherche des pièces, des modules et des produits finis standards afin de réduire le temps de recherche et de maximiser l'utilisation des pièces standards existantes.

Pour déterminer la nouvelle méthode d'identification des pièces standards, plusieurs ouvrages ont été consultés afin de connaître les bonnes pratiques et valider la présence d'un modèle existant convenant aux besoins de l'entreprise. Les besoins des travailleurs de l'usinage, de l'assemblage et de l'ingénierie regroupés ensemble ont permis de prendre une décision éclairée à ce sujet. Le numéro de pièce à l'assemblage et à l'usinage ne semblait pas avoir d'importance dans ces départements.

Les modèles présentés pour tenter de répondre aux besoins de l'entreprise étaient celui d'Opitz (1970), le FORCODE (Jung & Ahluwalia, 1991), le MICLASS (Houtzeel, 1975) et le système développé par Šugár et al. (2011). Aucun modèle présenté ne satisfaisait aux requis de l'entreprise. La description des caractéristiques spécifiques ou la caractérisation de la gamme d'usinage des pièces semblait être trop précise pour l'entreprise. La fonction de la pièce avait beaucoup plus d'importance pour les dessinateurs et concepteurs.

La méthodologie pour concevoir cette nouvelle codification a consisté à identifier les caractéristiques de distinction les plus importantes, assigner des codes à chacune de ces

caractéristiques, catégoriser les pièces et coder les nouvelles pièces selon ces nouveaux standards tout en considérant les pièces actuelles et futures.

La méthode d'identification des pièces se compose d'une codification, d'une description, de spécifications techniques ainsi que d'une section de logiciels permettant de voir l'utilisation d'une pièce dans les assemblages.

4.3.3.1 Codification

En premier lieu, la codification se compose de cinq sections : l'identification de la catégorie de pièce, l'identification de la famille, l'identification de la sous-famille, un code à quatre chiffres incrémentaux et le numéro de révision. Pour l'identification de la catégorie de pièces, la codification permet les trois groupes suivants : Pièce standard, Module standard, Produit fini. La Figure 4.8 présente un exemple de la nouvelle codification mise en place.

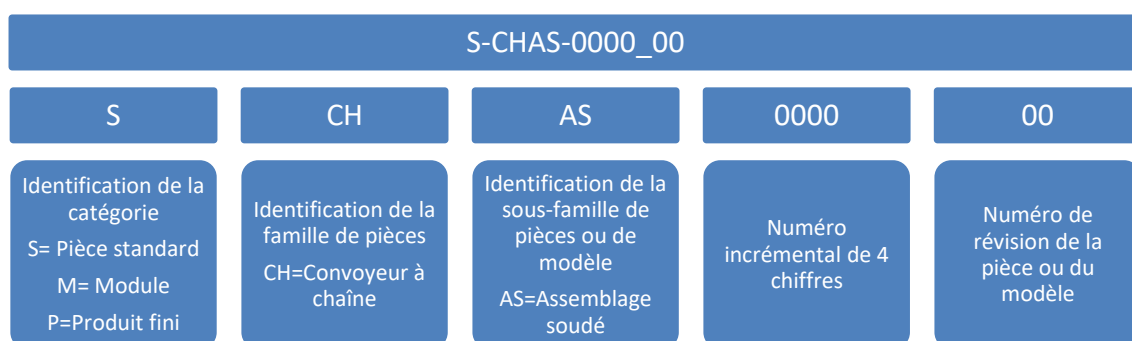


Figure 4.8: Diagramme expliquant la codification des pièces, modules et produits finis standards (modèles) implantés dans l'entreprise

Les pièces standards regroupent désormais les pièces de sous-traitance standards. Une pièce standard peut se composer d'une combinaison de pièces et de quincailleries soudées ou d'un des deux éléments. La pièce standard se définit à l'interne comme suit : Élément ne pouvant être désassemblé et ayant des opérations. Les quincailleries n'ont pas été considérées dans la codification puisqu'elles sont gérées dans une base de données séparée des pièces standards.

Les modules se définissent comme suit par l'entreprise : Assemblage pouvant contenir des pièces et des quincailleries pouvant être désassemblées.

Le produit fini quant à lui se définit par cette description : Assemblage pouvant contenir des pièces, des quincailleries et des modules pouvant être désassemblés et correspondant à une option d'un équipement ou à une partie d'un équipement de base.

4.3.3.2 Description standard

La liste de descriptions choisie regroupe les termes des pièces standards du convoyeur à chaîne, premier équipement standard chez l'entreprise. L'implication de personnes ayant effectué la standardisation de cet équipement a permis d'éviter de faire du travail en double pour la définition des descriptions.

4.3.3.3 Spécifications techniques

L'identification des pièces permet d'avoir une liste de spécifications techniques différentes pour chaque sous-famille et pour chaque famille. Ces caractéristiques permettent la différenciation des pièces d'une même famille, d'une même sous-famille et d'une même description. Ces spécifications permettent aussi de filtrer la liste de pièces pour visualiser seulement des éléments standards contenant une spécification particulière. Chaque spécification technique peut prendre la forme d'une valeur numérique, d'une valeur logique (oui ou non) ou d'un champ textuel. Les spécifications techniques peuvent être obligatoires ou non obligatoires. Cela signifie que le programme oblige ou n'oblige pas l'utilisateur à remplir certaines spécifications dans la création d'un nouvel élément. La Figure 4.9 présente une illustration de la fenêtre de création d'éléments standards comprenant la famille, la sous-famille, le type de pièce, la description ainsi que les spécifications techniques.

Ordre	Obligatoire	Titre	Valeur Numérique	Valeur Texte	Valeur Logique	Suffixe
1	<input checked="" type="checkbox"/>	LONGUEUR PI			<input type="checkbox"/>	PI
2		ANTICOROSION			<input checked="" type="checkbox"/>	ANTICORROS
3		DÉTAIL			<input type="checkbox"/>	

Figure 4.9: Image de la fenêtre de création d'un nouvel élément standard

4.3.3.4 Voir utilisation de la pièce

Pour certaines pièces, il peut être difficile de la reconnaître lors de l'utilisation d'une description générale, lorsqu'il y a peu de spécifications techniques applicables ou lorsque la pièce est tout récemment créée. Une fenêtre supplémentaire permet de prendre connaissance de l'utilisation de cette pièce dans les modules et les produits finis. La même situation est possible avec les modules utilisés dans les produits finis. L'utilisateur peut reconnaître la pièce plus facilement en tant que partie d'un ensemble. La Figure 4.10 présente l'écran de l'utilisation de la pièce S-CHAS-0029_00.

Quantité	No pièce	Révision	Description	Spécifications	Statut	Rév. de utilisée
1	M-CHBN-0005	0	BOUT MENANT	3 C /5 HP /FA77 /2 *DIA /37.5 °C-C	A	0

Figure 4.10: Présentation de l'affichage de la fenêtre « Voir l'utilisation de la pièce »

En cas de besoin, un bouton supplémentaire permet d'ouvrir le dessin de la pièce. Cela permet de visualiser rapidement des pièces qui sont inconnues.

4.3.3.5 Volet recherche avec toutes les informations de l'identification des pièces

Une fois entrées, toutes ces informations se retrouvent dans une table de recherche. Il est possible d'effectuer une recherche par un ou plusieurs de ces éléments, soit : le type, la famille, la sous-famille, la description et les spécifications techniques. L'affichage du dessin et de l'utilisation de la pièce permettent ensuite de confirmer que la pièce choisie est celle désirée.

973 pièces étaient présentées avant la mise à jour du programme. Le temps nécessaire à la mise à jour de la codification a nécessité un temps important. Cependant, l'équipe d'ingénierie a jugé le tout nécessaire puisque les pièces standards créées avant la transition pourraient difficilement être trouvées par la recherche autrement. En mettant à jour le code des pièces, il a été décidé de mettre à jour les dessins nécessitant alors un temps encore plus important. La mise à jour de la codification des anciennes pièces n'est actuellement pas terminée puisque le départ d'un travailleur a entraîné l'entreprise à prioriser la production.

4.3.4 Adaptation du ERP - nomenclature informatique d'un équipement

À la suite de l'implantation de la nouvelle codification, il devenait difficile de contrôler ce qui était mis en production. Les dessinateurs consultaient régulièrement d'anciens dessins contenant d'anciennes pièces standards pour concevoir les nouveaux équipements. Une amélioration de conception réalisée sur une pièce n'était pas utilisée systématiquement puisque les anciennes pièces demeuraient disponibles.

L'objectif du projet consistait à augmenter l'utilisation des pièces standards à utiliser pour la conception et éviter la production d'anciennes pièces standards qui ne doivent plus être utilisées.

Afin de définir les modifications requises pour le programme, les besoins ont été définis. Un statut de pièce a été créé, permettant ainsi aux pièces d'être actives, inactives ou à valider. Une nouvelle fenêtre pour l'entrée de la nomenclature permet de sélectionner les éléments standards actifs nécessaires à la conception d'une machine à partir de la liste de

pièces ou modules standards. Il est possible d'y ajouter des pièces personnalisées au besoin. L'utilisation des anciennes pièces dites inactives n'est pas permise dans la nomenclature, forçant ainsi les dessinateurs à utiliser les nouvelles pièces remplaçant les anciennes. La création de cette fenêtre était nécessaire puisque les dessins sont remis à la production en papier.

Cette nouvelle fenêtre évite la retranscription de la nomenclature dans le logiciel de production par le directeur de production. Cela prépare l'entreprise vers la production des pièces avec des dessins électroniques seulement. L'information est transmise en temps réel dans le système éliminant le délai d'impression et de transport du papier.

4.3.5 Revue des méthodes de soumission pour les produits modulaires

La méthode de soumission présente au début du cas en entreprise nécessitait une grande connaissance de tous les produits, des taux horaires ainsi que d'une idée générale du coût de fabrication de chaque équipement. Cette méthode de soumission nécessitait une estimation du temps de conception et de la fabrication de chaque produit personnalisé. L'entreprise avait une grande variation du profit généré d'un projet à l'autre. Les prix de vente étaient établis selon le jugement de la direction et étaient appuyés sur d'anciennes données qui n'étaient pas mises à jour régulièrement.

L'objectif de la suite du projet était de stabiliser le profit généré par projet et d'augmenter la rentabilité de l'entreprise. Une autre contrainte du projet était d'utiliser les données déjà présentes dans l'entreprise. Ce projet a permis de réaliser les premières analyses et de baser des décisions sur ces analyses. Ce changement a été effectué afin d'éviter la subjectivité des décisions prises selon le jugement du personnel. Ce projet permet d'utiliser les données des temps de main-d'œuvre, les coûts de matières premières et de quincailleries ainsi que les coûts de sous-traitance, soit des données déjà collectées dans l'entreprise.

Pour ce faire, l'analyse des ventes par type d'équipement a permis de définir la liste des modules vendus. Un coût de fabrication par équipement de base sans modules a été défini.

L'analyse des coûts de fabrication par équipement et par module a permis de faire une moyenne des coûts représentant ainsi le coût d'un équipement moyen. Ces coûts moyens sont inscrits dans une base de données Excel automatisée permettant de réaliser des soumissions rapidement. Ce fichier Excel limite les connaissances nécessaires à la création d'une soumission et permet d'évaluer de façon plus juste le coût des équipements.

Au moment de la soumission, le vendeur choisit l'équipement à soumissionner parmi le menu déroulant ajoutant automatiquement les modules de base. Le vendeur peut ensuite ajouter les modules supplémentaires à partir des menus déroulants. Les prix des modules s'ajoutent automatiquement. Les prix peuvent ensuite être mis à jour dans la base de données aussi régulièrement que désiré par le vendeur. Il en fait de même pour chacun des équipements dans le cas où plusieurs équipements sont demandés dans la même soumission. La Figure 4.11 présente une portion du logiciel de soumission réalisé sur Excel. La modification de la méthode de soumission oriente l'entreprise vers la vente par catalogue en ligne. Le logiciel facilite l'estimation du prix de vente en réalisant le tout par module à la place d'estimer le prix des pièces.

Soumission #XXXXXXXXX		Nom du client		Nom de la soumission	
Section 1: Convoyeur de palletisation		Quantité:	1	Type d'équipement:	
Option	Quantité	Prix unitaire	Devise	Ajout (CAD)	Prix total (CAD)
Élévateur pneumatique à plateau	1	\$ 2,00	CAD	\$	2,00
Pied linéaire supplémentaire	1	\$ 3,00	CAD	\$	3,00
Prix de base	1	\$ 10,00	CAD	\$	10,00
Sous-total				\$	15,00
Total		% USD =	0%	\$	15,00
Ajouter une section					
Liste d'options				Prix total (CAD)	
	Option 01			#	
	Option 02			\$	-
	Option 03			\$	-
	Option 04			\$	-
	Option 05			\$	-
	Option 06			\$	-
	Option 07			\$	-
	Option 08			\$	-
	Option 09			\$	-
	Option 10			\$	-
Total options				\$	-

Figure 4.11: Image d'une partie du logiciel de soumission réalisé sur Excel

4.4 Produits modulaires

4.4.1 Conception des produits modulaires

La validation de l'orientation a permis de réaliser que l'alignement de l'entreprise est divisé. La direction de l'entreprise a pour objectif de standardiser les produits. Cependant, elle a de la difficulté à voir les bénéfices des produits modulaires. La compréhension des avantages des produits modulaires pour l'équipe de direction est limitée à la réduction du temps de conception. Les bénéfices à plus long terme tels que la possibilité de réaliser des petits lots de production, de lisser la production lors de périodes creuses, de réduire les coûts de fabrications à l'interne et à l'externe ne semblent pas encore compris au niveau de la direction. Le temps des tâches quotidiennes de l'équipe de direction laisse peu de place à la prise de décision pour l'amélioration de l'entreprise. L'équipe de conception et des ventes ont quant à elle pour objectif de rendre les produits modulaires et semblent mieux comprendre les possibilités à long terme.

Malgré la réticence au changement présente, une méthode a été établie dans le but de réaliser la conception modulaire des produits. La méthode proposée consiste en une analyse systématique des ventes des dernières années, de la compétition ainsi que de la priorité de conception des équipements. La démarche adaptée de Bouchard et al. (2022) se compose des étapes suivantes :

1. Définir l'équipement à concevoir en priorité selon les ventes historiques avec une analyse Pareto, le plan stratégique et les marchés potentiels ciblés par l'équipe des ventes.
2. Réaliser une analyse comparative « Benchmarking » auprès de la compétition.
3. Effectuer une analyse Pareto des modules vendus dans les dernières années sur l'équipement.
4. Définir les options et les spécifications techniques pour l'équipement.
5. Élaborer un premier concept par l'équipe d'ingénierie basée sur un remue-ménages.

6. Revue de la conception par le département de montage, le département d'usinage, l'équipe des ventes et l'équipe de direction.
7. Fin de la conception de l'équipement par l'équipe d'ingénierie.
8. Fabrication de l'équipement pour la première fois.
9. Conception de la documentation pour l'équipe des ventes.
10. Réalisation de la rencontre de rétroaction sur la conception et de la présentation des coûts de fabrication.
11. Réalisation de la conception des machines suivantes définie à l'étape 3.

La stratégie d'implantation des produits modulaires a été proposée à l'entreprise. Avant d'aller de l'avant avec une telle démarche, l'entreprise doit être prête à amorcer ce changement important qui nécessite du temps à être accepté. Avec les étapes 1, 3 et 7 de la démarche proposée, Bouchard et al. (2022) ont réalisé une diminution du nombre de pièces standards de 70 % et réduit le temps de réaction pour livrer une commande au client.

L'entreprise a d'abord opté pour une revue de conception des équipements existants sans prendre en compte les étapes de la démarche établie. À la suite de la revue de conception, les équipements conçus se sont avérés trop coûteux pour le premier cas et non terminés pour le deuxième cas. Le manque de ressources et l'ampleur de la tâche pour une seule personne de même que les délais très longs avant d'approuver les validations demandées aux concepteurs ont amené un certain délai.

À la suite de ces réalisations, le besoin d'une démarche structurée a refait surface. Il a été convenu de débiter avec un équipement simple afin de tester la démarche malgré qu'il soit moins prioritaire. À la suite des étapes 1 à 4 de la démarche de conception, le projet a été retardé par manque de ressource au niveau de la conception.

4.5 Implantation de technologies de l'Industrie 4.0

4.5.1 Validation des préalables à l'Industrie 4.0

La revue de la littérature relève les principaux préalables à mettre en place pour l'implantation de technologies de l'Industrie 4.0.

La littérature soulève l'implantation du Lean et la présence d'une agilité de production, la présence d'une connexion Internet à haut débit, l'accès aux données en temps réel ainsi que la présence d'une planification stratégique comme étant les principaux préalables. Les validations effectuées avec l'entreprise pour les préalables énumérés sont présentées dans les sections suivantes.

4.5.1.1 Lean & agilité de production

Pour le préalable du Lean & agilité de production, certains éléments étaient déjà en place dans l'entreprise. La présence de kanban pour les quincailleries et les pièces utilisées fréquemment démontrait un désir d'amélioration présent chez l'entreprise. L'implantation des outils nécessaires à la fabrication des produits modulaires correspondait aussi à des éléments d'agilité.

D'autres éléments ont été mis en place tels que l'ajout d'un commis réalisant les tâches à non-valeur ajouté des travailleurs tel qu'expliqué précédemment. La modification de l'aménagement des étagères d'entreposage a diminué la recherche de pièces et les déplacements liés à la recherche de quincailleries. Le regroupement physique des pièces standards dans une même étagère et la correction des valeurs d'inventaire dans le logiciel de gestion de l'inventaire a permis de réduire les gaspillages. L'organisation des quincailleries dans les étagères utilisant les principes du 5S a permis de diminuer la recherche dans ces zones. Les éléments utilisés peu fréquemment ont été déplacés dans des zones moins accessibles.

L'implantation de ces outils étant amorcée, une vision Lean et d'autres outils d'agilité pourront être implantés dans ce début de démarche Lean et d'agilité de production.

L'implantation du Lean et d'agilité de production doit se poursuivre en continu pendant l'implantation de projets de technologies de l'Industrie 4.0.

4.5.1.2 Connexion Internet à haut débit

La vitesse de connexion Internet de l'entreprise était de 200 Mégabits/seconde initialement et a été augmentée à 400 Mégabits/seconde.

Cela a été réalisé en prévision des nombreuses synchronisations de projets qui ont lieu sur chacun des ordinateurs et les sauvegardes des serveurs qui ont été implantées. Cette augmentation de vitesse vise à accélérer le travail de tout le personnel de bureau puisque tous les documents sont désormais enregistrés dans un serveur de données infonuagique. De plus, plusieurs travailleurs effectuent désormais le travail à distance augmentant le besoin d'une vitesse plus rapide pour l'envoi des données telles que des dessins volumineux.

4.5.1.3 Accès aux données en temps réel

Le logiciel ERP développé à l'interne offre la grande majorité des données en temps réel. Les temps de production, les statuts de pièces, les statuts de commandes sont disponibles en temps réel. Des délais de quelques heures sont constatés pour les réceptions de quincailleries et pour la mise en inventaire des quincailleries et des pièces puisqu'une personne doit faire la validation des items avant l'entrée dans le programme. Le logiciel n'offre aucune planification de la production à l'exception de l'indication d'une priorité pour chacun des bons de travail. Les autres données sont conservées en format papier ou ne sont tout simplement pas collectées pour le moment.

4.5.1.4 Planification stratégique

La planification stratégique de l'entreprise a été mise en place un an après l'arrivée du stagiaire en entreprise. La planification stratégique réalisée établit l'orientation globale de l'entreprise, la définition des valeurs de l'entreprise ainsi que les grandes actions à prendre pour les trois prochaines années.

À la suite du plan stratégique, la quantité de temps des ressources attribuées aux projets d'amélioration semblait plus importante qu'avant le plan stratégique. Cependant, après le départ d'une ressource en ingénierie, les tâches quotidiennes ont refait surface.

Malgré qu'un plan stratégique ait été réalisé, la culture déjà présente en entreprise a limité l'impact de sa réalisation. L'entreprise n'avait pas pour habitude d'avoir des indicateurs de performance et d'effectuer le suivi de ces indicateurs à travers le temps.

Peu de communications ont été transmises aux travailleurs qui étaient absents lors de la rencontre du plan stratégique. La documentation réalisée pendant la mise en place des objectifs a été conservée à l'écart.

4.5.2 Stockage des données infonuagique

L'entreposage des données dans une solution infonuagique est l'une des solutions privilégiées par les auteurs selon le Tableau 2.4 de la revue de la littérature. Les documents et l'information circulaient initialement de façon papier engendrant des pertes de documents, des retranscriptions inutiles, des erreurs, de la recherche d'informations et des délais de transmission entraînant une faible efficacité principalement chez les travailleurs de bureau.

L'objectif était de minimiser l'utilisation du papier pour les principaux processus afin d'augmenter l'efficacité des travailleurs.

Le stockage des données par l'infonuagique a permis à l'entreprise d'entreposer les dessins, les factures, les commandes, les soumissions des fournisseurs, les demandes de prix, les confirmations de commande, la documentation des fournisseurs, les documentations client, etc. Le fournisseur Microsoft SharePoint a été choisi pour l'entreposage des données. Ce fournisseur permet d'automatiser plusieurs processus dans le même environnement par le biais notamment de Flow et de Power Automate. La plateforme de communication Teams a été implantée simultanément à SharePoint dans l'entreprise puisqu'elle intègre directement les sites SharePoint. L'implantation du logiciel de communication interne Teams vise à faciliter les communications rapides et à organiser les communications par équipe de travail et par projet client.

La création de 17 groupes d'accès et sites SharePoint associés a permis de classer les documents de l'entreprise selon les personnes devant avoir accès aux documents. Les groupes d'accès suivants ont été définis pour l'entreprise : Ventes, Soumissions et dessins, Soumissions, Marketing, Ressources humaines, Finances, Achats, Informatique, Ingénierie, Service, Fabrication et Infrastructure, Formation, Comité Loisirs, Communauté, Équipements standards, Microsoft 365, Amélioration continue.

On retrouve aussi une équipe par projet client afin de regrouper les communications et les documents relatifs à ces projets.

À la suite de la création de ces sites SharePoint, les documents ont migré vers chacun des sites. Les processus complexes tels que celui des achats et des finances, ayant plusieurs éléments répétitifs et nécessitant des méthodes de classement pour retrouver les documents, ont été mis de côté lors de la migration. Seuls les documents informatiques ont été transférés. Les documents papier ont été conservés tels quels afin de simplifier l'implantation.

Certains éléments de cybersécurité ont été implantés tels que la sauvegarde des données entreposées sur SharePoint, OneDrive et sur les serveurs locaux. Une sauvegarde de toutes les données de l'entreprise et des documents s'effectue chaque semaine dans un stockage externe infonuagique pour limiter le risque de pertes de données en cas d'événement imprévisible.

4.5.3 Simplification et automatisation des processus internes

À la suite de l'implantation d'une structure SharePoint de base, il a été plus facile de mettre en place des processus pour automatiser les étapes répétitives. Plusieurs étapes de création de dossiers, de recherches de dessins, de création de sites étaient répétitives. Ces étapes engendraient une faible efficacité des travailleurs.

L'objectif était d'automatiser ces étapes répétitives afin de libérer du temps pour des tâches à valeur ajoutée.

La définition des besoins pour les processus automatisés provenait principalement de la comparaison entre la cartographie des flux d'informations initiale et améliorée de l'entreprise. Les sections suivantes présentent les améliorations réalisées.

4.5.3.1 Envoie des dessins aux fournisseurs

Initialement, la personne de l'approvisionnement sélectionnait les dessins manuellement dans les divers sites SharePoint selon les numéros de pièces pour l'envoi d'une commande à un fournisseur.

La personne joignait les documents de la commande ou de la demande de prix par courriel au fournisseur avec les dessins. L'étape de recherche des dessins pouvait prendre jusqu'à une heure pour trouver tous les dessins d'une commande afin de les envoyer au fournisseur.

À la suite de l'automatisation, le logiciel de gestion de la production envoie un courriel dans une boîte courriel spécifique. Le courriel contenant un fichier texte avec les numéros de pièces et le document PDF de la demande de prix ou de la commande est reçu. Le système crée automatiquement le dossier à partager au fournisseur dans le répertoire approprié, effectue la recherche des dessins et effectue la copie dans le dossier créé. Le système transfère ensuite le courriel à la personne responsable de l'approvisionnement avec le lien du dossier en question ainsi que l'adresse du fournisseur à transférer le courriel après validation.

4.5.3.2 Gestion documentaire informatique pour l'équipe finance et achats

Initialement, tous les documents liés aux achats et aux finances étaient conservés sous format papier. Une transition vers le format électronique a été réalisée tout en remplaçant l'identification des piles de papier, les broches et les annotations manuscrites.

Le processus des finances et des achats effectue les éléments suivants afin d'accélérer les tâches de l'équipe des achats et des finances :

- Envoi automatique des demandes de prix au fournisseur à partir de l'ERP.

- Réception et classement automatique des soumissions fournisseur à partir d'une adresse courriel spécifique directement dans SharePoint.
- Envoi de la commande automatique à partir de l'ERP.
- Réception et enregistrement des bons de livraison à partir d'un numériseur avec possibilité d'effectuer la recherche dans le texte numérisé.
- Réception et classement des factures et des états de compte directement dans SharePoint.
- Possibilité de lier le dossier de la commande à la facture et de visualiser les documents reliés.
- Ajout de champs et de statut afin de remplacer les notes manuscrites, les différentes piles de papier et le jumelage de documents par une broche.

Ces liens, statuts et automatismes ont permis de transformer l'environnement de l'entreprise vers un environnement sans papier.

4.5.3.3 Création d'environnements de travail pour les projets clients

La création de l'équipe Teams, du site SharePoint et de toute la gestion des accès a été automatisée. Le gestionnaire de projet doit ajouter le nom du projet, le numéro de bon de travail et le nom du client dans une liste pour démarrer le processus automatique. Les documents de base s'ajoutent automatiquement dans les dossiers à partir du modèle de base établi pour un projet. Le processus présent à l'arrivée en entreprise nécessitait la création et l'ajout manuel de chacun de ces éléments, occasionnant des erreurs fréquentes et des pertes de temps.

4.5.3.4 Gestion des non-conformités

La gestion des non-conformités au niveau des fournisseurs était gérée de façon papier ou seulement de bouche à oreille. L'acheteur avait alors à se rappeler qu'il avait un suivi à faire au niveau d'un fournisseur ou qu'il était en attente d'un crédit.

Le processus de gestion des non-conformités est aussi informatisé et géré dans une liste SharePoint. Chaque non-conformité possède ses attributs et ses statuts permettant le suivi jusqu'à la fermeture de la non-conformité.

4.5.3.5 Création de soumission pour les ventes

Le processus de gestion documentaire pour les ventes a aussi été automatisé. La création du dossier au nom du fournisseur et du dossier au numéro de la soumission est réalisée automatiquement à partir du logiciel de gestion de la relation client Zoho.

4.5.3.6 Autres processus à mettre en place

Certaines technologies sont encore à mettre en place pour gérer les dessins de productions, les documents en lien avec le service client et les factures des employés qui circulent encore en format papier dans l'entreprise.

4.6 Conclusion de la méthodologie du cas en entreprise

Jusqu'à présent, deux des trois étapes importantes de la recherche ont été présentées. En premier lieu, l'adaptation d'une stratégie d'implantation de l'Industrie 4.0 pour la PME manufacturière a été proposée. L'implantation des premières étapes de cette stratégie a été présentée dans l'explication du cas en entreprise réalisé.

L'adaptation du logiciel ERP présent en entreprise était la première étape pour orienter l'entreprise vers l'Industrie 4.0. Le logiciel présent n'était pas adapté à la production de pièces standards et de modules tout en restreignant l'entreprise au niveau de la recherche des modules et des pièces standards créées. Les solutions mises en place sont actuellement utilisées par l'entreprise notamment : la création d'une nouvelle codification adaptée aux besoins de l'entreprise, l'adaptation du logiciel ERP à la production de pièces standards, l'utilisation de modules pour la conception de produits et l'adaptation d'une démarche structurée pour la conception de structures modulaires.

À la suite de l'implantation de ces éléments et de près de deux années d'implantation, le questionnaire de l'étape initiale de la stratégie a été réalisé à nouveau. Les résultats des questionnaires sont présentés dans la section résultats.

Les sections suivantes présentent les résultats ainsi que l'analyse des résultats du cas en entreprise.

4.7 Résultats du cas en entreprise

4.7.1 Résultats de l'implantation des solutions

L'implantation des nombreux projets a permis de constater des effets positifs à différents niveaux.

À la suite de la liaison des pièces standards aux projets, la recherche d'information et la recherche de pièce ont diminué de 40 % selon les travailleurs de production réalisant la recherche.

La production de pièces en surplus et le cannibalisme d'un projet à l'autre ont été diminués considérablement. Une diminution de l'inventaire de pièces produites en surplus de 50 % a été constatée après 6 mois.

L'implantation de la codification a engendré une réduction du nombre de descriptions des pièces standards de 87 %, soit un passage de 326 descriptions de pièces à 42 descriptions. Les doublons de pièces standards ont été retirés diminuant de 4,4 % le nombre de pièces à la suite du retrait de 44 dessins sur 995 dessins actifs.

L'analyse des données des produits modulaires créés a permis d'évaluer les gains de l'implantation des produits modulaires. L'utilisation de produits modulaires a permis la réduction du temps de conception d'un équipement personnalisé de 90 % et la réduction du temps de dessin de 32 %. La comparaison des temps de conception et de dessin de deux projets similaires avant et après la conception modulaire des produits a permis d'obtenir les résultats suivants. Des défis restent à relever pour des recherches futures au niveau de la configuration des produits modulaires afin de limiter le nombre de configurations et ainsi simplifier la conception.

L'analyse des coûts de découpe et de pliage des pièces standards par un sous-traitant externe a démontré que la commande de 3 à 4 pièces réduit le coût d'achat unitaire d'en

moyenne 10 % par rapport à l'achat d'une seule pièce. La commande de 5 pièces ou plus réduit le coût d'achat unitaire d'en moyenne 20 % selon les données historiques de l'entreprise.

Pour les quincailleries, la mention d'un achat en lot au moment de la soumission avec un nouveau fournisseur a permis à l'entreprise de réduire le coût d'achat unitaire des quincailleries standards de 20 %.

Les modifications de l'interface permettant aux dessinateurs et concepteurs d'entrer directement leur nomenclature et de rechercher leurs pièces plus facilement ont permis d'éviter une retranscription inutile des nomenclatures. La majorité des travailleurs de l'ingénierie considèrent les premières utilisations de ces nouvelles fonctions de « fabuleuses » facilitant grandement leurs recherches.

On espère réduire l'inventaire des anciennes pièces inactives avec ce nouveau module. Forcer l'utilisation des pièces qui sont en inventaire auprès des dessinateurs permettra de minimiser le temps de réaction des projets avec la mise en place de ce module ERP. L'évaluation de l'amélioration doit être réalisée dans une prochaine recherche puisque des améliorations des produits modulaires doivent avoir lieu afin d'évaluer l'impact de ce nouvel outil.

L'analyse de tous les coûts de fabrication des équipements lors de la mise en place du nouveau logiciel de soumission a permis de faire réaliser à l'entreprise que 80 % des modules vendus sur chacun des équipements sont toujours les mêmes. Ces analyses permettent de faciliter le travail d'analyse pour la conception modulaire qui sera réalisé lorsque l'entreprise poursuivra ses démarches. Le logiciel de soumission avec les nouvelles analyses a permis à un travailleur déjà expérimenté de réaliser des soumissions. Les prix des équipements sont en cours d'approbation par la direction.

Pour ce qui est des technologies implantées pour l'Industrie 4.0, les sites SharePoint et la migration des documents facilitent maintenant les recherches documentaires. Plusieurs pertes de temps liées à des problèmes de synchronisation des dossiers ont été occasionnées à la suite du transfert. Plusieurs adaptations du logiciel de gestion de la production ont été

nécessaires afin de créer les automatismes en place. L'entreprise a réduit le nombre de documents papier considérablement à la suite de l'implantation de ces technologies, principalement au niveau des commandes, des factures, des confirmations de commandes, des bons de livraison et des rapports de non-conformité fournisseurs. Les travailleurs ont maintenant accès aux documents sans passer par une connexion sécurisée. L'implantation de ces outils facilite le partage de documents avec les fournisseurs et clients à l'externe. Le risque de perte de données est réduit au minimum avec les solutions de cybersécurité. Le déplacement du personnel pour déplacer les documents est réduit considérablement. La mise en place des solutions améliore le suivi des documents tels que les rapports de non-conformité fournisseurs et les factures. L'infonuagique permet de centraliser l'information. Enfin, on retrouve une diminution des tâches répétitives dans l'entreprise pour plusieurs ressources clés de l'entreprise à la suite de l'automatisation des processus.

4.7.2 Résultats sur l'audit de la performance numérique

Au début du cas en entreprise, le questionnaire de Gamache (2019) pour l'étape « Audit » de la stratégie d'implantation consistait à remplir un questionnaire de 108 questions afin d'évaluer la performance numérique de l'entreprise et ainsi ce cerner les opportunités d'amélioration. Le questionnaire rempli en septembre 2020 est présenté en ANNEXE 4. À la fin de la période de stage du cas en entreprise, le questionnaire a été rempli de nouveau afin de comparer les résultats. Le questionnaire rempli en juillet 2022 est présenté en ANNEXE 5. Le Tableau 4.1 présente les résultats sommaires des deux audits réalisés ainsi que la comparaison des résultats par dimension.

Tableau 4.1: Résultats de la comparaison entre les deux audits réalisés au début et à la fin du cas en entreprise

Dimension	2020	2022	Amélioration
Leadership (LDS)	0,78	0,98	+0,21
Culture et organisation (CLT)	1,61	2,17	+0,55
Gestion des Technologies (TEC)	1,51	2,42	+0,91
Gestion des données (DNE)	0,96	1,49	+0,53
Expérience client (EXP)	0,75	0,92	+0,18
Système de mesure (MSR)	0,90	1,03	+0,13
Performance numérique	1,08	1,50	+0,42

Il est possible d'observer que l'entreprise s'est améliorée principalement au niveau des composantes suivantes : Culture et organisation, Gestion des technologies et Gestion des données. Cependant, l'amélioration des composantes Leadership, Expérience client et Système de mesure est plus faible. L'entreprise observe une performance numérique tout de même très faible et une amélioration générale de 1,08 à 1,50 indiquant une amélioration de sa performance numérique.

4.7.3 Résultats sur le ratio du chiffre d'affaires par employé

L'analyse du chiffre d'affaires par employé présentée au Tableau 4.2 permet de mesurer l'évolution de la performance obtenue à la suite de l'implantation de la stratégie. Le ratio a été calculé en divisant le chiffre d'affaires annuel ajusté selon le niveau d'inventaire, en début et en fin d'année, divisé par le nombre total d'employés moyen de l'entreprise pendant la période. Les années financières de l'entreprise commençant le 1^{er} octobre de chaque année ont été utilisées afin de simplifier les calculs.

Il est possible d'observer une croissance moyenne de 15 % du ratio du chiffre d'affaires par employé de 2018 à 2020 correspondant au moment de la création des premiers produits modulaires. L'utilisation de ces modules engendrait plusieurs problématiques résolues par les éléments implantés dans le cas en entreprise. Cependant, ces problématiques de production se faisaient peu ressentir à petite échelle. Les problématiques étaient principalement causées par une grande production de pièces standards ou la grande quantité de dessins standards disponibles au moment de la conception.

Cependant, il est tout de même possible d’observer une diminution de 13 % du ratio en 2021, correspondant à la première année du cas en entreprise. Plusieurs pertes de temps ont été engendrées à la suite de l’implantation de SharePoint pour le département de conception et de dessin correspondant ainsi à une période d’adaptation et de transition pour l’équipe. Cette diminution d’efficacité correspond au phénomène de la courbe de changement qui se fait sentir lors de l’implantation d’améliorations.

Cette diminution est aussi expliquée par la fermeture de l’entreprise et la perturbation de la chaîne logistique vécues à la suite de la pandémie de la COVID-19. La diminution de l’efficacité est causée par les circonstances et non par la méthode d’implantation de la stratégie.

Tableau 4.2: Ratio du chiffre d'affaires par employé

Année financière de l’entreprise débutant le 1^{er} octobre de l’année précédente	Variation du nombre de travailleurs face à l’année précédente	Rapport du chiffre d'affaires par employé	Variation du rapport du chiffre d'affaires par employé face à l’année précédente
2017		117 008 \$	
2018	+13 %	132 334 \$	+13 %
2019	+12 %	155 357 \$	+17 %
2020	-1 %	179 169 \$	+15 %
2021	+29 %	155 600 \$	-13 %

4.7.4 Temps requis pour l’implantation des solutions

Le Tableau Annexe 6.1 se trouvant en Annexe 6 présente les temps nécessaires à l’implantation des solutions et à la validation des préalables. Cependant, les freins rencontrés et les modifications majeures de l’ERP en place ont augmenté le temps nécessaire avant de commencer la création des produits modulaires. Ces modifications sont toutefois nécessaires à la production de masse personnalisée. L’entreprise a maintenant en place des outils adaptés pour concevoir et mettre en production des produits modulaires, mettre en place d’autres pratiques de l’Industrie 4.0 et poursuivre l’implantation de ces pratiques d’affaires agiles.

Le Tableau Annexe 6.1 présente des cases vertes correspondant à la réalisation de la tâche, des cases orange correspondant à l'implantation d'une nouvelle version de l'ERP et des cases bleues représentant un suivi et des correctifs à la suite d'une implantation logicielle. Pour les projets en pause, la cause de l'arrêt est mentionnée entre parenthèses.

L'implantation d'une culture d'amélioration continue dans un milieu où peu de changements ont été réalisés dans les dernières décennies a occasionné un défi de taille. Le nombre de problématiques occasionnant des pertes de temps était très grand nécessitant une priorisation rigoureuse. L'obtention d'une vision globale de toutes les problématiques, la priorisation et l'implication des travailleurs a nécessité beaucoup de temps et d'effort. L'engagement des travailleurs et l'autonomie étaient difficiles à obtenir dans un milieu où l'approbation est toujours nécessaire. Les ressources de la direction se retrouvaient alors surutilisées pour des décisions de faible importance. Les travailleurs faisant régulièrement face au refus de la direction tenaient alors pour acquis que toutes les demandes étaient refusées. Briser ces idées préconçues a nécessité près d'un an et demi avant que les travailleurs réalisent l'importance de soulever les problématiques et de s'impliquer dans le changement. Un travail important est encore à réaliser dans le but de rendre les ressources autonomes et obtenir l'engagement des ressources de l'entreprise.

4.7.5 Barrières et facilitateurs liés au cas en entreprise

L'implantation des différents outils d'agilité, de la conception modulaire et des technologies de l'Industrie 4.0 a permis de soulever les barrières et les facilitateurs.

4.7.5.1 Liste des barrières vécues dans l'entreprise

Le plan stratégique était le premier élément mentionné à implanter à l'arrivée du stagiaire dans l'entreprise. L'équipe d'amélioration continue a usé de multiples stratégies afin d'arriver à un plan stratégique un an après le début du cas en entreprise. L'aide de consultants externes et d'autres agents externes a permis d'accorder plus d'importance sur le plan stratégique. Une fois le plan stratégique réalisé, l'entreprise a eu de la difficulté à mettre en place des actions pour atteindre les objectifs fixés. Peu, ou pas d'actions de suivi, sur les actions prises, a été réalisé.

L'entreprise avait une orientation floue de la direction à prendre. L'absence de stratégie d'implantation des technologies de l'Industrie 4.0 se faisait ressentir par un manque d'orientation claire des décisions vers les problèmes prioritaires. L'indécision et une vision sur le long terme sur trois années seulement ont limité les gains potentiels à plus long terme du projet de conception modulaire.

Pendant le cas en entreprise, le manque d'implication et de proactivité de la direction dans l'implantation des projets d'amélioration correspondait au second plus grand frein des projets. Les projets nécessitaient beaucoup d'efforts de la part de l'équipe d'amélioration pour arriver à les implanter. Le temps disponible par la direction limitait son implication dans l'implantation et dans la profondeur de la compréhension de l'importance des projets.

Le manque d'organisation, de vision et de planification des projets à long terme a forcé l'équipe d'amélioration continue à changer de direction et de projet régulièrement rendant l'équipe beaucoup moins efficace qu'elle n'aurait pu l'être. Notamment, plusieurs fonctions supplémentaires ont été implantées dans l'ERP puisque le niveau de standardisation et de personnalisation futur n'était pas clairement défini.

La quantité de ressources libérées pour les projets était limitée. Le départ de ressources clés de l'entreprise a occasionné une diminution plus prononcée du temps accordé aux projets d'amélioration, liant les travailleurs encore présents aux tâches quotidiennes de leur rôle. La revue de la codification des pièces standards et la conception modulaire des équipements sont deux exemples de projet n'ayant pas été terminés et mis sur pause par manque de ressources disponibles. Le manque de ressources a occasionné des délais d'implantation plus longs que prévu et a retardé les gains liés à l'implantation des projets.

La culture présente dans l'entreprise a aussi été une barrière considérable à l'implantation de certains projets. Les retards aux rencontres, la peur de donner accès aux données, les troisièmes validations de la direction, la conservation de pièces et quincailleries désuètes, la peur de retarder les projets et l'absence de changements majeurs pendant plus d'une décennie a amené une difficulté importante à démarrer un mouvement d'inertie. Amener les travailleurs à suggérer de nouvelles idées et rendre possible la modification de certaines pratiques de l'entreprise était difficile dans l'entreprise.

En bref, les barrières ou conditions de réussite de la mise en place de la stratégie sont :

- La présence d'un plan stratégique;
- Le suivi des objectifs;
- L'implication et la proactivité de la direction;
- La culture d'entreprise;
- La présence de ressources disponibles pour la mise en place des projets.

4.7.5.2 Facilitants

À la suite de l'implantation des solutions sélectionnées pour l'entreprise, deux facteurs facilitant la mise en place ont été soulevés. Ces facteurs étaient :

- L'appui de personnes ayant des rôles clés dans l'entreprise;
- L'implication du personnel.

Parmi les facteurs de succès de l'implantation de ces solutions, l'appui du directeur d'ingénierie et du représentant technique dans les démarches effectuées a ajouté beaucoup

de poids pour convaincre la direction. L'appui de travailleurs clés de l'entreprise ayant des liens de confiance bien établis avec la direction a facilité la mise en place du plan d'action. L'impact de consultants externes a aussi eu un impact positif sur le changement. Malgré qu'aucune culture de changement n'était présente dans l'entreprise initialement, la fin de la période en entreprise laissait de plus en plus apparaître une culture d'amélioration continue. Pour la première fois dans les derniers mois en entreprise, plusieurs travailleurs soulevaient les problématiques dès qu'elles étaient vécues. Les travailleurs de l'entreprise étaient prêts et disponibles à mettre en place cette culture d'amélioration malgré le manque de changements dans les dernières années.

4.7.5.3 Limites de la PME

Le manque de ressources pour les projets d'amélioration était présent dans l'entreprise. L'équipe d'amélioration continue était restreinte, se limitant au stagiaire présent pour le programme Mitacs Accélération ainsi qu'à quelques heures d'autres ressources principalement destinées pour les projets liés à l'infonuagique. Le temps disponible pour les projets d'amélioration des autres ressources variait grandement selon la quantité de travail engendrée par leurs autres rôles dans l'entreprise. Les autres ressources de l'entreprise pouvaient être utilisées pour l'amélioration seulement lorsqu'elles n'avaient plus de tâches.

L'implantation des outils choisis nécessitait peu de ressources financières par rapport aux autres solutions disponibles dans la littérature. L'enjeu financier ne semblait pas être une limite pour l'entreprise pour les solutions implantées. La grande majorité des projets en cours d'implantation étaient subventionnés par des organismes gouvernementaux jusqu'à concurrence de 50 % des dépenses pour l'entreprise facilitant ainsi l'acceptation des projets auprès de la direction.

L'entreprise s'est affiliée avec un consultant externe pour implanter la structure infonuagique et les processus administratifs automatisés. La modification du ERP a été réalisée à la suite de l'embauche de la programmeuse ayant conçu le logiciel.

L'entreprise a su s'entourer du savoir technique nécessaire à l'implantation des projets de l'Industrie 4.0 puisque ce savoir technique n'est actuellement pas disponible à l'interne. Ces deux ressources ont facilité l'implantation des technologies puisqu'elles avaient les connaissances au sujet de la mise en place de SharePoint et du logiciel ERP. Il semble être essentiel pour l'entreprise d'aller chercher du support à l'externe ou d'embaucher des ressources ayant les connaissances nécessaires à l'implantation de telles solutions.

4.8 Analyse des résultats du cas en entreprise

4.8.1 Analyse des résultats de l'audit

À la suite des comparaisons des deux audits réalisés en 2020 et en 2022, l'entreprise s'est améliorée principalement au niveau des composantes de Culture et organisation, Gestion des technologies et Gestion des données tandis que les composantes Leadership, Expérience client et Système de mesure sont demeurés plus faibles.

Les PME vont préférer implanter de nouvelles technologies que de mettre en place de nouveaux outils de gestion tels qu'un changement de culture et l'ajout d'indicateurs de performance. Les changements d'outils de gestion nécessitent un changement de pratiques organisationnelles et de culture de l'organisation nécessitant beaucoup plus d'effort à mettre en place que les technologies (Mittal et al., 2020). Donc, il est tout à fait normal de voir une amélioration plus importante au niveau de la gestion des technologies et de la gestion des données face au leadership et au système de mesure.

Les trois dimensions ayant la plus faible amélioration sont aussi celles ayant les plus faibles niveaux initiaux. Les PME possèdent une faible maturité au niveau de leurs pratiques de gestion (Klimecka-Tatar & Ingaldi, 2022). De plus, selon Gamache et al. (2020), les PME n'exploitent pas l'opportunité de l'expérience client et manipulent constamment leurs données pour en tirer des résultats de bonne qualité et les analyser. Cela explique pourquoi les dimensions de leadership, de gestion des données menant à des indicateurs de performance fiables pour la prise de décision et l'expérience client sont les trois dimensions les plus faibles de l'entreprise.

Ces dimensions ont difficilement pu être améliorées dans le cas en entreprise. Malgré la sensibilisation réalisée, les projets soulevés pour améliorer ces dimensions n'ont pas été prioritaires.

On observe une faible performance numérique initiale de 1,08 au niveau de l'entreprise. Cette faible performance justifie les technologies de bas niveau implantées en entreprise. L'entreprise était initialement au niveau 0 et devait passer au niveau 1 pour amorcer sa transformation numérique. Les technologies implantées sont en quelque sorte une mise à niveau afin de commencer à implanter d'autres technologies plus avancées prochainement (Mittal, Muztoba, et al., 2018). En près de 2 ans, l'entreprise a atteint un niveau de performance numérique de 1,50/4.

Selon (Mittal, Muztoba, et al., 2018), le passage au niveau 1 peut nécessiter plus de temps et plus de ressources que le passage du niveau 1 au niveau 2. La restructuration des ressources et l'implantation des premières technologies dans l'entreprise étaient un grand changement pour la plupart des travailleurs. Les habiletés des travailleurs à utiliser les fonctions de Windows, les outils de la suite Office 365 et OneDrive étaient peu présentes. L'entreprise possédait encore plusieurs de ses ordinateurs fonctionnant sous Windows 7 alors que le système d'exploitation n'était plus supporté par Microsoft. Cela montre à quel point l'entreprise avait du chemin à faire et explique aussi pourquoi les travailleurs avaient de la difficulté à s'adapter à tous ces changements aussi rapidement.

4.8.2 Analyse de l'impact des solutions mises en place

Plusieurs constats peuvent être soulevés des éléments implantés en entreprise. Malgré les deux années passées, les décisions sont encore majoritairement prises en se basant sur le jugement de la direction. Les solutions d'indicateurs de performance n'ont pas été implantées en entreprise jusqu'à présent puisque ces outils ne sont pas suivis et utilisés par la direction. L'entreprise réalise la majorité des décisions basées sur son instinct, ce qui n'est pas surprenant en comparant aux études de Mittal et al. (2020). La direction commence à impliquer d'autres travailleurs afin de prendre des décisions plus éclairées tel que suggéré par Mittal, Romero, et al. (2018).

L'utilisation des données déjà collectées est actuellement au minimum. Commencer au niveau 0 en utilisant les données déjà présentes dans l'entreprise avant d'implanter de nouveaux dispositifs de collecte de données a été bénéfique pour l'entreprise. L'entreprise avait à déboursé moins puisque la collecte de ces données était déjà présente dans l'entreprise. Cependant, les données ont dû être ajustées manuellement, catégorisées et regroupées afin d'en tirer des résultats d'analyse fiable. Le projet de l'évaluation des coûts de fabrication pour les soumissions avait pour objectif d'augmenter l'utilisation stratégique des données et de prouver que leur utilisation était bénéfique pour l'entreprise. Tel que vécu aussi par Mittal et al. (2020), on retrouve dans l'entreprise plusieurs processus et activités où les données ne sont pas transmises, entreposées et, surtout, analysées. L'entreprise possède suffisamment de données pour réaliser plusieurs décisions, mais elles ne sont pas analysées. La qualité, la facilité d'extraction et la connaissance des données présentes semblent limiter l'entreprise à utiliser ces données à des fins d'analyse. L'étude réalisée amène à penser que l'analyse des données déjà présente dans l'entreprise est bénéfique dans le cas où les données sont pertinentes et qu'elles peuvent mener à la prise de décisions stratégiques.

Enfin, l'implantation des outils et la mise en place d'une structure basée sur une stratégie ont permis d'orienter une PME vers l'Industrie 4.0. Comme dans l'étude de Busto Parra et al. (2021), le cas en entreprise a permis d'abandonner certaines pratiques traditionnelles et de mettre en place des éléments technologiques tout en gagnant de l'expérience. Le tout a été réalisé sans diminuer la flexibilité de l'entreprise. Plusieurs éléments sont encore à mettre en place afin d'augmenter la performance de l'entreprise. L'entreprise semble sur la bonne voie pour l'implantation de l'Industrie 4.0.

Comme pour Busto Parra et al. (2021), plusieurs éléments importants ont été mis en place tels que l'accès à l'information et le suivi des produits. Contrairement à leur étude, la communication était à améliorer au niveau du cas en entreprise. Comme démontré dans leur étude, la communication entre les employés était cruciale appuyant le manque vécu dans cette étude.

Comme Busto Parra et al. (2021) le logiciel de gestion de la production personnalisé pendant deux années avec un programmeur à temps plein a été l'élément le plus important du cas en entreprise. Sans cet élément, la mise en place de produits modulaires hautement personnalisés aurait été très difficile dans le domaine présenté et considérant le passé de l'entreprise. Cela amène à croire que la personnalisation des outils est importante pour la PME.

4.8.3 Analyse des barrières vécues

Les barrières vécues en entreprise étaient les suivantes :

- Absence de stratégie, vision et plan stratégique;
- Le manque de suivi des objectifs;
- Le manque d'implication et de proactivité de la direction;
- La culture d'entreprise présente avant l'implantation;
- La faible quantité de ressources humaines pour implanter les projets.

Ces difficultés vécues sont typiques à celles trouvées dans la littérature pour les PME.

Notamment, Liborio Zapata et al. (2020) présentent 10 éléments typiques des PME.

1. Ressources financières, humaines et techniques limitées;
2. Stratégie informelle et prise de décisions informelles;
3. Culture rigide face au changement et à l'expérimentation;
4. Personnel engagé dans plusieurs domaines de l'organisation;
5. Faible orientation vers le standard et dans les procédés;
6. Développement de produits avec hauts niveaux de personnalisation;
7. Connaissances spécifiques dans un domaine de l'industrie;
8. Forte relation client et fournisseurs;
9. Faible investissement dans la recherche et développement et manque de collaboration avec les universités;
10. Faible adoption des technologies.

L'auteur mentionne que les éléments ayant l'impact le plus fort sur l'implantation de l'Industrie 4.0 sont les ressources limitées, la culture rigide au changement et le faible investissement en recherche et développement. La littérature concorde avec les limites vécues en entreprise principalement au niveau du manque de ressources et au niveau de la culture d'entreprise.

Le délai d'un an et demi avant le début de l'implantation d'une culture d'amélioration continue est explicable par les efforts nécessaires à mettre en place vu le faible investissement en innovation présent en entreprise ainsi que par le temps nécessaire au changement de culture d'entreprise.

L'entreprise présente un faible niveau de disponibilité des ressources puisqu'elles sont très axées sur la performance des opérations et non sur l'amélioration de leurs façons de faire comme dans l'étude de Liborio Zapata et al. (2020).

Liborio Zapata et al. (2020) soulèvent que malgré le faible niveau de ressources disponibles, le leadership de la direction définissant ainsi la culture de l'organisation est un enjeu encore plus limitant. C'est exactement ce qui est vécu dans l'entreprise. On retrouve beaucoup de résistance aux changements de la part de la direction, et non des travailleurs, et il est difficile d'amener de nouveaux projets à terme en étant limité par le manque de vision et l'absence de stratégie.

L'auteur soulève aussi que le leadership vécu dans certaines PME familiales est une forte barrière étant donné le manque de vision future et l'absence de prise de risques étant donné la position confortable de l'entreprise. L'entreprise étant bientôt en transition d'actionnaires dans les prochaines années peut amener la direction à vouloir conserver sa position dans le marché sans apporter de grands changements. Le manque de vision à long terme cache le manque de stratégie d'implantation des technologies (Busto Parra et al., 2021). Le manque de vision, de stratégie et d'implication de la direction correspond au faible niveau de maturité de la gestion de l'entreprise tel que présenté dans d'autres études (Klimecka-Tatar & Ingaldi, 2022).

La planification stratégique de l'entreprise semble avoir eu peu d'impact. Certains éléments semblaient manquants tels qu'une vision à long terme des projets, une revue du modèle d'affaires et un plan numérique pour atteindre les objectifs de l'entreprise. Aucun de ces éléments suggérés par Gamache et al. (2020) ne semblaient présents dans la planification stratégique de l'entreprise. Afin d'atteindre ses objectifs, les pratiques telles que le suivi serré de ses objectifs, l'ajout d'indicateurs de performance et la prise d'action à la suite d'un écart avec les objectifs semblent être des pistes de solutions qui pourraient permettre à l'entreprise d'augmenter l'impact du plan stratégique.

4.8.4 Analyse du ratio du chiffre d'affaires par employé

L'effet négatif constaté sur le ratio du chiffre d'affaires par employé semble être expliqué par trois éléments.

En premier lieu, l'implantation de technologies, de formation et d'infrastructures liées à l'Industrie 4.0 est coûteuse à court terme et les bénéfices nécessitent du temps (Menon & Shah, 2020). Les entreprises implantant leurs premières technologies et visant l'Industrie 4.0 à moyen long terme mentionnent qu'ils nécessiteront jusqu'à 15 années pour l'implanter (Müller et al., 2018). L'entreprise est au creux du phénomène de la courbe de changement et c'est normal d'avoir des résultats négatifs à cet effet pour les premiers temps.

En second lieu, les éléments externes ont un impact sur la mesure prise en entreprise telle que vécue par Busto Parra et al. (2021) dans leur étude. Nommons par exemple la COVID-19 qui vient fortement affecter les résultats de l'entreprise.

En troisième élément, les entreprises effectuant leur premier pas dans la direction de l'Industrie 4.0 tout en étant à un faible niveau initial nécessitent plus de ressources, rencontrent plus de problèmes et nécessiteront certainement plus de temps à implanter l'Industrie 4.0 (Mittal, Muztoba, et al., 2018).

Avec tous ces éléments, il est normal que la première année ne semble pas avoir démontré des résultats globaux positifs vu l'état initial de l'entreprise, la situation externe à

l'entreprise et le temps d'implantation des outils. Cependant, la productivité de l'entreprise est tout de même grandement augmentée à la suite de l'implantation de tous les projets réalisés bien que les résultats globaux ne soient pas impactés positivement.

4.9 Conclusion du cas en entreprise

La recherche a présenté une stratégie d'implantation dans le chapitre de la méthodologie. Le présent chapitre a présenté le cas en entreprise, les résultats ainsi que l'analyse de ces derniers. Jusqu'à présent, deux des trois étapes importantes de la recherche ont été présentées.

Les actions réalisées dans le cas en entreprise ont permis d'orienter l'entreprise sur la bonne voie pour l'implantation de l'Industrie 4.0 et de la personnalisation de masse. Enfin, à la suite du manque de temps pour implanter toutes les solutions de la stratégie proposée, l'effet des étapes suivantes de la stratégie sera estimé par une simulation de l'entreprise dans le chapitre suivant.

CHAPITRE 5 PLAN D'EXPÉRIENCE RÉALISÉ PAR UNE SIMULATION

La simulation fait suite à l'implantation des premiers outils en entreprise. La simulation, telle qu'utilisée et suggérée par Abdulnour et al. (2022), Abdulnour et al. (2018) et Mofolasayo et al. (2022), va permettre d'évaluer l'impact des autres outils sélectionnés par la stratégie. La simulation a été conçue et validée de façon à représenter la situation réelle de l'entreprise. Le logiciel de simulation utilisé pour l'étude est Simio. Les paramètres de la simulation ont permis d'ajouter ou de retirer l'implantation de chacune des variables définies dans le plan d'expérience. Le plan d'expérience a ensuite pu être réalisé en utilisant la simulation paramétrable pour réaliser les différentes expériences. Les hypothèses ont été posées dans ce chapitre pour chacune des variables. Les prochaines sections présentent le fonctionnement en usine correspondant ainsi au fonctionnement de la simulation.

5.1 Choix des variables et de leurs niveaux

La liste des variables et de leurs niveaux respectifs présentée dans cette section a permis de construire un plan d'expérience. Le Tableau 5.1 présente la liste des variables ainsi que la description de leurs niveaux respectifs. Le tableau rappelle les variables sélectionnées à la Figure 3.2 du cadre conceptuel. La dernière colonne du tableau présente les auteurs ayant suggéré chacune des variables. Les cinq variables suivantes présentent chacune deux niveaux. L'opérationnalisation des variables dans la simulation est expliquée à la suite de l'explication de la simulation afin de faciliter la compréhension.

Tableau 5.1: Liste des variables et de leurs niveaux

Variable	Auteurs	Description du niveau 0 de la variable	Description du niveau 1 de la variable
Conception modulaire (A)	(Gunasekaran & Yusuf, 2002; Ismail et al., 2007; Nakayama & De Mesquita Spinola, 2015)	Produits fabriqués sur mesure	Utilisation des dessins standards pour les équipements représentant 80 % des ventes
JAT & Kanban (B)	(Abdul-Nour et al., 1999; Gunasekaran & Yusuf, 2002)	Aucune pièce en Kanban	Pièces standards en Kanban
Aménagement de production flexible & assemblage en parallèle (C)	(Gunasekaran & Yusuf, 2002; Leite & Braz, 2016)	Assemblage des équipements en série	Assemblage des équipements en parallèle lorsque possible
Intranet & écrans à chaque poste de travail (D)	(Bessant et al., 2000; Schönfuß et al., 2021; Zhang, 2011)	Travailleurs se déplaçant à un poste informatique commun pour sa carte de temps et trouver le dessin	Travailleurs ayant chacun leur poste informatique à leur poste de travail pour leurs dessins et leur carte de temps
Indicateurs de performance, amélioration continue & Lean (E)	(Busto Parra et al., 2021; Mittal et al., 2020; Mofolasayo et al., 2022; Rauch & Vickery, 2020)	Temps de mise en course actuels	Temps de mise en course des postes goulots réduits à la suite de l'application de la technique SMED

Les variables ont été sélectionnées afin de faire suite au cas en entreprise, réalisé dans le but de poursuivre l'implantation de la stratégie établie dans le chapitre de la méthodologie. L'Industrie 4.0 tire sa source de la personnalisation de masse dont l'un des outils importants est la conception modulaire. La conception modulaire rend possible ou facilite l'implantation de plusieurs projets utilisant les outils de l'Industrie 4.0. Tel que suggéré dans la revue de la littérature, les variables du plan d'expérience utilisent les données déjà présentes dans l'entreprise de même que l'infonuagique qui est la technologie la plus suggérée. L'implantation d'une conception modulaire, de Kanban et l'assemblage en parallèle permettront d'autres projets tel que la gestion intelligente des pièces standards par kanban, l'intégration horizontale et verticale de l'entreprise sous forme de réseau et

plus encore. Les liens entre les variables sélectionnées pour la simulation et les concepts sont présentés dans la Figure 5.1.

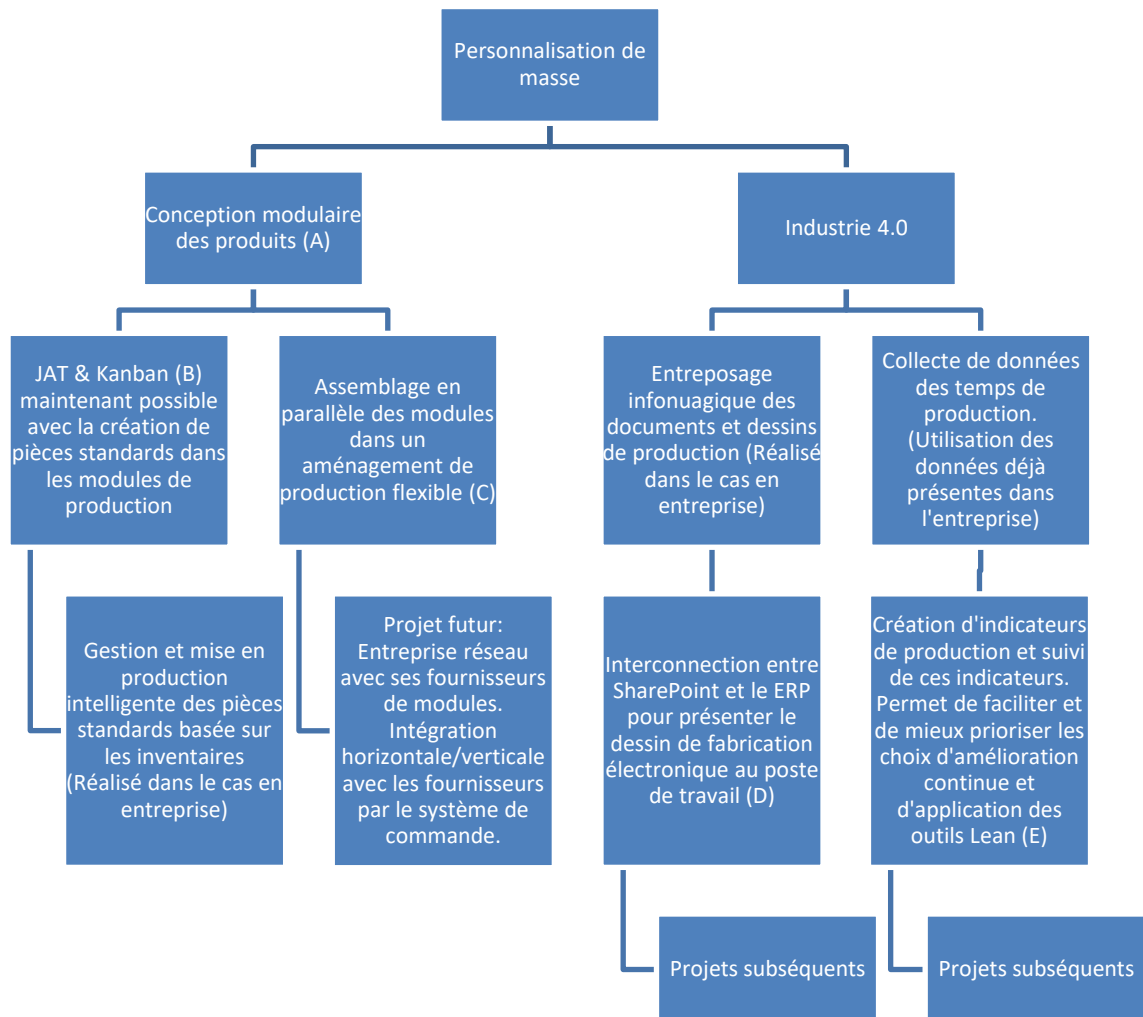


Figure 5.1: Représentation graphique des liens entre les concepts et les variables testés dans la simulation.

5.2 Modèle de simulation

L'équipe de conception conçoit des solutions personnalisées regroupant plus de 30 équipements différents. Les différents équipements sont combinés pour réaliser une ligne complètement automatisée répondant aux besoins du client selon les critères définis. Pour la simulation, une famille de produit a été prise pour exemple. Les équipements de la ligne de palettisation ont été utilisés et correspondent à environ 40 % des besoins client. Ce type de ligne de production a été sélectionné afin de représenter le plus fidèlement possible la production de l'entreprise tout en simplifiant le besoin de données nécessaires à la conception de la simulation. L'entreprise fabrique les équipements sur demande. La Figure 5.2 représente le processus d'une commande dans l'entreprise. La suite de la section détaille le cheminement de la commande.

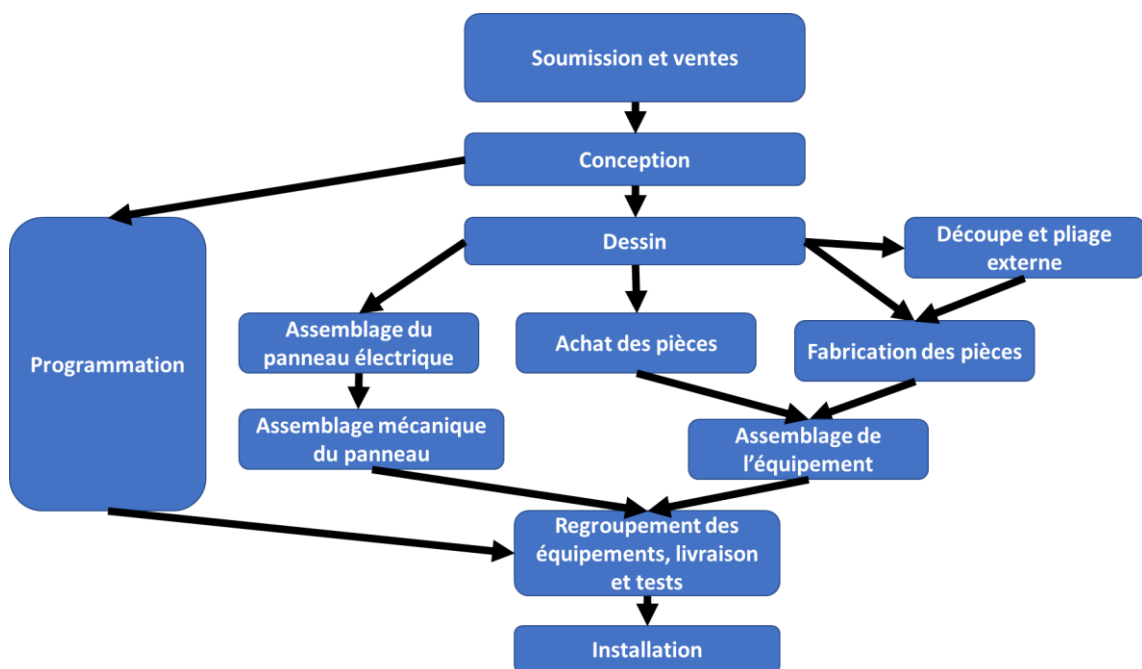


Figure 5.2: Représentation du processus d'une commande pour l'entreprise

Le processus d'une commande débute par l'étape de la soumission qui ne sera pas considérée comme limitante dans cette étude. Une fois la commande confirmée, l'équipe de conception réalise conçoit les équipements requis et envoie les dessins à l'équipe de dessinateurs qui finalise le tout pour la fabrication. L'achat des pièces est alors réalisé

(étape considérée comme non limitante dans la simulation). Les plans de fabrication sont envoyés à la mise en production. Les pièces sont fabriquées selon la gamme d'usinage. La majorité des pièces sont découpées au laser et pliées au besoin par un sous-traitant externe. Le processus de fabrication comprend les postes de travail suivants : Découpe (SCIE), fraisage (MILL), tournage (TOUR), tournage numérique (TOUN), soudure (SOU), pliage (PLI), peinture (PEIN) et fraiseuse Kiheung (FRAK). Une fois toutes les pièces d'un équipement d'un projet terminées et les quincailleries commandées reçues, le projet passe au département d'assemblage mécanique. Les équipements d'un même projet sont assemblés en parallèle, mais on ne retrouve pas plus d'un assembleur sur chaque équipement. Chaque projet comprend un assemblage du panneau électrique. Lorsque tous les équipements et le panneau électrique d'un projet sont assemblés, les équipements sont regroupés et livrés au client par camion.

Les étapes d'installation, de test et de programmation ne se retrouvent pas dans la simulation. L'étape d'installation n'est pas considérée dans la simulation puisqu'elle se déroule après la livraison des équipements. Elle ne limite pas la quantité d'équipements fabriqués par année. Les ressources d'installation sont généralement utilisées sur les postes de travail d'assemblage mécanique et électrique. Cependant, le nombre de travailleurs a été fixé pour la simulation à un nombre correspondant au nombre de ressources moyen disponible pour le montage. L'équipe d'installation devra être augmentée en conséquence des gains estimés par la simulation. Les étapes de test et de programmation ne sont pas considérées dans la simulation puisqu'elles se déroulent en parallèle de toutes les autres étapes. Ces ressources n'entrent pas en conflit avec d'autres postes de travail. Les mêmes gains seront réalisés pour l'équipe de programmation que pour l'équipe de conception. Puisque l'équipe de conception est actuellement goulot dans l'entreprise, la programmation et les tests n'auront pas d'impact sur les résultats de la simulation. Ces étapes sont retirées afin de limiter le bruit occasionné par ces étapes supplémentaires et afin de simplifier la simulation.

Une image du modèle de simulation se retrouve à la Figure 5.3. Chaque encadré représente un type de poste de travail ou un regroupement de postes de travail. Les départements sont

associés aux couleurs suivantes : Création de commande (gris), conception (orange), dessin (bleu), regroupement des postes de travail de fabrication des pièces (vert), sous-traitance externe (violet), assemblage électrique (rose), assemblage mécanique (jaune), regroupement des sections pour la livraison et livraison (turquoise), sous-assemblage des sections (rouge).

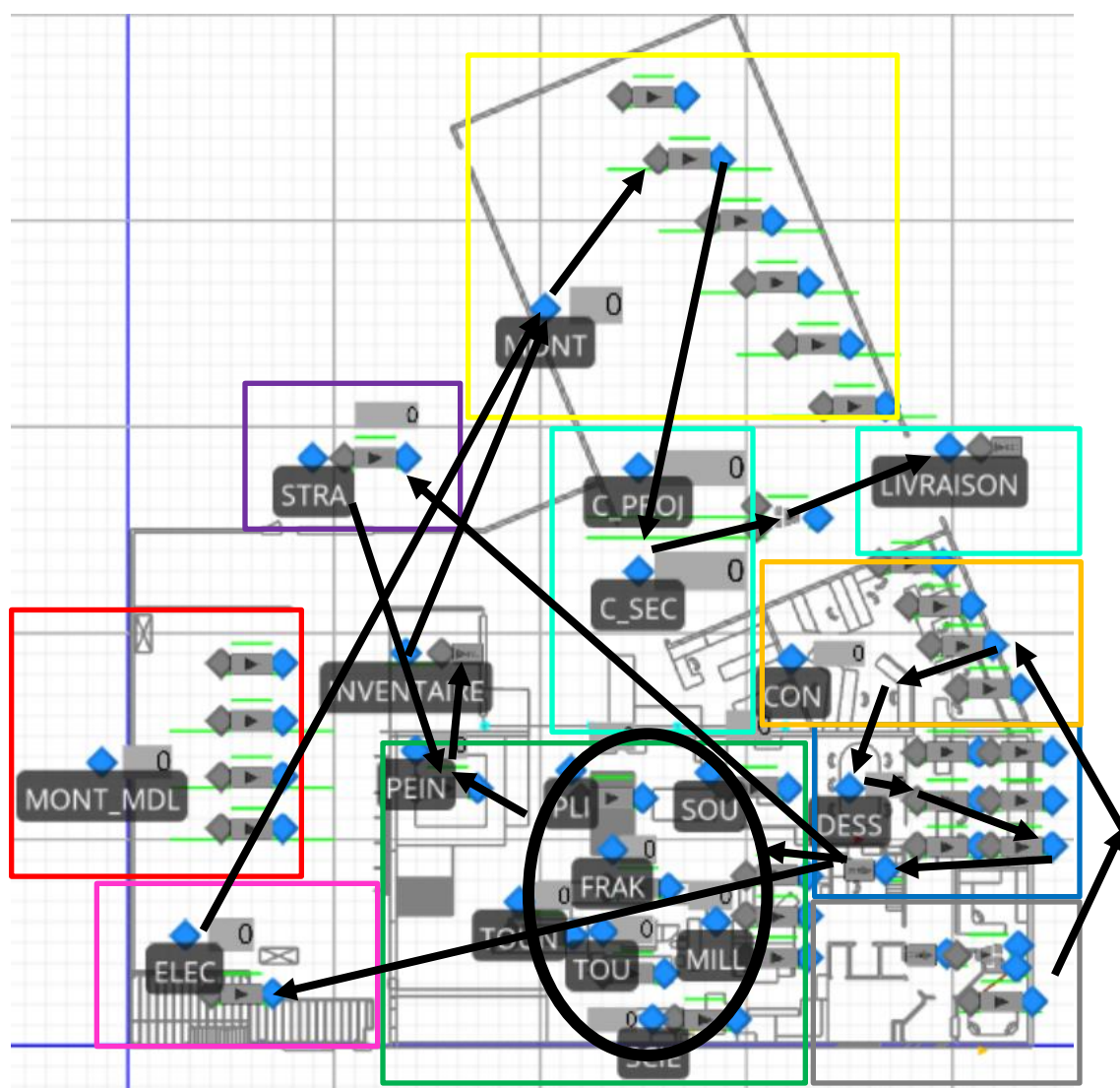


Figure 5.3: Représentation du logiciel de simulation Simio

Le modèle de simulation démarre avec la création de sept projets pour remplir le système, soit le nombre moyen de projets en cours dans l'entreprise. Chacun des projets se voit

attribuer un numéro de projet, une priorité et un nombre d'équipements. Le nombre et les proportions de ventes des équipements varient selon les données historiques de l'entreprise (2018 à 2021) et sont présentés au Tableau 5.2. Les équipements sont créés et associés au projet.

Tableau 5.2: Analyse Pareto des équipements d'un projet de palettisation

Nom de l'équipement	Quantité	Pourcentage
Convoyeur à chaîne	11	16,2 %
Convoyeur à courroie	9	13,2 %
Préhenseur	7	10,3 %
Périmètre de sécurité	7	10,3 %
Magasin de palette	7	10,3 %
Robot	7	10,3 %
Magasin de carton	5	7,4 %
Convoyeur Balance	3	4,4 %
Convoyeur à gravité	3	4,4 %
Convoyeur niveleur	3	4,4 %
Ensacheuse	2	2,9 %
Enrubanneuse	2	2,9 %
Convoyeur de préhension	1	1,5 %
Coucheur de sac	1	1,5 %
Total	68	100,0 %

La conception du projet et de chacun des équipements débute ensuite. Chaque poste de conception saisit une ressource disponible ayant les compétences pour ce poste de travail ainsi qu'un équipement dans l'ordre de priorité établi et effectue la tâche requise selon les temps historiques. Le même processus est suivi pour le poste de dessin.

En quittant le poste de dessin, le dessin de l'équipement se dirige au montage. La section du projet attend que toutes les pièces soient fabriquées. Au même moment, toutes les pièces nécessaires à l'assemblage de la section sont mises en production. Les pièces ont un attribut de priorité identique au dessin de l'équipement nécessitant les pièces. Chaque pièce se dirige d'un poste de travail à un autre selon la gamme de fabrication établie. La gamme de fabrication, les temps de production et de mises en course par poste de travail et la nomenclature requise pour la soudure est spécifique à chacune des 954 pièces du

modèle de simulation. Lorsque les étapes de la gamme de fabrication sont terminées, la pièce se retrouve en inventaire.

Une fois toutes les pièces de l'équipement terminées et disponibles, elles sont déduites de l'inventaire selon les quantités requises et l'équipement devient disponible pour l'assemblage.

Les équipements d'un projet assemblés attendent que toutes les sections du projet soient terminées d'assemblées avant d'être regroupées pour la livraison. En parallèle de la fabrication des sections du projet, le dessin du projet lui-même passe par le poste de montage électrique pour qu'un travailleur assemble le panneau électrique. Le projet se retrouve ensuite au même endroit que ses équipements associés pour le regroupement avant la livraison.

Lorsque le projet quitte l'usine, une nouvelle commande entre en conception de façon qu'il y ait toujours sept projets dans le système.

5.3 Données de la simulation

Les données historiques de l'entreprise ont été utilisées pour la simulation de l'entreprise. Les données proviennent d'extraction de la base de données du logiciel de gestion de la production de l'entreprise nommé Gifsum. Voici la liste des données de l'entreprise utilisées pour la simulation :

- Nombre de projets livrés par année.
- Proportion des ventes de chacun des équipements dans les projets.
- Temps de dessin et de conception de chaque équipement.
- Liste de pièces prérequisées avec quantité à la fabrication de chaque pièce.
- Gamme de fabrication des pièces.
- Temps d'opération pour chaque pièce, assemblage et équipement pour chacun des postes de la gamme de fabrication.
- Nombre de travailleurs pour chacun des postes de travail à la fabrication, au dessin, à la conception et à l'assemblage.

- Nombre de postes de travail à la fabrication, au dessin, à la conception et au montage.
- Temps de mise en course pour chacun des postes de travail à la fabrication.
- Délai d'obtention des pièces fabriquées en sous-traitance.
- Nombre de projets en cours dans l'usine en moyenne.

La simulation utilise les temps de production d'un seul projet pour chacun des équipements. Puisque l'entreprise fabrique des équipements personnalisés, il est difficile d'obtenir une distribution des temps de fabrication pour chacune des pièces. Basé sur l'expérience du directeur de production et des données historiques des pièces produites à répétition, il a été possible de déterminer une distribution qui a été généralisée pour toutes les pièces. Les temps de production entrés dans la simulation correspondent à une loi triangulaire ayant une borne minimale à 70 % du temps de production de la pièce, un temps médian correspondant au temps de production historique de la pièce et une borne maximale à 130 % du temps de production historique de la pièce.

5.4 Hypothèses limitatives

Les hypothèses limitatives suivantes définissent les éléments qui n'ont pas été considérés ou qui n'ont pas été pris en compte dans la simulation. Ces hypothèses ont permis de simplifier le modèle de simulation et de limiter le temps de simulation tout en maintenant la validité des résultats. Ces hypothèses ont permis de fixer certains facteurs afin de limiter la variation de l'environnement qui aurait pu avoir un impact parfois positif, parfois négatif sur les résultats. Voici la liste d'hypothèses limitatives :

- Les temps de déplacements, de transport et de partage d'information au niveau de l'assemblage, du dessin et de la conception sont considérés comme inclus dans les temps de conception, de dessin et d'assemblage.
- Les temps engendrés par les problèmes techniques ou informatiques sont inclus dans les temps de dessins et de conception.

- Le temps nécessaire à l'équipe de programmation est exécuté pendant le temps de conception, dessin, assemblage et fabrication de façon à ne jamais occasionner de retard.
- Les machines sont considérées fiables et bien maintenues.
- Les temps de travail autre que pour la production (rencontres, formations, etc.) sont considérés comme négligeables pour les travailleurs de production, les dessinateurs et les assembleurs. Ces mêmes temps sont considérés comme réalisés dans les temps hors production pour les concepteurs étant donné le faible taux d'utilisation de ces ressources.
- Le transport des pièces terminées est réalisé par le commis en parallèle des autres opérations.
- La qualité des pièces fabriquées est considérée comme parfaite.
- La répartition des équipements fabriqués est modélisée en fonction des projets de palettisation standard de l'entreprise de l'année 2020 et 2021.
- Le modèle de simulation présente une quantité de commandes infinie de façon qu'il y ait toujours sept projets dans le système empêchant les creux de commandes.

5.5 Validation du modèle de simulation

Pour valider le modèle, les étapes suivantes ont été réalisées :

1. Conception du modèle de simulation par étape avec un nombre de pièces minimum et validation visuelle ou quantitative à chacune des étapes ajoutées.
2. Validation du modèle avec un nombre de pièces restreint pour valider le fonctionnement du déplacement des opérateurs et des pièces dans le système.
3. Validation du temps moyen de valeur ajoutée, simulé et théorique avec un groupe de pièces restreint.
4. Validation de l'augmentation et la diminution des inventaires avec la livraison des assemblages, des équipements et des projets.
5. Valider le nombre de projets dans le système.

6. Valider le taux d'utilisation des différentes ressources.
7. Valider le nombre de projets livrés par année par rapport au nombre de projets réellement livrés chez l'entreprise.
8. Valider le nombre de pièces en attente devant chacun des postes de travail ainsi que le nombre d'équipements en attente de livraison avec le projet principal.
9. Validation des différents types d'entités par l'utilisation de couleurs distinctes et d'identifications visuelles telles que le nom, la priorité et la quantité pour les pièces, les assemblages, les sections et les projets.
10. Validation des temps de production, de l'utilisation adéquate des ressources et des postes de travail avec l'écran « Planning » du logiciel et avec un projet déterministique.
11. Valider que toutes les pièces de la nomenclature soient terminées avant le début de la fabrication d'une pièce (Exemple : Pièces découpées au laser nécessaire à la fabrication d'un assemblage soudé).
12. Confirmer la valeur de certains résultats avec l'entreprise tels que les taux d'utilisation des postes de travail et des travailleurs.

5.6 Évaluation du régime permanent

Lors du démarrage d'une simulation, l'usine virtuelle n'a pas de commande ni de pièces en cours de fabrication. Cela a pour impact de fausser les résultats de la simulation en diminuant le temps de livraison et en augmentant le nombre de projets fabriqués par période. Pour représenter la réalité, les premiers temps de la simulation n'ont pas été considérés dans les résultats. Pour évaluer le temps de réchauffement, le temps de livraison à chaque livraison de projet a été tracé graphiquement sur une période de 8887,5 heures, soit l'équivalent de 5 années de travail réel. Le graphique utilisé pour déterminer le temps de réchauffement se retrouve à la Figure 5.4.

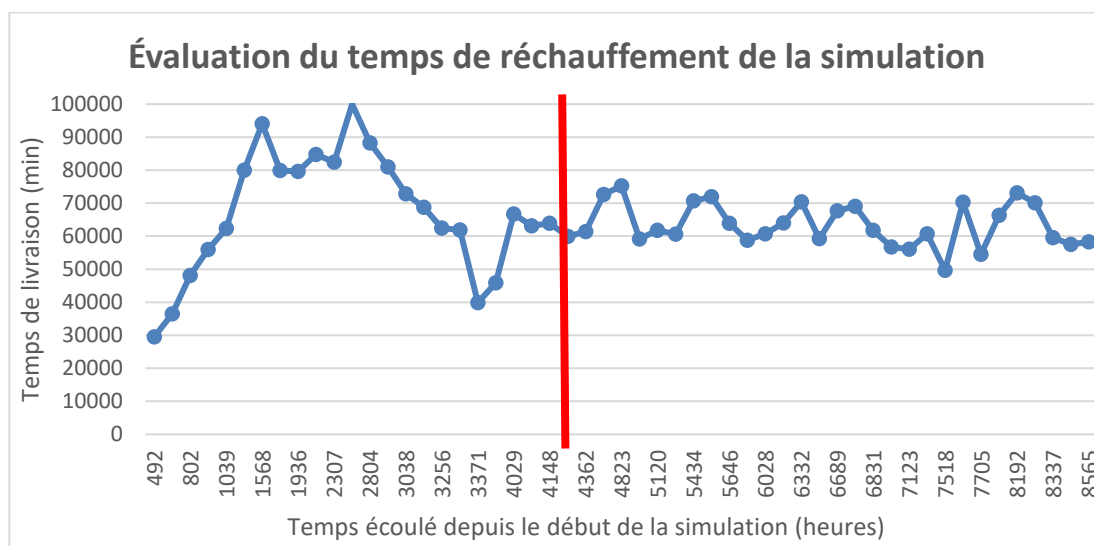


Figure 5.4: Évaluation du temps de réchauffement de la simulation

En observant le graphique ci-dessus, il est possible de remarquer une réduction de la variation au niveau du temps de livraison des projets après une certaine période. Le temps de réchauffement est défini au moment de cette réduction de la variation, soit à 4200 heures suivant le début de la simulation, soit 2.363 années travaillées.

La durée de la simulation a été établie à 5 années, soit 8887,5 heures. Cette période est utilisée dans le but d'obtenir un résultat suffisamment grand pour réduire l'impact de la variation d'une unité sur le nombre de projets livrés par simulation.

5.7 Description de l'opérationnalisation des variables

Dans le but de comprendre les changements apportés au modèle de simulation, la présente section décrit les modifications apportées à la simulation pour obtenir les résultats.

Conception modulaire (A)

L'objectif du plan stratégique de l'entreprise est d'atteindre 80 % de produits standards. Pour opérationnaliser la variable de conception modulaire, 80 % des équipements fabriqués les plus fréquemment ont été considérés comme standards. Pour ces équipements, le temps de conception est réduit de 90 % et le temps de dessin technique est réduit de 32 % lorsque la variable est au niveau 1.

Ces deux valeurs ont été obtenues en comparant les données de l'entreprise pour deux équipements de type convoyeur à chaîne similaires, l'un standard et l'autre non standard. Les temps de conception et de dessin actuels de l'entreprise ont été conservés lorsque la variable est au niveau 0.

JAT & Kanban (B)

Un avis technique de l'équipe d'ingénierie de l'entreprise a permis de déterminer les pièces pouvant ou ne pouvant pas être standardisées. Seules les pièces standards sont maintenues en kanban. La variable Kanban est opérationnalisée en fabriquant des lots de production de pièces correspondant à trois mois d'utilisation de la pièce. Prendre note que la variable a été opérationnalisée selon l'utilisation actuelle de ce qui est appelé Kanban dans l'entreprise. Les pièces sont ensuite maintenues en inventaire et utilisées de l'inventaire lorsque requises pour un équipement lorsque la variable est au niveau 1. Si la variable est au niveau 0, toutes les pièces sont produites sur mesure pour le projet. Aucun inventaire de pièces n'est conservé dans cette situation.

Aménagement flexible & assemblage en parallèle (C)

La division du temps d'assemblage mécanique et électrique pour chacune des parties de chaque équipement a permis de paralléliser les opérations d'assemblage. L'expérience du directeur du département d'assemblage de l'entreprise a été utilisée afin de définir quelles parties de chaque équipement peuvent être assemblées en parallèle. Les temps d'assemblage ont ensuite été définis en répartissant le temps d'assemblage de l'équipement pour chaque partie. Lorsque la variable « Aménagement flexible & assemblage en parallèle » est au niveau 1, les différentes parties des équipements peuvent être assemblées en parallèle. Lorsque le niveau est à 0, les différentes parties de l'équipement doivent être assemblées en série.

Intranet & écrans à chaque poste de travail (D)

Pour opérationnaliser cette variable, le temps de déplacement des travailleurs au poste de l'horodateur a été mesuré en entreprise. Le temps moyen mesuré était de 2 minutes. Le

temps de mise en course de la pièce est réduit du ratio du temps de déplacement à l'horodateur sur le temps de mise en course moyen par poste de travail. Ce ratio est soustrait lorsque la variable était au niveau 1 et les temps de production initiaux de l'entreprise ont été conservés lorsque la variable était au niveau 0.

Indicateurs de performance, Amélioration continue & Lean (E)

Le regroupement des variables indicateurs de performance, amélioration continue et Lean a permis d'accorder de l'importance aux indicateurs de performance dont le gain est difficilement quantifiable. En entreprise, le ratio charge sur capacité des postes d'usinage, dont l'aménagement, est de type atelier qui permet de cibler le goulot. L'évaluation des composantes du taux de rendement global, des postes goulot en entreprise, a permis de mieux cibler les solutions à mettre en place. Dans le cas de l'entreprise, c'est le taux d'efficacité qui est le plus faible des trois composantes du taux de rendement global pour les postes goulot. Cependant, l'augmentation du taux de disponibilité était moins coûteuse et plus facile à implanter. L'équipe d'amélioration continue peut ainsi mettre en place des outils tels que le SMED pour améliorer la situation. Seule une amélioration est réalisée sur les postes goulots puisque le nombre de ressources disponibles pour l'amélioration est limité et que la culture d'amélioration commence seulement à se faire sentir chez l'entreprise. Cette limitation vient mieux représenter la réalité de l'entreprise alors que plusieurs outils du Lean pourraient être mis en place afin d'obtenir un gain plus intéressant.

Pour l'opérationnalisation de cette variable, le taux d'utilisation des ressources de la simulation permet d'identifier le goulot au niveau des postes de l'usinage. Dans ce cas-ci, le poste de peinture ainsi que le travailleur réalisant les pièces sur la fraiseuse Kiheung et le tour numérique sont les postes goulots de l'usinage. Une évaluation des gains sur le temps de mise en course pour ces deux postes de travail a été réalisée en utilisant la technique SMED, soit un outil du Lean. Lorsque la variable était à 0, les temps initiaux étaient utilisés. Lorsque la variable était à 1, le temps de mise en course de chacune des

pièces pour le poste de peinture était diminué de 60 % et de 20 % pour le poste de la fraiseuse Kiheung.

Ces réductions ont été évaluées en collaboration avec le directeur de production selon les outils de la technique SMED. Pour le poste de la fraiseuse, la diminution correspond au temps de nettoyage de la machine d'environ 45 minutes par jour qui est effectué par un autre travailleur à un moment de la journée où l'équipement n'est pas utilisé. Pour la peinture, la réduction correspond au temps d'accrochage et de décrochage des pièces maintenant réalisé par un autre travailleur. Cette tâche peut être réalisée en parallèle de la peinture des pièces.

5.8 Hypothèses statistiques

Cette section présente les hypothèses statistiques vérifiées dans la section analyse de la présente étude. Les conclusions de l'analyse des résultats du plan d'expérience valident ou infirment les hypothèses prises dans cette section. Ces hypothèses viennent compléter l'hypothèse principale de cette recherche, soit que l'agilité et l'Industrie 4.0 ont un impact sur la compétitivité des PME.

Hypothèse 1 – La conception modulaire des produits les plus vendus contribue au succès de l'implantation de l'Industrie 4.0.

L'utilisation de produits modulaires permet de réduire le temps de conception et de dessins des équipements. L'utilisation de dessins d'équipement, de pièces et d'assemblage déjà conçus permet d'obtenir un gain de temps considérable. La standardisation sous la forme de modèles s'attachant à une plateforme commune permet de mieux répondre aux besoins spécifiques des clients et de maintenir un produit personnalisé. L'entreprise conçoit une plateforme standard de base à laquelle les modules viennent s'attacher selon les besoins du client. La conception modulaire permet et facilite l'implantation d'autres projets tels qu'un changement vers une production à flux tiré, la création de guides et de gabarits, une production de pièces en lot, la fabrication de modèles ou de pièces à l'externe, l'assemblage en parallèle des modules, une prévision des charges par poste de travail plus juste, etc.

Hypothèse 2 – L’application d’une approche Juste-À-Temps par la mise en place de Kanban pour les pièces standards augmente la performance de l’entreprise.

Après la création des produits modulaires, le maintien en inventaire des pièces standards selon les quantités utilisées sous forme de Kanban permet une production en petits lots. Étant donné le temps de mise en course constant entre une pièce et plusieurs pièces, la production de pièces identiques sur un même bon de travail réduit le temps de mise en course par pièce. La production de petits lots diminue le temps de production moyen par pièce et augmente le nombre de pièces produites par poste de travail pour une période donnée.

Hypothèse 3 – Un aménagement de production flexible permettant l’assemblage en parallèle des différentes parties d’un équipement augmente la performance de l’entreprise.

L’aménagement de production flexible permet de déplacer et revoir la position des équipements plus facilement qu’à l’ordinaire. Pour l’assemblage, cela signifie qu’un assembleur peut assembler plusieurs modèles différents dans la même journée en déplaçant les chariots de pièces à sa disposition. Plusieurs assembleurs peuvent ainsi assembler différentes sections d’équipements en même temps. Ces modèles sont par la suite assemblés sur la plateforme lorsque tous les modèles sont terminés.

Hypothèse 4 – Un intranet avec un écran à chaque poste de travail permet de réduire les déplacements des travailleurs à l’usinage menant à l’augmentation de la performance de l’entreprise.

Un intranet à chacun des postes de travail permet d’éviter les déplacements de chacun des travailleurs au poste d’impression des étiquettes et de l’horodateur. On évite un déplacement au début et un déplacement à la fin de chaque pièce. Les pièces peuvent ensuite être déplacées par le commis déjà présent en entreprise qui possède du temps disponible actuellement.

Hypothèse 5 – La mise en place d’indicateurs de performance permettant de cibler le goulot de l’usine combiné à l’utilisation d’outils d’amélioration continue et du Lean sur ce poste de travail permet d’augmenter la performance de l’entreprise.

Le goulot peut être ciblé en utilisant un indicateur tel que le taux d’utilisation des postes de travail ou un ratio charge sur capacité. La mise en place d’indicateurs de performance tels que les composantes du TRG, soient le taux de qualité, le taux de disponibilité et le taux d’efficacité à chacun des postes de travail permet ensuite de cibler rapidement la composante du TRG à améliorer. Les actions à prendre sur le goulot deviennent alors beaucoup plus ciblées. L’entreprise peut utiliser les outils du Lean ou d’autres outils d’amélioration pour améliorer la composante du TRG de ce poste de travail.

5.9 Conception du plan d’expérience

5.9.1 Modèle mathématique

L’équation qui représente le modèle mathématique est la suivante :

$$Y_{ijklm} = \mu + A_i + B_j + C_k + D_l + E_m + AB_{ij} + AD_{il} + BD_{jl} + BE_{jm} + \varepsilon_{ijklm}$$

Ou

μ : Moyenne des réponses mesurées.

A_i : Variation causée par le niveau i de la variable « JAT & Kanban ».

B_j : Variation causée par le niveau j de la variable « Conception modulaire ».

C_k : Variation causée par le niveau k de la variable « Aménagement flexible & assemblage en parallèle ».

D_l : Variation causée par le niveau l de la variable « Intranet & écrans à chaque poste de travail ».

E_m : Variation causée par le niveau m de la variable « Indicateurs de performance, Amélioration continue & Lean ».

AB_{ij} : Variation causée par l'interaction entre le niveau i de la variable « JAT & Kanban » et le niveau j de la variable « Conception modulaire ».

AD_{il} : Variation causée par l'interaction entre le niveau i de la variable « JAT & Kanban » et le niveau l de la variable « Intranet & écrans à chaque poste de travail ».

BD_{jl} : Variation causée par l'interaction entre le niveau j de la variable « Conception modulaire » et le niveau l de la variable « Intranet & écrans à chaque poste de travail ».

BE_{jm} : Variation causée par l'interaction entre le niveau j de la variable « Conception modulaire » et le niveau l de la variable « Indicateurs de performance, Amélioration continue & Lean ».

$\varepsilon_{o(ijklm)}$: Erreur expérimentale à chaque combinaison.

Y_{ijklm} : Réponse mesurée (Nombre de projets livrés par période de 5 années de production).

Les interactions ont été sélectionnées en discutant avec les experts de l'entreprise. Les interactions étudiées sont principalement au niveau de la standardisation et des écrans de production. Les interactions AB (JAT & Kanban et Conception modulaire) et BE (Conception modulaire et Indicateurs de performance, Amélioration continue & Lean) sont choisies principalement puisque le goulot actuel de l'usine est le département de conception et dessin. La combinaison d'une variable avec la conception modulaire aura un effet différent que la variable seule. Les interactions AD (JAT & Kanban et Intranet & écrans à chaque poste de travail) et BD (Intranet & écrans à chaque poste de travail et Conception modulaire) sont choisies puisqu'elles représentent les effets principaux de l'implantation des premières technologies de l'Industrie 4.0 en PME manufacturière.

5.9.2 Plan d'expériences TAGUCHI L16

Le plan orthogonal Taguchi L16 utilisé réduit le nombre d'expériences à réaliser tout en maintenant la précision des analyses réalisées. Le plan L16 choisi permet d'obtenir un nombre de degrés de liberté suffisant pour l'erreur par rapport au nombre de degrés de

liberté utilisés pour les variables considérant l'analyse de cinq variables à deux niveaux et de quatre interactions. Le niveau de chacune des variables est présenté pour les 16 expériences dans le Tableau 5.3. Le nombre de réplifications de la simulation pour chacune des seize expériences est fixé à cinq.

Tableau 5.3: Plan TAGUCHI L16

Expérience	A	B	AB	C				D	AD	BD			BE		E
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
3	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1
4	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
5	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1
6	0	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	0	0
7	0	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0
8	0	1	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1
9	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1
10	1	0	1	0	1	0	1	1	0	1	0	1	0	1	0
11	1	0	1	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0	1	0
12	1	0	1	1	0	1	0	1	0	1	0	0	1	0	1
13	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0
14	1	1	0	0	1	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1
15	1	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0	1	0	0	1
16	1	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0	1	1	0

La Figure 5.5 présente l'attribution des colonnes du plan d'expérience L16 Taguchi dans le graphe linéaire sélectionné pour le plan d'expérience. Le choix de ce graphe résulte du fait qu'il répond au besoin de l'étude. Ce graphe permet de choisir les interactions doubles voulues ainsi qu'un maximum de cinq facteurs. Le graphe présente les cinq variables indépendantes ainsi que les quatre interactions sélectionnées. Le graphe présente aussi le numéro de colonne de chaque variable étudiée correspondant au numéro de colonne du Tableau 5.3.

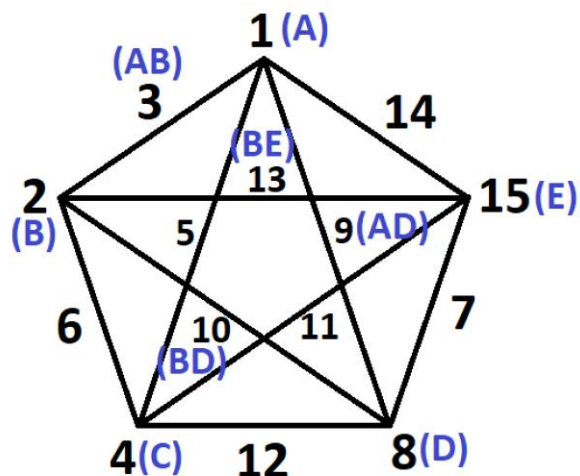


Figure 5.5: Graphe linéaire des interactions associé au plan Taguchi L16 sélectionné

5.10 Résultats de la simulation

5.10.1 Résultats du plan d'expérience TAGUCHI L16

Le Tableau 5.4 présente le nombre de projets livrés pour chacune des répliques des 16 expériences. Les colonnes du plan Taguchi correspondent au niveau de chacune des cinq variables indépendantes. Les résultats correspondent à une période de simulation de la production de 5 années consécutives. Cette période ne prend pas en compte les données de la période de réchauffement.

Une certaine incohérence est présentée au niveau du plan d'expérience puisqu'il est impossible d'avoir des pièces gérées sous forme de Kanban en n'ayant pas de produits standards. L'ordre d'implantation des solutions est important pour cette raison et sera discuté dans l'analyse.

Tableau 5.4: Résultats du plan d'expérience TAGUCHI L16 en nombre de projets livrés

Expérience	Colonne du plan TAGUCHI					Résultats					
	A	B	C	D	E	Nombre de projets livrés par 5 années					
	JAT & Kanban	Conception modulaire	Aménagement flexible & assemblage en parallèle	Intranet & écrans à chaque poste de travail	Indicateurs de performance, Amélioration continue & Lean	Rép.1	Rép.2	Rép.3	Rép.4	Rép.5	Moyenne
1	0	0	0	0	0	60	61	60	64	61	61,2
2	0	0	0	1	1	70	71	67	73	69	70
3	0	0	1	0	1	67	70	69	69	69	68,8
4	0	0	1	1	0	64	63	67	65	63	64,4
5	0	1	0	0	1	72	72	70	71	72	71,4
6	0	1	0	1	0	65	65	65	65	66	65,2
7	0	1	1	0	0	62	58	65	64	59	61,6
8	0	1	1	1	1	77	77	74	76	78	76,4
9	1	0	0	0	1	69	66	67	67	65	66,8
10	1	0	0	1	0	71	72	67	68	71	69,8
11	1	0	1	0	0	69	68	68	71	69	69
12	1	0	1	1	1	68	68	70	66	66	67,6
13	1	1	0	0	0	72	74	74	74	72	73,2
14	1	1	0	1	1	84	80	82	78	82	81,2
15	1	1	1	0	1	81	78	81	80	77	79,4
16	1	1	1	1	0	73	75	77	75	75	75

5.10.2 Analyse des résidus des expériences

Avant d'analyser les résultats, le graphique des valeurs résiduelles présenté en Figure 5.6 a permis de vérifier que les résidus sont distribués selon la loi normale. L'analyse a été réalisée sur le logiciel Minitab.

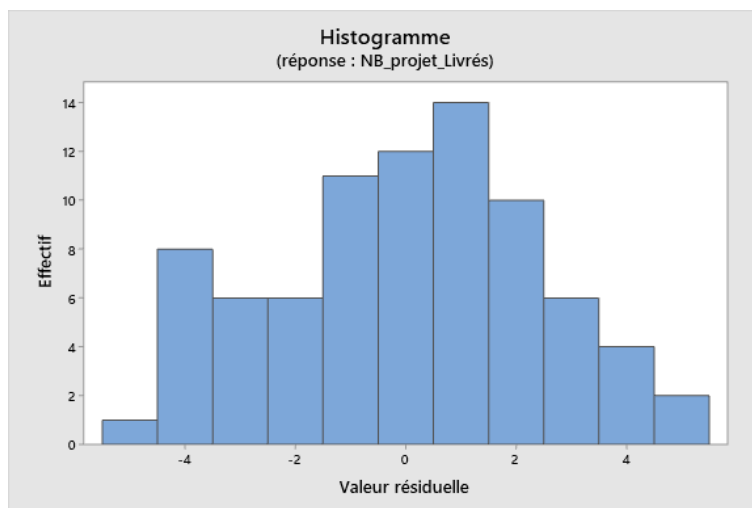


Figure 5.6: Graphique de distribution des valeurs résiduelles

5.10.3 Analyse de la variance des résultats du plan d'expérience

L'analyse de la variance (ANOVA) sur le modèle linéaire général des résultats du plan d'expérience est présentée dans le Tableau 5.5. L'analyse a été réalisée sur le logiciel Minitab. Le niveau de confiance a été établi à 95 % pour l'analyse ($\alpha = 5\%$). Cela signifie qu'une variable significative doit présenter une valeur de p inférieure ou égale au seuil de signification de 0,05. Une variable ayant une valeur de p supérieure à 0,05 est non significative.

Les variables principales significatives sont JAT & Kanban (A), Conception modulaire (B), Intranet & écrans à chaque poste de travail (D) et Indicateurs de performance, Amélioration continue et Lean (E). Ces quatre variables indépendantes ont un impact sur le nombre de projets livrés par période. La variable "Aménagement flexible & assemblage en parallèle" n'est pas significative.

L'ANOVA démontre aussi les interactions significatives suivantes :

- Conception modulaire ET Indicateurs de performance, Amélioration continue & Lean (BE).
- JAT & Kanban ET Conception modulaire (AB).

Tableau 5.5: Analyse de la variance (ANOVA) sur le modèle linéaire général

Source	Degré de liberté	Somme des Carrés ajusté	Carré moyen ajusté	Valeur F	Valeur de p
JAT & Kanban (A)	1	577,81	577,812	93,20	0,000
Conception modulaire (B)	1	655,51	655,512	105,73	0,000
Aménagement flexible & assemblage en parallèle (C)	1	3,61	3,613	0,58	0,448
Intranet & écrans à chaque poste de travail (D)	1	103,51	103,513	16,70	0,000
Indicateurs de performance, Amélioration continue & Lean (E)	1	556,51	556,513	89,77	0,000
JAT & Kanban * Conception modulaire (AB)	1	201,61	201,613	32,52	0,000
V_KANBAN* Intranet & écrans à chaque poste de travail (AD)	1	19,01	19,013	3,07	0,084
Conception modulaire * Intranet & écrans à chaque poste de travail (BD)	1	12,01	12,013	1,94	0,168
Conception modulaire * Indicateurs de performance, Amélioration continue & Lean (BE)	1	189,11	189,112	30,50	0,000
Erreur	70	433,98	6,200		
Inadéquation de l'ajustement	6	245,18	40,863	13,85	0,000
Erreur pure	64	188,80	2,950		
Total	79	2752,69			

La Figure 5.7 présente la moyenne des résultats de chacune des cinq variables principales pour leur niveau respectif sur le nombre de projets livrés. Ce graphique vient appuyer l'ANOVA et donner un visuel aux effets des variables indépendantes. Bien que la variable *Aménagement flexible & assemblage en parallèle* (C) ne soit pas significative, elle présente tout de même une tendance à la hausse qui se traduit par un impact positif. Toutes les autres variables démontrent un impact fortement positif en particulier pour les variables A, B et E.

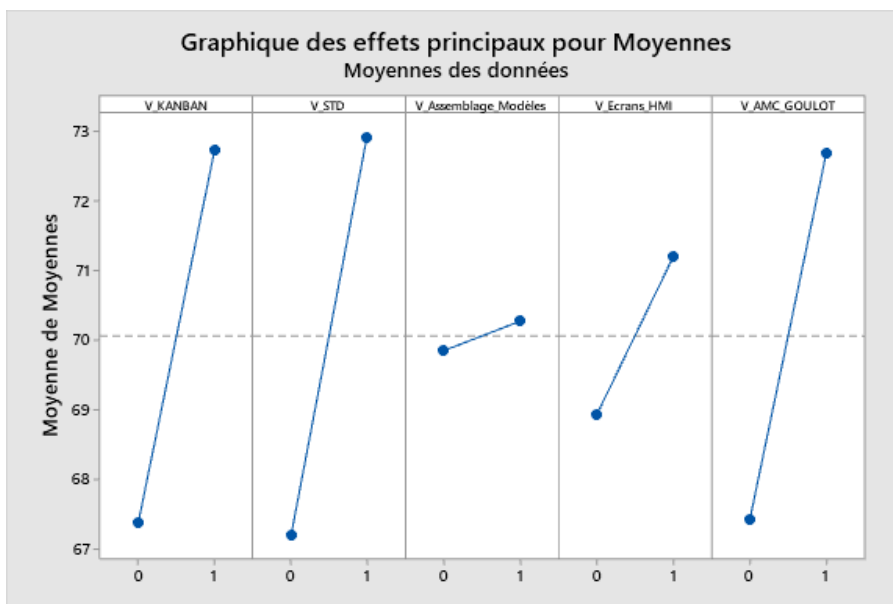


Figure 5.7: Résultats graphiques de l'impact de chacune des variables indépendantes

La Figure 5.8 présente l'effet de l'interaction des variables Conception modulaire et JAT & Kanban (AB) sur le nombre de projets livrés. La conception modulaire (B) de même que le JAT & Kanban (A) ont chacun un impact positif sur la variable dépendante. Cependant, lorsque ces variables sont combinées, elles ont un impact plus important que la somme de leurs impacts individuels.

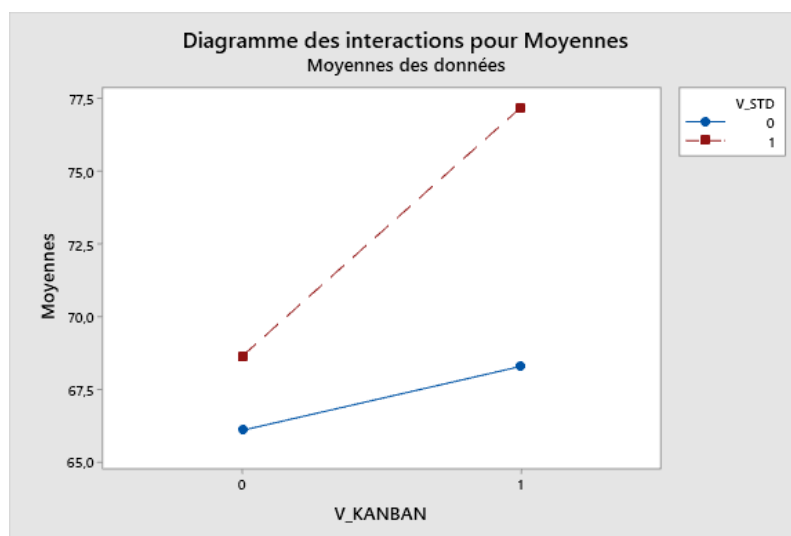


Figure 5.8: Graphique de l'interaction Conception modulaire et JAT & Kanban

La Figure 5.9 présente l'effet de l'interaction entre la conception modulaire et la variable Indicateurs de performance, Amélioration continue & Lean (AE). Cette figure présente des droites très similaires à la figure précédente. Il est aussi possible de remarquer que la combinaison de ces deux variables a un impact plus important que la somme des impacts individuels de chacune de ces deux variables.

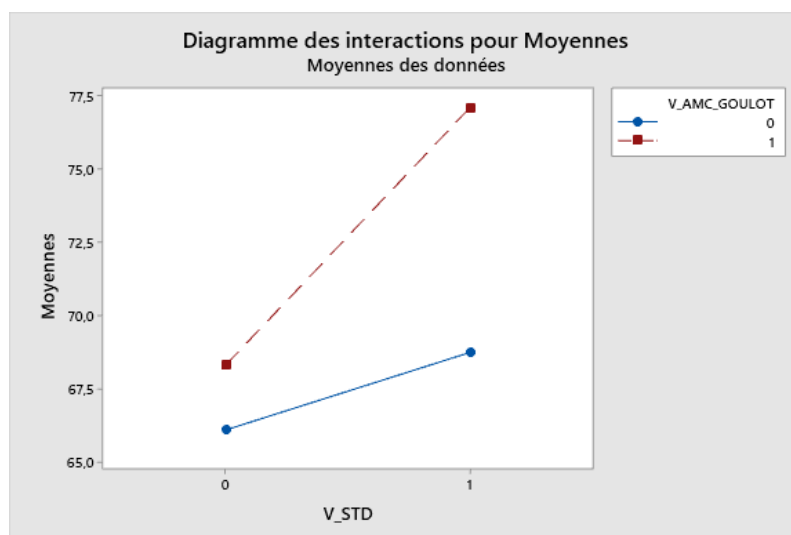


Figure 5.9: Graphique de l'interaction Conception modulaire et Indicateurs de performance, Amélioration continue & Lean

5.11 Analyse des résultats de simulation

Les résultats démontrent que la meilleure combinaison consiste à mettre en place une conception modulaire pour les produits les plus vendus (B), maintenir les pièces standards en Kanban dans une approche JAT (A), implanter des écrans de production à chacun des postes de travail (D) et améliorer la composante du TRG la plus faible du ou des postes goulot avec les outils du Lean (E). L'implantation d'un aménagement flexible (C) n'est pas significative, mais pourrait offrir un gain quoique beaucoup plus faible que les autres variables.

L'implantation de la combinaison de solution contenant les quatre variables significatives par rapport à la situation initiale de l'entreprise offre un gain estimé par la simulation de 32,7 % d'augmentation de la performance de l'entreprise. Ce pourcentage provient du calcul suivant et des données du Tableau 5.4 : $(81,2-61,2)/61,2*100=32,7\%$.

Cela signifie que l'entreprise peut augmenter son chiffre d'affaires en conservant les mêmes actifs. Nécessairement, les coûts de quincailleries et des matières premières augmenteront proportionnellement à l'augmentation du nombre de projets. Les coûts du personnel augmenteront puisque l'implantation de ces solutions nécessite des ressources. Cependant, les mêmes ressources de production et d'assemblage sont utilisées. Une quantité de temps considérable est nécessaire au niveau du département de conception et de dessin afin de concevoir les premiers modules standards pour un équipement.

L'aménagement de production flexible permettant l'assemblage en parallèle est opérationnalisé dans la simulation par la possibilité d'assembler en simultané des modules d'un même équipement. Le faible nombre d'équipements fabriqués par l'entreprise où il est possible de réaliser l'assemblage en parallèle occasionne un faible impact. La conception des produits actuels est inadéquate pour se diriger vers l'assemblage en parallèle. Des interfaces clairement définies entre les modules, la présence de module électrique ou pneumatique et la conception d'une plateforme pour accueillir les modules semblent être des conditions de réussites pour se diriger vers l'assemblage en parallèle. D'autres recherches à ce sujet permettraient de déterminer les conditions de réussite ainsi que l'impact de ces solutions. Une meilleure conception modulaire des produits permettrait d'augmenter le nombre de modules pouvant être assemblés en parallèle et ainsi obtenir un gain de temps plus important. L'entreprise doit mettre l'accent sur le développement d'interface entre les modèles et la plateforme de l'équipement. Cette conception permettra l'assemblage en parallèle, mais surtout la fabrication par des fournisseurs externes afin de s'orienter vers le concept d'entreprise réseau.

Les Kanban & JAT (A), les produits modulaires (B) et l'amélioration du goulot par une démarche Lean ciblée par la mise en place d'indicateurs de performance (E) ont un impact plus important sur le nombre de projets livrés par année dans la Figure 5.7. Les résultats laissent sous-entendre que ces trois variables ayant un impact positif supérieur doivent être priorisées en entreprise.

La création de produits modulaires (B) doit être la première démarche amorcée par l'entreprise. Elle doit être priorisée face aux deux autres variables puisque les pièces non standardisées ne peuvent être mises en Kanban et mener à une approche visant le JAT. Les Kanbans & JAT (A) doivent être mis en place après la création de produits modulaires (B). Dans le cas de l'entreprise, le département goulot est l'équipe d'ingénierie. Il est préférable pour l'entreprise de mettre en place une solution qui augmentera la capacité de production du goulot que d'améliorer un poste de travail en surcapacité. L'amélioration d'un poste à l'usinage n'aurait pas d'impact sur le nombre de projets livrés par année. La solution à mettre en place en premier peut varier d'une entreprise à l'autre puisque le goulot peut être dans un département différent.

Après la standardisation des équipements sous forme de produits modulaires (B), les pièces standards peuvent alors être mises en production par petits lots (A) pour obtenir une économie de lot sur le coût par pièce fabriquée à l'externe et à l'interne et ainsi augmenter le nombre de projets livrés par année. Cette solution peut être mise en place en même temps que l'implantation d'indicateurs de performance au niveau de la production de pièces (E). Cibler le poste goulot et sa composante la plus faible du taux de rendement global permet d'améliorer la capacité de ce poste de travail et, par le fait même, celle de toute l'usine. Une approche d'amélioration continue utilisant les outils Lean permet de continuer d'améliorer la capacité de production de l'usine.

Le système d'information (D) doit être implanté à la suite des trois autres variables puisque le gain de cette solution est plus faible que les trois autres éléments. De plus la production de pièces n'est pas goulot initialement. Cependant, le système d'information permet de régler les problèmes amenant des pertes de production au poste goulot et aux autres postes qui deviendraient goulot par la suite. Cela permettra d'améliorer la capacité de tous les postes de travail du département de fabrication de pièces puisque tous les travailleurs utilisent actuellement un horodateur commun. Le remplacement des dessins papier réduira la recherche d'information, les temps de déplacement et les erreurs de production liées à une mauvaise version du dessin papier.

Pour ce qui est des interactions, deux des quatre interactions analysées sont significatives. Les interactions significatives sont seulement avec les trois variables ayant un fort impact. Le nombre de projets livrés est équivalent entre les deux interactions. Cela justifie que l'entreprise n'a pas à prioriser les Kanbans & JAT (A) ou l'amélioration du poste goulot par la mise en place d'indicateurs de performance (E), mais bien l'implantation en parallèle de ces deux projets si les ressources de l'entreprise le permettent.

Les interactions sont significatives puisque le goulot de l'entreprise se déplace d'un département à l'autre. En commençant par l'implantation de produits modulaires, le goulot se déplace de l'ingénierie à la fabrication. Les solutions améliorant la fabrication des pièces ont alors un impact combiné beaucoup plus intéressant que l'impact de chacune des solutions indépendantes.

CHAPITRE 6 ANALYSE GLOBALE DES RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Dans ce chapitre, l'analyse des résultats de l'implantation des solutions et du plan d'expérience est présentée. L'explication et l'interprétation des résultats ainsi que l'analyse de ces résultats sont présentées afin d'établir des liens cohérents avec la littérature. Les hypothèses de recherches sont validées ou infirmées dans ce chapitre.

6.1 Retour sur les hypothèses de recherche

À la suite des résultats présentés, les hypothèses 1, 2, 4 et 5 sont validées puisque leur variable respective est significative dans l'analyse de la variance. Une approche JAT, l'implantation de Kanban (A), la conception modulaire (B), l'implantation d'un intranet combiné à des écrans aux postes de travail (D) ainsi que la mise en place d'indicateurs de performance menant à l'amélioration du poste de travail goulot en utilisant une approche Lean (E) augmentent la performance de l'entreprise. L'entreprise doit poursuivre l'implantation des variables significatives afin d'améliorer sa performance.

Suite à la méthodologie réalisée, l'entreprise présente une orientation beaucoup plus claire vers la production de masse personnalisée. Les améliorations présentées dans la simulation et dans le cas en entreprise touchent directement la rentabilité de l'entreprise par l'augmentation de la productivité et de l'efficacité des ressources présentes. La flexibilité de production est conservée tout au long de l'implantation des outils implantés. L'entreprise pourrait même avoir plus de facilité à répondre à la variation des commandes. La performance de l'entreprise est alors augmentée vu l'augmentation ou le maintien de ces trois concepts démontrant l'un des facteurs de réussite de l'orientation vers la personnalisation de masse.

L'entreprise réalise maintenant l'importance des options sur chacun des produits, l'impact d'un changement de conception sur les coûts et l'impact négligeable sur les coûts d'avoir

un équipement répondant à 80 % des besoins client. Cette compréhension, réalisée grâce à la conception modulaire, aux outils de l'agilité et à l'Industrie 4.0 a amené l'entreprise à augmenter ses efforts pour s'orienter vers la production de masse personnalisée. La stratégie de l'Industrie 4.0 proposée a aidé l'entreprise à s'orienter vers la personnalisation de masse. Cela confirme ainsi l'hypothèse de départ soit que la mise en place de l'Industrie 4.0 par une stratégie reposant sur la conception de produits modulaires et des outils augmentant l'agilité aide au succès de la transition vers la production de masse personnalisée des PME.

Enfin, l'hypothèse statistique 3 n'a pu être confirmée et nécessite de valider les conditions de réussite par des recherches futures tel qu'expliqué précédemment dans l'analyse du chapitre du plan d'expérience.

6.2 Analyse des résultats

La recherche consistait en 3 étapes : adapter une stratégie d'implantation de l'Industrie 4.0, implanter la stratégie proposée dans une PME manufacturière et évaluer l'impact des étapes suivantes à l'aide d'un plan d'expérience réalisé par une simulation. La stratégie met l'accent sur l'agilité et la conception de produits modulaire en premier puis sur les technologies ensuite afin d'amener l'entreprise à réaliser une production de masse personnalisée.

La réalisation de ces étapes a permis de constater que le questionnaire d'audit mesure autant le niveau d'implantation des technologies que les autres dimensions alors que les PME doivent commencer par mettre des efforts sur l'amélioration du leadership, de l'agilité et la conception de leurs produits. L'audit doit alors mettre l'emphase initialement sur les composantes qui ne touchent pas l'implantation de technologies afin d'assurer la réussite de la stratégie en entreprise.

L'implantation de la stratégie en entreprise permet d'observer une amélioration de la performance à la suite de l'utilisation des données déjà présentes, de la conception modulaire des produits, de la gestion des modules dans l'ERP, de l'infonuagique et des processus automatisés. L'implantation en entreprise a permis de réaliser que des gains

importants sont à réaliser au niveau de la conception du produit qui est une étape importante du changement vers l'Industrie 4.0. Une codification pour l'utilisation des modules en entreprise a été proposée et implantée répondant ainsi à un besoin de l'entreprise pour l'implantation de modules. Une démarche structurée pour la conception de produits modulaires intégrant les étapes de conception de produits et d'agilité a été adaptée aux besoins. L'entreprise a maintenant en main les outils nécessaires afin de se réorienter vers la production de masse personnalisée.

Les résultats de l'implantation de chaque étape en entreprise permettent de constater les améliorations suivantes :

- Une réduction de 40 % du temps de recherche d'informations et de pièces.
- Une réduction de 50 % du nombre de pièces standards produites en surplus en une période de 6 mois.
- Une réduction du temps de conception des produits de 90 % et une réduction de 32 % du temps de dessin en utilisant les modules et pièces standards.
- Une réduction du nombre de pièces standards de 4,4 % à la suite de l'élimination des doublons.
- La réalisation auprès de la direction que 80 % des options vendues sont toujours les mêmes.
- La commande de 5 pièces identiques ou plus auprès d'un fournisseur permet de réduire de 20 % le coût d'achat unitaire.
- La réduction du nombre de documents papier, de la recherche, du classement et des retranscriptions liés à ces documents.
- La facilitation du partage d'informations et de documents entre les travailleurs à l'interne et avec les fournisseurs à l'externe.
- La réduction du risque de pertes de données et de documents suite à l'implantation de solutions de cybersécurité.
- L'amélioration du suivi des documents par la mise en place de statuts et de listes de suivi.

- La réduction des tâches répétitives telles que la création d'équipes Teams, l'autorisation d'accès SharePoint, la recherche de dessins, etc.

Les résultats globaux de l'entreprise contribuent à démontrer que l'Industrie 4.0 et la personnalisation de masse sont des investissements à long terme tel que retrouvé dans la littérature (Müller et al., 2018). L'entreprise est passée par le creux de la courbe de changement à la suite de la première année d'implantation ce qui est tout à fait normal étant donné l'implantation de plusieurs nouveaux éléments.

Le cas en entreprise appuie le fait qu'une entreprise nécessite du temps pour être prête à l'orientation vers la personnalisation de masse et l'Industrie 4.0. Un plan stratégique et plusieurs rencontres avec des conseillers externes ont fait progresser l'entreprise dans son cheminement vers l'implantation de la stratégie. Le plan stratégique semble avoir un impact sur la motivation de la direction et la quantité d'actions prises pour améliorer l'entreprise. L'acceptation du changement par une stratégie et une vision claire, la disponibilité des ressources humaines et la présence de leadership provenant de la direction restent des défis à relever. Ces défis soulèvent des signes que l'entreprise nécessite encore du temps pour être prête à poursuivre la stratégie. L'accompagnement réalisé semble avoir accéléré la progression de l'acceptation du changement.

Enfin, le plan d'expérience démontre qu'il est possible d'évaluer les prochaines étapes d'implantation de l'Industrie 4.0. L'implantation de produits modulaire suivie de Kanban, de petits lots de production et de l'amélioration du goulot par une démarche Lean sont à implanter dans l'ordre présenté. L'accès à un système d'information à chacun des postes de travail pourra suivre l'implantation des autres solutions dans une étape subséquente. L'implantation de ces variables pourra augmenter de 32,7 % le nombre de projets livrés par année. La recherche démontre qu'il est pertinent de réaliser la simulation afin de prioriser les prochaines étapes et d'évaluer le gain de l'implantation de ces solutions.

À la suite de l'implantation de la stratégie par la mise en place en entreprise et par la simulation, l'entreprise pourra par la suite livrer ses modules directement chez le client.

Avec le temps, la production de modules toujours identiques ne nécessitera plus l'étape de test à l'usine avant l'expédition. Dans le cas de l'entreprise, il pourrait être intéressant d'envisager de ne pas aménager une chaîne de montage mixte et l'équilibrage naturel, mais plutôt de choisir de livrer les modules et les harnais de câblage directement chez le client. Ces assemblages déjà préparés pourraient permettre un assemblage facile chez le client.

Pour ce qui est des entreprises réseau, l'entreprise pourra progressivement faire fabriquer par des fournisseurs externes les modules assemblés dans chacune des cellules lorsqu'ils seront standardisés. L'implantation du concept d'entreprise réseau pourra faire suite à l'implantation de structures modulaires comme démontré par Abdunour et al. (2018) afin d'augmenter la performance de l'entreprise.

De plus, les structures modulaires pourront améliorer la planification de l'entreprise par l'utilisation d'un diagramme GANTT. L'entreprise pourra alors suivre le chemin critique, les modules critiques et définir plus facilement le goulot dans l'entreprise (Abdul-Nour et al., 1998).

La mise en place de la stratégie d'implantation de l'Industrie 4.0 semble avoir nécessité plus d'efforts que dans d'autres recherches vu les différences au niveau des produits. L'entreprise présente une gamme de plus de 30 équipements ayant chacun leurs options et modules spécifiques pour réaliser des lignes de palettisation, d'ensachage ou d'encaissage automatisées. Plusieurs produits de l'entreprise varient en termes d'application, comme les convoyeurs à chaînes qui peuvent agir à titre de convoyeur de palettisation, de convoyeur d'enrubannage, de convoyeur d'accumulation ou de convoyeur de sortie. Le nombre de pièces et d'applications occasionne une augmentation de la complexité de la conception modulaire des produits. Dans le cas de Abdunour et al. (2022), l'entreprise fabriquait un seul produit, soit des ambulances qui avaient la même application et qui devaient seulement être adaptées au client. Le cas réalisé correspondait davantage à celui de Bouchard et al. (2022).

Dans leur étude, les auteurs ont revu deux équipements dans la mise en place de leur stratégie d'implantation de l'Industrie 4.0 soit, les convoyeurs à courroies et les convoyeurs nourrisseurs.

Le cas en entreprise présentait aussi un changement de culture important et a nécessité un temps d'acceptation des solutions proposées assez important. Dans l'étude de Bouchard et al. (2022), la première cartographie de la chaîne de valeur avait été réalisée 4 ans avant le début de la mise en place de la stratégie alors que pour l'entreprise sélectionnée, la stratégie a commencé dès la réalisation de la cartographie. La quantité de temps plus importante pour l'implantation des solutions en l'entreprise correspond aux différences de contexte de l'entreprise et concorde alors avec les autres études.

Pour la comparaison de la simulation, Abdunour et al. (2022) augmentent le nombre de produits fabriqués par semaine de 5 à 6 en implantant une démarche Lean et l'amélioration continue. L'entreprise peut ensuite augmenter sa production à 6,83 par semaine, soit une augmentation totale de 36,6 % total en implantant une stratégie de mise en place de l'Industrie 4.0 passant par les produits modulaires, les cellules dynamiques, une ligne d'assemblage mixte et l'automatisation du goulot par un cobot. Dans leur étude, la variable ayant le plus d'impact à implanter en premier est aussi la structure modulaire des produits.

Pour Abdunour et al. (2018) l'implantation du concept d'entreprise réseau, de cellules dynamiques et d'une démarche Lean et agile a amené l'entreprise à réduire de 24 % son temps de réaction.

Bouchard et al. (2022) ont réduit le temps de passage de 53 % et 68 % pour leurs deux équipements en plus de réduire le nombre de pièces standards de 63 % et de 70 % en implantant leur stratégie.

L'étude réalisée dans la méthodologie du cas en entreprise démontre un élément nouveau, soit la diminution du temps de conception de 90 % et le temps de dessin de 32 %.

L'entreprise peut aussi espérer accroître sa capacité de production de 32,7 % comme démontré par les résultats de la simulation correspondant ainsi à des résultats similaires tels que présentés par Abdounour et al. (2022).

6.3 Limite de la recherche

Enfin, l'approche utilisée était adéquate sur plusieurs points pour les entreprises. Les éléments les plus importants de l'Industrie 4.0 et la stratégie à adopter devront varier selon le produit de l'entreprise, le résultat de chacune des dimensions de l'audit de performance numérique, les résultats de la cartographie de la chaîne de valeur, la culture présente en entreprise, le niveau d'habileté des travailleurs avec les technologies, la taille de l'entreprise et probablement plusieurs autres facteurs. La recherche présente des outils et le développement d'une stratégie qui sont adaptés à l'entreprise. De plus, cette étude est le 4^e cas d'une étude plus grande portant sur les stratégies d'adaptation de l'Industrie 4.0 aux PME du Québec (Abdounour et al., 2018; Abdounour et al., 2022; Bouchard et al., 2022).

6.4 Perspectives futures

6.4.1 Pour l'entreprise

L'entreprise poursuit actuellement ses démarches de conception modulaire. Les ressources humaines étant limitées en PME, il est difficile d'implanter rapidement une conception modulaire pour la majorité des produits vu le nombre d'équipements important. L'entreprise prévoit de standardiser ses équipements sur une période de plusieurs années tout en continuant d'améliorer ses processus internes ainsi que d'éliminer et de simplifier les étapes à non-valeur ajoutée.

L'ajout de ressources supplémentaire aux projets par l'embauche de nouveaux travailleurs est actuellement considéré. L'amélioration du processus de transmission d'informations entre le département des ventes et celui de l'ingénierie est actuellement évaluée afin de dégager du temps aux ressources nécessaires à la conception modulaire.

L'entreprise pourra par la suite déléguer la fabrication de certains modules ou de certains équipements complets à l'externe. Elle pourra alors se diriger vers le concept d'entreprise réseau, l'amélioration de sa qualité, favoriser davantage l'interconnectivité des systèmes, étendre ses indicateurs de performance à toute l'usine, poursuivre dans ses démarches Lean et JAT avec la mise en kanban de modules et d'équipements complets. La mise en place de cellules d'assemblage pourra être envisagée lorsque quelques produits modulaires seront conçus. L'orientation vers une ligne d'assemblage mixte ou vers la livraison de modules directement chez le client pourra ensuite être appliquée, suivie de la planification par le chemin critique à l'aide d'un GANTT.

Avant de poursuivre vers l'implantation de technologies plus importantes, l'entreprise doit améliorer les trois dimensions de l'audit les plus faibles, soit le leadership, l'expérience client et le système de mesure en plus des autres outils de l'agilité et de la conception modulaire. L'entreprise doit mettre en place une vision et une stratégie claire, mettre en place des indicateurs de performance et en effectuer le suivi. La mise en place de processus de communication et la mise à niveau des travailleurs avec des formations informatiques adaptées doivent aussi être envisagées avant d'aller plus loin.

L'entreprise doit aussi faire face à des problèmes qui ont persisté à la suite de la recherche. Notamment, la configuration des produits à la suite de la conception modulaire demeure manuelle et sans limites de combinaisons. Cela permettrait de faciliter l'assemblage et d'augmenter la performance. Le logiciel ERP ne gère actuellement pas en temps réel la gestion des pièces en production. Les pièces livrées chez le client sont encore considérées comme en inventaire pour le projet jusqu'à ce que le bon de travail soit complété. Le manque de main-d'œuvre et le besoin d'automatisation se font toujours sentir afin d'augmenter la productivité.

D'autres technologies telles que des lecteurs de codes à barres pour la gestion des pièces en production et des pièces en réserve, la vente de pièces en ligne avec les principes du Cybercommerce, l'automatisation d'autres processus informationnels, l'ajout de

fonctionnalités pour rendre le produit 4.0 et la modification du modèle d'affaires pourront ensuite être envisagées par la suite.

6.4.2 Pour la recherche

À la suite de l'adaptation de la codification, du ERP et de la mise en production des modules des équipements, la prochaine étape sera de concevoir ou d'adapter un configurateur de produits à la conception modulaire. Les défis restants consistent à trouver une façon de limiter le nombre de combinaisons possibles et de simplifier la conception tout en conservant le concept de module dans cette conception.

Le point de vue technologique étant abordé par plusieurs études, il serait intéressant d'approcher l'Industrie 4.0 pour les PME d'un point de vue Leadership. Comment une PME manufacturière peut-elle rapidement changer ses méthodes de gestion et son leadership dans le but d'orienter l'entreprise vers l'implantation de l'Industrie 4.0?

De plus, d'autres cas tels que celui présenté sont nécessaires afin d'appuyer la stratégie. L'étude de la même entreprise à travers le temps permettrait aussi de cibler les éléments clés facilitant le changement de mentalité.

Enfin, le seuil d'implantation des préalables ne semblait pas défini clairement dans la littérature. La définition d'un seuil établi permettrait d'orienter plus rapidement les entreprises vers les technologies adaptées à leur besoin.

CONCLUSION

L'augmentation de la performance est un enjeu important pour les PME manufacturières québécoises afin de rivaliser avec les entreprises à travers le monde. L'étude a pris pour hypothèse qu'une stratégie d'implantation de l'Industrie 4.0 intégrant des outils d'agilité et la conception modulaire augmentait la compétitivité et, par le fait même, la performance de la PME. Cette stratégie visait à amener l'entreprise à produire selon une production de masse personnalisée.

L'étude visait à adapter une stratégie d'implantation de l'Industrie 4.0, à mettre en place cette stratégie dans une PME manufacturière du domaine métallique et à évaluer les prochaines étapes par un plan d'expérience réalisé par une simulation.

Cette recherche a apporté une stratégie d'implantation de l'Industrie 4.0 basée sur la conception modulaire et l'agilité. La recherche a défini et mis en place une codification répondant aux besoins des modules issus de la conception modulaire des produits et a adapté un logiciel ERP à la production de modules. L'étude a aussi adapté une démarche structurée de conception de produits modulaires.

La conception modulaire des produits réalisée dans le cas en entreprise a réduit le temps de conception de 90 % et le temps de dessins de 32 % dans le cas d'un passage de produits personnalisés à produits modulaires. La conception occupe ainsi une place importante auprès de l'Industrie 4.0. L'adaptation de l'ERP aux produits modulaires a permis de réduire la recherche d'informations et de pièces d'environ 40 %, de réduire le nombre de pièces standards de 4,4 % à la suite de l'élimination de doublons et de diminuer l'inventaire des pièces produites en surplus de 50 % en 6 mois. L'entreprise a pris connaissance que l'achat de 5 pièces ou plus chez leur fournisseur de découpe et de pliage laser réduit le coût unitaire par pièce en moyenne de 20 %. Par l'analyse des produits pour les soumissions, l'entreprise a pris connaissance que 80 % des options vendues pour un équipement sont toujours les mêmes.

L'implantation de la technologie infonuagique et de l'automatisation de processus informatiques ont permis de réduire la quantité de documents papier, de réduire la recherche d'informations, de réduire le temps de classement des documents, de réduire les retranscriptions inutiles, de faciliter le partage d'information à l'interne et à l'externe, de réduire le temps nécessaire aux tâches répétitives, d'améliorer le suivi des documents et de réduire les risques de pertes de données.

La simulation a ensuite démontré que les étapes subséquentes telles que la conception de produits modulaires, la mise en place du JAT et de kanban, l'identification du poste goulot par des indicateurs de performance et son amélioration par une approche Lean et la mise en place d'un système d'information permettent d'augmenter la capacité de production de 32,7 % avec les mêmes ressources de production.

Enfin, la mise en place de tous ces outils a amélioré la performance et la compétitivité de la PME, l'amenant à s'orienter vers l'Industrie 4.0. Par les conditions de réussite nécessaires lors de l'implantation telles que la présence d'une stratégie et d'une vision, la disponibilité des ressources humaines et la présence de leadership de la part de la direction, l'étude a démontré qu'une entreprise nécessite du temps afin d'être préparée à amorcer un changement de cette envergure.

Nécessairement, certains facteurs ont été négligés et viennent limiter les résultats de cette étude tels que la qualité, l'entretien, la limitation à une seule gamme de produits et le seuil d'implantation acceptable des préalables pour ne nommer que quelques exemples.

Les recherches futures pourraient s'intéresser à l'adaptation d'un outil de configuration des produits modulaires, à la définition d'un niveau d'implantation minimal pour les préalables énoncés dans la littérature, aux méthodes pour accélérer l'implantation d'un leadership fort en PME et à l'appui des résultats démontrés par d'autres cas en entreprise.

LISTE DES RÉFÉRENCES

- Abdul-Nour, G., Drolet, J., & Lambert, S. (1999). Mixed production, flexibility and SME. *Proceedings of the 1998 24th International Conference on Computers and Industrial Engineering*, 37(1), 429-432. [https://doi.org/10.1016/S0360-8352\(99\)00110-2](https://doi.org/10.1016/S0360-8352(99)00110-2)
- Abdul-Nour, G., Lambert, S., & Drolet, J. (1998). Adaptation of JIT philosophy and kanban technique to a small-sized manufacturing firm; a project management approach. *Computers and Industrial Engineering*, 35(3-4), 419-422. [https://doi.org/10.1016/s0360-8352\(98\)00123-5](https://doi.org/10.1016/s0360-8352(98)00123-5)
- Abdulnour, G., Gamache, S., & Nouri, K. (2018). Cellular Manufacturing System Evolution from Group Technology to a Reconfigurable Manufacturing System: A Case Study of a Dynamic Cellular Manufacturing System (DCMS) in an Electromechanical Assembly Industry. In G. A. S. M. Gen (Ed.), *Cellular Manufacturing Systems: Recent Developments, Analysis and Case Studies* (pp. 3-35). Nova Science Publishers, Inc. <https://novapublishers.com/wp-content/uploads/2018/10/Cellular-Manufacturing-Systems-CH-1.pdf>
- Abdulnour, S., Baril, C., Abdulnour, G., & Gamache, S. (2022). Implementation of Industry 4.0 Principles and Tools: Simulation and Case Study in a Manufacturing SME. *Sustainability (Switzerland)*, 14(10), 6336. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/su14106336>
- Alavi, S. (2016). The influence of workforce agility on external manufacturing flexibility of Iranian SMEs. *International Journal of Technological Learning, Innovation and Development*, 8(1), 111-127. <https://doi.org/10.1504/IJTLID.2016.075185>
- Arcidiacono, F., Ancarani, A., Di Mauro, C., & Schupp, F. (2019). Where the Rubber Meets the Road Industry 4.0 among SMEs in the Automotive Sector. *IEEE Engineering Management Review*, 47(4), 86-93. <https://doi.org/10.1109/EMR.2019.2932965>
- Beaudoin, J. (2016). Prendre part à la révolution manufacturière? Du rattrapage technologique à l'Industrie 4.0 chez les PME. *Centre francophone*

d'informatisation des organisations (CEFRIO), 32. Repéré le 7 décembre 2020 à <https://numerique.banq.qc.ca/patrimoine/details/52327/2750000>

- Bertolini, M., Esposito, G., Neroni, M., & Romagnoli, G. (2019). Maturity models in industrial internet: A review. 25th International Conference on Production Research Manufacturing Innovation: Cyber Physical Manufacturing, Chicago.
- Bessant, J., Francis, D., Meredith, S., Kaplinsky, R., & Brown, S. (2000). Developing manufacturing agility in SMEs. *International Journal of Entrepreneurship and Innovation Management*, 1(3), 730-756. <https://doi.org/10.1504/ijmtm.2000.001374>
- Bettioli, M., Capestro, M., Di Maria, E., & Micelli, S. (2022). Overcoming pandemic challenges through product innovation: The role of digital technologies and servitization. *European Management Journal*. <https://doi.org/10.1016/j.emj.2022.05.003>
- Bittighofer, D., Dust, M., Irslinger, A., Liebich, M., & Martin, L. (2018). State of Industry 4.0 across German companies. 2018 IEEE International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC), Stuttgart.
- Blanchet, M. (2016). Industrie 4.0 Nouvelle donne industrielle, nouveau modèle économique. *Outre-Terre*, 46(1), 62-85.
- Bouchard, S., Abdunour, G., & Gamache, S. (2022). Agility and Industry 4.0 Implementation Strategy in a Quebec Manufacturing SME. *Sustainability (Switzerland)*, 14(13), Article 7884. <https://doi.org/10.3390/su14137884>
- Bressanelli, G., Adrodegari, F., Perona, M., & Saccani, N. (2018). Exploring how usage-focused business models enable circular economy through digital technologies. *Sustainability (Switzerland)*, 10(3), 639. <https://doi.org/10.3390/su10030639>
- Brox, J. A., & Fader, C. (2002). The set of just-in-time management strategies: An assessment of their impact on plant-level productivity and input-factor substitutability using variable cost function estimates. *International Journal of Production Research*, 40(12), 2705-2720. <https://doi.org/10.1080/00207540210137657>
- Buer, S.-V., Strandhagen, J. O., & Chan, F. T. S. (2018). The link between industry 4.0 and lean manufacturing: Mapping current research and establishing a research

- agenda. *International Journal of Production Research*, 56(8), 2924-2940.
<https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1442945>
- Burgess, T. F. (1994). Making the Leap to Agility. *International Journal of Operations and Production Management*, 14(11), 23-34.
<https://doi.org/10.1108/01443579410068620>
- Busto Parra, B., Pando Cerra, P., & Álvarez Peñín, P. I. (2021). Combining ERP, Lean Philosophy and ICT: An Industry 4.0 Approach in an SME in the Manufacturing Sector in Spain. *Engineering Management Journal*.
<https://doi.org/10.1080/10429247.2021.2000829>
- Charbonneau Genest, M., & Gamache, S. (2020). Prerequisites for the Implementation of Industry 4.0 in Manufacturing SMEs. *Procedia Manufacturing*, 51, 1215-1220.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.10.170>
- Chengula, Z., Morato, M. A. R., Thurner, T., Wiedensohler, Y., & Martin, L. (2018). State of Industry 4.0 Across Six French Companies. 2018 IEEE International Conference on Engineering, Technology and Innovation, Stuttgart.
- Črešnar, R., Potočan, V., & Nedelko, Z. (2020). Speeding up the implementation of industry 4.0 with management tools: Empirical investigations in manufacturing organizations. *Sensors (Switzerland)*, 20(12), 1-25, Article 3469.
<https://doi.org/10.3390/s20123469>
- Deloitte. (2015). The Deloitte Consumer Review Made-to-Order: The rise of Mass Personalization. *The Deloitte Consumer Review*. Repéré le 12 décembre 2020 à <https://www2.deloitte.com/ch/fr/pages/consumer-business/articles/made-to-order-the-rise-of-mass-personalisation.html>
- Emmer, C., Glaesner, K.-H., Pfouga, A., & Stjepandić, J. (2017). Advances in 3D measurement data management for Industry 4.0. *Procedia Manufacturing*, 11, 1335-1342. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.262>
- Forschungsunion. (2013). *Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0: Securing the future of German manufacturing industry*. Repéré le 10 décembre 2020 à <https://en.acatech.de/publication/recommendations-for-implementing-the-strategic-initiative-industrie-4-0-final-report-of-the-industrie-4-0-working-group/>

- Frank, A. G., Dalenogare, L. S., & Ayala, N. F. (2019). Industry 4.0 technologies: Implementation patterns in manufacturing companies. *International Journal of Production Economics*, 210, 15-26. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.01.004>
- Gamache, S. (2019). *Stratégies de mise en oeuvre de l'industrie 4.0 dans les petites et moyennes entreprises manufacturières québécoises* [Thèse, Université du Québec à Chicoutimi]. Trois-Rivières, Québec, Canada. <https://depot-e.uqtr.ca/id/eprint/8821/>
- Gamache, S., Abdul-Nour, G., & Baril, C. (2020). Evaluation of the influence parameters of Industry 4.0 and their impact on the Quebec manufacturing SMEs: The first findings. *Cogent Engineering*, 7(1), Article 1771818. <https://doi.org/10.1080/23311916.2020.1771818>
- Gamache, S., Abdunour, G., & Baril, C. (2017). Toward industry 4.0: Studies and practices in Quebec smes. 47th International Conference on Computers and Industrial Engineering CIE 2017, Lisbon, Portugal.
- Garay-Rondero, C. L., Martinez-Flores, J. L., Smith, N. R., Caballero Morales, S. O., & Aldrette-Malacara, A. (2019). Digital supply chain model in Industry 4.0. *Journal of Manufacturing Technology Management*. <https://doi.org/10.1108/JMTM-08-2018-0280>
- Ghobakhloo, M., Iranmanesh, M., Vilkas, M., Grybauskas, A., & Amran, A. (2022). Drivers and barriers of Industry 4.0 technology adoption among manufacturing SMEs: a systematic review and transformation roadmap. *Journal of Manufacturing Technology Management, Inédit*. <https://doi.org/10.1108/JMTM-12-2021-0505>
- Gosling, J., & Naim, M. M. (2009). Engineer-to-order supply chain management: A literature review and research agenda. *International Journal of Production Economics*, 122(2), 741-754. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2009.07.002>
- Gunasekaran, A., & Yusuf, Y. Y. (2002). Agile manufacturing: A taxonomy of strategic and technological imperatives. *International Journal of Production Research*, 40(6), 1357-1385. <https://doi.org/10.1080/00207540110118370>
- Hermann, M., Pentek, T., & Otto, B. (2016). Design principles for industrie 4.0 scenarios. Hawaii International Conference on System Sciences, Koloa, HI, USA.

- Houtzeel, A. (1975). MICLASS, A CLASSIFICATION SYSTEM BASED ON GROUP TECHNOLOGY.
- Huang, C.-J., Talla Chicoma, E. D., & Huang, Y.-H. (2019). Evaluating the factors that are affecting the implementation of Industry 4.0 technologies in manufacturing MSMEs, the case of Peru. *Processes*, 7(161). <https://doi.org/10.3390/pr7030161>
- Huxtable, J., & Schaefer, D. (2016). On Servitization of the Manufacturing Industry in the UK. *Procedia CIRP*, 52(1), 46-51. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.07.042>
- Industrie Canada. (2020). *Sommaire - Statistiques relatives à l'industrie canadienne*. Repéré le 3 décembre 2020 à <https://www.ic.gc.ca/app/scr/app/cis/summary-sommaire/31-33>
- Ismail, A. I., Che Rose, R., Abdullah, H., & Uli, J. (2010). The relationship between organisational competitive advantage and performance moderated by the age and size of firms. *Asian Academy of Management Journal*, 15(2), 157-173. <https://www.semanticscholar.org/paper/THE-RELATIONSHIP-BETWEEN-ORGANISATIONAL-COMPETITIVE-Ismail-Rose/9a6d70c65da3b060128fe67689675f5fc02d28ab>
- Ismail, H., Reid, I., Mooney, J., Poolton, J., & Arokiam, I. (2007). How small and medium enterprises effectively participate in the mass customization game. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 54(1), 86-97. <https://doi.org/10.1109/TEM.2006.889069>
- JinHai, L., Anderson, A. R., & Harrison, R. T. (2003). The evolution of agile manufacturing. *Business Process Management Journal*, 9(2), 170-189. <https://doi.org/10.1108/14637150310468380>
- Julien, P.-A., & St-Pierre, J. (2009). *Mondialisation et PME : une vulnérabilité fort différenciée* La vulnérabilité des TPE et des PME dans un environnement mondialisé, Trois-Rivières.
- Jung, J. Y., & Ahluwalia, R. S. (1991). FORCOD: A coding and classification system for formed parts. *Journal of Manufacturing Systems*, 10(3), 223-232. [https://doi.org/10.1016/0278-6125\(91\)90035-Z](https://doi.org/10.1016/0278-6125(91)90035-Z)

- Kilpatrick, J., & Barter, L. (2020). *COVID-19 - Gestion des risques et des perturbations liés à la chaîne d'approvisionnement*. Repéré le 8 décembre 2020 à https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/ca/Documents/finance/Supply-Chain_POV_FR_FINAL-AODA.pdf
- Klimecka-Tatar, D., & Ingaldi, M. (2022). *Digitization of processes in manufacturing SMEs - Value stream mapping and OEE analysis* 3rd International Conference on Industry 4.0 and Smart Manufacturing, Hagenberg im Mühlkreis, Austria. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85127749706&doi=10.1016/%2fj.procs.2022.01.264&partnerID=40&md5=a4327dad7ffaef683472cbf51b0c677c>
- Klimecka-Tatar, D., Ingaldi, M., Ulewicz, R., & Dwornicka, R. (2021). Preparation for implementation of industrie 4.0 in small and medium-sized enterprises of metal industry. METAL 2021 - 30th Anniversary International Conference on Metallurgy and Materials, Brno, Czech Republic, EU.
- Lee, J., Bagheri, B., & Kao, H.-A. (2015). A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*, 3, 18-23. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2014.12.001>
- Leite, M., & Braz, V. (2016). Agile manufacturing practices for new product development: Industrial case studies. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 27(4), 560-576. <https://doi.org/10.1108/JMTM-09-2015-0073>
- Li, D., Fast-Berglund, Å., & Paulin, D. (2019). Current and future Industry 4.0 capabilities for information and knowledge sharing: Case of two Swedish SMEs. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 105(9), 3951-3963. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03942-5>
- Li, D., Paulin, D., Fast-Berglund, Å., Gullander, P., & Bligård, L.-O. (2018). Supporting individual needs for intra-organisational knowledge sharing activities in pre-industry 4.0 SMEs. 15th International Conference on Intellectual Capital, Knowledge Management and Organisational Learning, ICICKM 2018, Cape Town, South Africa.
- Liborio Zapata, M., Berrah, L., & Tabourot, L. (2020). Towards the Definition of an Impact Level Factor of SME Features Over Digital Transformation. In B. Lalic, U. Marjanovic, V. Majstorovic, G. von Cieminski, & D. Romero (Eds.),

International Conference on Advances in Production Management Systems, APMS 2020 (Vol. 591 IFIP, pp. 123-130). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-57993-7_15

- Lucian, G., Ema, M., Ioan, M. D., Gheorghe, F., & Andrei, M. (2018). Statistical analysis of performance in SMEs. *Current Science*, 115(8), 1543-1549. <https://www.jstor.org/stable/26978447>
- Menon, S., & Shah, S. (2020). Are SMEs Ready for Industry 4.0 Technologies: An Exploratory Study of I 4.0 Technological Impacts. 2020 International Conference on Computation, Automation and Knowledge Management, Uttar Pradesh, Inde.
- Mittal, S., Khan, M. A., Purohit, J. K., Menon, K., Romero, D., & Wuest, T. (2020). A smart manufacturing adoption framework for SMEs. *International Journal of Production Research*, 58(5), 1555-1573. <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1661540>
- Mittal, S., Khan, M. A., Romero, D., & Wuest, T. (2019). Building blocks for adopting smart manufacturing. 47th SME North American Manufacturing Research Conference, Erie, Pennsylvania.
- Mittal, S., Muztoba, A. K., David, R., & Thorsten, W. (2018). A critical review of smart manufacturing Industry 4.0 maturity models: Implications for small and medium-sized enterprises (SMEs). *Journal of Manufacturing Systems*, 49, 194-214. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2018.10.005>
- Mittal, S., Romero, D., & Wuest, T. (2018). *Towards a smart manufacturing maturity model for SMEs (SM3E)* IFIP WG 5.7 International Conference on Advances in Production Management Systems, APMS 2018, Seoul, Korea. https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-319-99707-0_20
- Moeuf, A., Pellerin, R., Lamouri, S., Tamayo-Giraldo, S., & Barbaray, R. (2018). The industrial management of SMEs in the era of Industry 4.0. *International Journal of Production Research*, 56(3), 1118-1136. <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1372647>
- Mofolasayo, A., Young, S., Martinez, P., & Ahmad, R. (2022). How to adapt lean practices in SMEs to support Industry 4.0 in manufacturing. 3rd International Conference on Industry 4.0 and Smart Manufacturing, Linz, Austria.

- Müller, J., Oana, B., & Kai-Ingo, V. (2018). Fortune favors the prepared: How SMEs approach business model innovations in Industry 4.0. *Technological Forecasting and Social Change*, 132, 2-17. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2017.12.019>
- Müller, J. M. (2019). Business model innovation in small- and medium-sized enterprises: Strategies for industry 4.0 providers and users. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 30(8), 1127-1142. <https://doi.org/10.1108/JMTM-01-2018-0008>
- Nakayama, R. S., & De Mesquita Spinola, M. (2015). Production planning and control in small engineer-to-order companies: Understanding difficulties and pragmatic approach. Portland International Center for Management of Engineering and Technology, PICMET 2015, Portland, USA.
- Narasimhan, R., Swink, M., & Kim, S. W. (2006). Disentangling leanness and agility: An empirical investigation. *Journal of Operations Management*, 24(5), 440-457. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jom.2005.11.011>
- Opitz, H. (1970). *A classification system to describe workpieces / compiled by H. Opitz ; with the support of the Vereins Deutscher Werkstoffmaschinenfabriken ; translated by R.A. Acton Taylor ; edited by W.R. MacConnell* ([1st English edition]. ed.). Pergamon Press.
- Organisation de coopération et de développement économiques. (2004). LES STATISTIQUES SUR LES PME : VERS UNE MESURE STATISTIQUE PLUS SYSTÉMATIQUE DU COMPORTEMENT DES PME 2e conférence de l'OCDE des ministres en charges des petites et moyennes entreprises (PME), Istanbul, Turquie.
- Pech, M., & Vrchota, J. (2020). Classification of small-and medium-sized enterprises based on the level of industry 4.0 implementation. *Applied Sciences*, 10(15), Article 5150. <https://doi.org/10.3390/app10155150>
- Rauch, E., Stecher, T., Unterhofer, M., Dallasega, P., & Matt, D. T. (2019). Suitability of Industry 4.0 concepts for small and medium sized enterprises: Comparison between an expert survey and a user survey. Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management, Bangkok, Thailand.

- Rauch, E., & Vickery, A. R. (2020). Systematic analysis of needs and requirements for the design of smart manufacturing systems in smes. *Journal of Computational Design and Engineering*, 7(2), 129-144. <https://doi.org/10.1093/jcde/qwaa012>
- Rheault, M., Drolet, J. R., & Abdounour, G. (1996). Dynamic cellular manufacturing system (DCMS). *Computers and Industrial Engineering*, 31(1-2), 143-146. [https://doi.org/10.1016/0360-8352\(96\)00098-8](https://doi.org/10.1016/0360-8352(96)00098-8)
- Rüßmann, M., Lorenz, M., Gerbert, P., Waldner, M., Justus, J., Engel, P., & Harnisch, M. (2015). *Industry 4.0: The Future of Productivity and Growth in Manufacturing industries*. Repéré le 10 décembre 2020 à https://image-src.bcg.com/Images/Industry_40_Future_of_Productivity_April_2015_tcm9-61694.pdf
- Sahi, G. K., Gupta, M. C., & Cheng, T. C. E. (2020). The effects of strategic orientation on operational ambidexterity: A study of indian SMEs in the industry 4.0 era. *International Journal of Production Economics*, 220, 107395. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.05.014>
- Schmitt, P., Schmitt, J., & Engelmann, B. (2020). Evaluation of proceedings for SMEs to conduct I4.0 projects. 7th CIRP Global Web Conference, CIRPe 2019, Germany.
- Schönfuß, B., McFarlane, D., Hawkrigde, G., Salter, L., Athanassopoulou, N., & de Silva, L. (2021). A catalogue of digital solution areas for prioritising the needs of manufacturing SMEs. *Computers in Industry*, 133, Article 103532. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2021.103532>
- Sharifi, H., & Zhang, Z. (2001). Agile manufacturing in practice Application of a methodology. *International Journal of Operations and Production Management*, 21(5/6), 772-794. <https://doi.org/10.1108/01443570110390462>
- Sheu, C., & Wacker, J. G. (1997). The effects of purchased parts commonality on manufacturing lead time. *International Journal of Operations and Production Management*, 17(8), 725. <https://doi.org/10.1108/01443579710175529>
- Sommer, L. (2015). Industrial revolution-industry 4.0: Are German manufacturing SMEs the first victims of this revolution? *Journal of Industrial Engineering and Management*, 8(5), 1512-1532. <https://doi.org/10.3926/jiem.1470>

- Sopadang, A., Chonsawat, N., & Ramingwong, S. (2020). Smart sme 4.0 implementation toolkit. In *Industry 4.0 for SMEs: Challenges, Opportunities and Requirements* (pp. 279-302). Palgrave Macmillan. https://doi.org/10.1007/978-3-030-25425-4_10
- Sriariyawat, N. (2019). Implementation of Agile Manufacturing for Thai's SMEs. 1st International Conference on Advance and Scientific Innovation (ICASI), Medan, Indonesia.
- Stentoft, J., Aadsbøll Wickstrøm, K., Philipsen, K., & Haug, A. (2021). Drivers and barriers for Industry 4.0 readiness and practice: empirical evidence from small and medium-sized manufacturers. *Production Planning and Control*, 32(10), 811-828. <https://doi.org/10.1080/09537287.2020.1768318>
- STIQ. (2020). *Baromètre industriel Québécois 11e édition*. Repéré le 10 décembre 2020 à <https://www.stiq.com/wp-content/uploads/2018/05/STIQ-Barom%C3%A8tre-11e-%C3%A9dition-web.pdf>
- STIQ. (2022). *Baromètre industriel Québécois 13e édition*. Repéré le 2022-07-27 à <https://www.stiq.com/wp-content/uploads/2022/05/STIQ-Barometre-13e-edition-WEB.pdf>
- Sufian, A. T., Abdullah, B. M., Ateeq, M., Wah, R., & Clements, D. (2021). Six-gear roadmap towards the smart factory. *Applied Sciences*, 11(8), Article 3568. <https://doi.org/10.3390/app11083568>
- Šugár, P., Šugárová, J., & Kolník, M. (2011). Technology-based sheet metal classification and coding system. *Journal for Technology of Plasticity*, 36(1), 1-8. <https://doi.org/10.2478/v10211-011-0005-0>
- Szász, L., Demeter, K., Rácz, B. G., & Losonci, D. (2020). Industry 4.0: a review and analysis of contingency and performance effects. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 32(3), 667-694. <https://doi.org/10.1108/JMTM-10-2019-0371>
- Torn, I. A. R., & Vaneker, T. H. J. (2019). Mass personalization with industry 4.0 by SMEs: A concept for collaborative networks. 7th International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production, CARV 2018, Nantes, France.

- 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. <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1391420>
- Türkeş, M. C., Oncioiu, I., Aslam, H. D., Marin-Pantelescu, A., Topor, D. I., & Căpuşneanu, S. (2019). Drivers and barriers in using industry 4.0: A perspective of SMEs in Romania. *Processes*, 7(3), Article 153. <https://doi.org/10.3390/pr7030153>
- Vázquez-Bustelo, D., Lucía, A., & Esteban, F. (2007). Agility drivers, enablers and outcomes Empirical test of an integrated agile manufacturing mode. *International Journal of Operations and Production Management*, 27(12), 1303-1332. <https://doi.org/10.1108/01443570710835633>
- Woods, J., Galbraith, B., & Hewitt-Dundas, N. (2022). Network centrality and open innovation: A social network analysis of an SME manufacturing cluster. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 69(2), 351-364. <https://doi.org/10.1109/TEM.2019.2934765>
- Zhang, D. Z. (2011). Towards theory building in agile manufacturing strategies - Case studies of an agility taxonomy. *International Journal of Production Economics*, 131(1), 303-312. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2010.08.010>
- Zhang, Y., Deng, Y., Wang, Y., Chen, P., Yan, B., Zou, X., Zheng, Y., Wu, S., & Zhu, H. (2019). Functional Structure Modeling and Assembly Practice of Ditching Fertilizer Based on Standardized Module Design. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering,

ANNEXE 1 - MATRICE DE LA REVUE DE LITTÉRATURE DE L'INDUSTRIE 4.0

Tableau ANNEXE 1.1: Matrice de la revue de la littérature sur l'Industrie 4.0

Référence	Problématique	Objectif	Méthodologie	Variable dépendante / Mesure de performance	Résultats	Conclusion
(Rauch et al., 2019)	Les Roadmaps de l'Industrie 4.0 sont créés pour guider les entreprises dans leur planification et l'implantation de pratiques de l'Industrie 4.0, mais ils sont défaillants pour l'implantation d'actions concrètes.	Définir la pertinence des concepts de l'Industrie 4.0 selon la taille de l'entreprise.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Sondage d'auto-évaluation 2. Sondage d'experts 3. Développer une ligne directrice de concepts en fonction de la taille de l'entreprise 	Niveau de potentiel de la variable de l'Industrie 4.0	<p>4 facteurs importants pour petites entreprises selon entreprises:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Système agile 2. Changement de culture d'entreprise 3. Modèle à flux continu 4. Stations de travail connectées et numériques <p>Selon expert:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Rôle de l'opérateur 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Les experts donnent plus d'importance que les entreprises à certains concepts de l'Industrie 4.0 2. Les experts ont de meilleures connaissances que les entreprises 3. Les experts doivent transmettre leurs connaissances aux entreprises
(Sopadang et al., 2020)	Malgré que les technologies aient un rôle important pour la compétitivité des PME, les méthodes de gestions sont aussi très importantes. Autres facteurs que les technologies souvent non prises en compte.	Examiner le « readiness » 4.0 des PME	<ol style="list-style-type: none"> 1. Revue de littérature 2. Analyse du profil de l'entreprise et Audit 3. Analyse des écarts 4. Analyse économique 5. Implantation des lignes directrices 	« Readiness » 4.0	Les préalables sont différents d'une entreprise à l'autre. La boîte à outils peut refléter les besoins en définissant un niveau de « readiness » et l'importance des outils.	L'implantation des lignes directrices a besoin de plus de validations et est seulement suggérée.

Tableau ANNEXE 1.2: Matrice de la revue de la littérature sur l'Industrie 4.0 (Suite)

Référence	Problématique	Objectif	Méthodologie	Variable dépendante / Mesure de performance	Résultats	Conclusion
(Szász et al., 2020)	Peu de preuves empiriques que l'Industrie 4.0 est bénéfique. (seulement des preuves partielles, isolées) Pas d'étude internationale détaillée.	Définir l'impact de l'implantation de solutions de l'Industrie 4.0 et définir l'impact de la taille de l'entreprise, du statut multinational et du contexte de la région.	1. Revue de littérature 2. Sondage à grande échelle 3. Équation 4. Analyse en groupe	Performance opérationnelle et niveau d'implantation de l'Industrie 4.0	L'Industrie 4.0 a un impact positif sur Coûts, qualité, délais, flexibilité Multinationales/Locales n'a pas d'impact sur l'investissement 4.0 Régions moins compétitives investissent plus en 4.0 Entreprises de 250 employés ou plus investissent plus en 4.0.	4.0 a un impact plus grand sur qualité, délais, flexibilité. L'efficacité des coûts n'est pas l'objectif de l'Industrie 4.0. Ce qui explique pourquoi les régions moins compétitives tentent d'implémenter l'Industrie 4.0 pour se démarquer. L'Industrie 4.0 augmente les limites de la performance.
(Pech & Vrchota, 2020)	Il est difficile d'implanter l'Industrie 4.0 rapidement et passer à travers la transformation numérique pour les PME	Classer les PME selon leur niveau d'implantation afin d'éclaircir les prochaines étapes et de leur permettre de se comparer.	1. Définition des méthodes d'analyse 2. Résultats d'analyse et catégorisation des PME 3. Discussion	Niveau d'implantation de l'Industrie 4.0 des PME (Vrchota–Pech Industry 4.0 index)	Les grandes entreprises sont plus avancées dans l'implantation de l'Industrie 4.0 Il y a une dépendance entre l'index et la perception du niveau d'implantation du 4.0	Implanter : collecte de données, analyses, infonuagique, infrastructure informatique, plateformes mobiles PME avec travailleurs compétents sont plus avancées dans l'implantation de l'Industrie 4.0
(Türkes et al., 2019)	Les PME de Roumanie ont un manque d'information pour la prise de décision au niveau de l'implantation de nouvelles technologies de l'Industrie 4.0.	Identifier les critères de priorité, les freins et les facteurs de succès de l'implantation de l'Industrie 4.0.	1. Revue littérature 2. Questionnaire 3. Analyse	Probabilité d'implantation d'une technologie par une entreprise	Robots autonomes, intégration verticale et horizontale, Big Data, Analyses, Internet des objets, Cybersécurité	

Tableau ANNEXE 1.3 : Matrice de la revue de la littérature sur l'Industrie 4.0 (Suite)

Référence	Problématique	Objectif	Méthodologie	Variable dépendante / Mesure de performance	Résultats	Conclusion
(Moeuf et al., 2018)	Les PME ont à améliorer leurs processus tout en maintenant un avantage compétitif pour répondre à leurs clients	Définir les technologies, capacités de gestion et performances requises pour l'implantation de l'Industrie 4.0 dans les PME	<ol style="list-style-type: none"> 1. Revue de littérature 2. Sélection des articles présentant les bénéfices du 4.0 pour les PME 3. Nouvelles opportunités de recherche 	Impact de l'industrie 4.0 (Flexibilité, Coûts, Productivité, Qualité, Délais)	Il y a plus d'articles qui mentionnent un impact sur la flexibilité, la productivité. Ensuite sur les coûts et les délais. Peu sur la qualité.	<p>Les PME sont dans le suivi et un peu dans le contrôle... Pas encore dans l'optimisation et l'autonomie</p> <p>connectivité machine à machine, Robots pas pour PME</p> <p>Méthode implantation grandes entreprises et PME n'est pas la même</p> <p>PME font de petits changements. Pas de transformation complète</p>
(Li et al., 2019)	Les PME font face à des défis causés par la complexité du contexte d'implantation du 4.0	Identifier les étapes d'implantation de l'Industrie 4.0 dans les PME en fonction de leur capacité et des défis auxquels elles font face.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Entrevue semi-structurées 2. Études de cas 3. Analyse 	Indice de maturité numérique	Les entreprises doivent rendre leurs opérateurs 4.0 avant de poursuivre l'implantation de l'Industrie 4.0 puisque le plancher de production est en retard face aux autres processus.	<p>C'est important de développer les ressources et le système informatique, mais encore plus important de développer une culture et une structure organisationnelle</p>

Tableau ANNEXE 1.4: Matrice de la revue de la littérature sur l'Industrie 4.0 (Suite)

Référence	Problématique	Objectif	Méthodologie	Variable dépendante / Mesure de performance	Résultats	Conclusion
(Gamache et al., 2020)	Être plus compétitif, Améliorer performance organisationnelle. Confusion entre les méthodes de transformation numérique des entreprises les plus efficaces pour les PME	Évaluer et identifier les méthodes les plus efficaces pour la transformation numérique des entreprises dans le contexte de PME manufacturières.	<ol style="list-style-type: none"> Mesure de la performance numérique Questionnaire et entrevue Déterminer les facteurs d'influence Discussion 	Performance numérique	<p>Moyenne performance numérique au Québec = 2,18/4</p> <p>Distinctions entre PME + 4.0 et celles qui le sont le moins sont sur ces dimensions: Culture et organisation, Utilisation des technologies, Data management</p> <p>Culture amélioration continue a un impact positif sur 4.0</p>	
(Arcidiacono et al., 2019)	L'Industrie 4.0 permet de maintenir la compétitivité dans le domaine automobile, mais les entreprises n'obtiennent pas toujours le plein potentiel de ces technologies	Identifier les décisions stratégiques qui permettent de faciliter l'implantation de l'Industrie 4.0 dans les PME	<ol style="list-style-type: none"> Revue de la littérature Étude de cas Analyse 	Niveau de facilité d'implantation de l'Industrie 4.0	<p>Facteurs importants:</p> <p>MES/ERP Plan d'action 4.0 / Vision stratégique Partenaires 4.0 Implication des employés dès le départ</p>	
(Schmitt et al., 2020)	Les entreprises d'Allemagne avancent lentement vers l'Industrie 4.0.	Définir si le niveau d'articles sur l'Industrie 4.0 est suffisant pour supporter les PME vers la transition numérique.	<ol style="list-style-type: none"> Revue de la littérature Analyse de l'adaptabilité à la PME 	Niveau de confiance à recommander les PME d'aller vers le 4.0	4 publications sur 18 touchent les aspects de la PME	Les validations de ces publications semblent en cours. C'est questionnable si le nombre de documents est suffisant actuellement pour recommander aux PME d'aller vers l'Industrie 4.0.
(Rauch & Vickery, 2020)	Les PME ne savent pas comment commencer à implanter et introduire ce qu'est l'Industrie 4.0.	Analyser et évaluer les besoins et requis des PME dans le but de définir des lignes directrices pour les PME utilisant l'Industrie 4.0	<ol style="list-style-type: none"> Réalisation de séances de remue-méninges avec des PME Classement par catégories des idées ressorties 	Nombre d'intervention pour chaque variable	Liste de variable définie	Liste de variables est une base pour la création d'outils pour la PME

Tableau ANNEXE 1.5: Matrice de la revue de la littérature sur l'Industrie 4.0 (Suite)

Référence	Problématique	Objectif	Méthodologie	Variable dépendante / Mesure de performance	Résultats	Conclusion
(Menon & Shah, 2020)	Les PME ont un manque de compréhension et de la signification de « se transformer ». Ces éléments peuvent mener à des pertes si les PME ne suivent pas le mouvement des technologies et de l'innovation.	Étudier le « readiness » de l'Industrie 4.0 au niveau des PME	1. Revue de la littérature	Niveau de «readiness»	Liste de variable définie	Les compagnies subiront une perte si elles ne se dirigent pas vers l'implantation de technologies innovantes.
(Mittal et al., 2019)	Les dirigeants des entreprises veulent savoir les éléments pertinents permettant de rendre leurs opérations plus intelligentes et plus compétitives.	Présenter les « Building blocs » (Regroupement de technologies) les plus fréquemment utilisés pour l'adoption de l'industrie 4.0	1. Revue de la littérature 2. Association des blocs aux méthodes d'adoption	Niveau de compétitivité	Les blocs les plus utilisés sont : Le contrôle intelligent (automatisation), l'analyse des données, les produits intelligents et l'utilisation d'un système de production informatique.	Les technologies telles que les Robots, l'impression 3D et le Block Chain sont trop avancées pour être des technologies fréquemment utilisées.
(Mittal et al., 2020)	Les PME luttent pour développer un plan d'implantation pour se diriger vers l'Industrie 4.0.	Développer et évaluer un cadre d'implantation de l'Industrie 4.0 pour les PME	1. Proposition d'un plan 2. Étude de cas multiple			
(Busto Parra et al., 2021)	Les PME du domaine manufacturier métallique font face à de nombreux défis pour augmenter leur valeur ajoutée et améliorer leurs processus.	Identifier les impacts d'une méthodologie de travail combinant ERP et Lean	1. Étude de cas 2. Analyse du modèle de transformation	Compétitivité, efficacité, taux de qualité, satisfaction client	Impact positif sur la qualité, l'efficacité, la satisfaction client.	
(Mofolasayo et al., 2022)	Les PME peuvent implanter une variété de nouvelles technologies, mais il est difficile de développer un plan personnalisé.	Évaluer comment les principes du Lean peuvent supporter l'implantation de l'Industrie 4.0	1. Revue de la littérature 2. Étude de cas	Efficacité du Lean	Le plan d'implantation dépend des conditions de l'entreprise pour implanter Lean et/ou Industrie 4.0 dans une PME	Les recherches devraient faciliter la simulation de scénarios pour connaître la combinaison de solutions à implanter.

Tableau ANNEXE 1.6: Matrice de la revue de la littérature sur l'Industrie 4.0 (Suite)

Référence	Problématique	Objectif	Méthodologie	Variable dépendante / Mesure de performance	Résultats	Conclusion
(Klimecka-Tatar et al., 2021)	Les PME du domaine métallique ont de la difficulté à implanter l'Industrie 4.0 étant donné leurs technologies d'équipement âgées, le manque de personnel et le manque de connaissance pour les travailleurs étrangers.	Évaluer les PME du domaine métallique au niveau de leurs habiletés à surpasser les barrières de l'implantation du 4.0	1. Sondage 2. Entrevues	Niveau d'adoption des moyens technologiques	Il est difficile d'utiliser les technologies récentes puisqu'elles sont difficilement compatibles avec les vieux équipements.	
(Schönfuß et al., 2021)	Les recherches actuelles orientent le choix de technologies et non le choix de problème prioritaire à résoudre avec ces technologies.	Identifier les problèmes répondus par les technologies les plus fréquentes pour les PME	1. Revue de la littérature 2. Atelier Sondage	Priorité d'implantation des technologies	La majorité des solutions implantées en PME sont dans la catégorie de collecte de données et d'analyse.	

ANNEXE 2 - MATRICE DE LA REVUE DE LITTÉRATURE DE L'AGILITÉ

Tableau ANNEXE 2.1: Matrice de la revue de la littérature sur l'agilité

Référence	Problématique	Objectif	Méthodologie	Variable dépendante / Mesure de performance	Résultats	Conclusion
(Leite & Braz, 2016)	La personnalisation et les philosophies de production flexibles telles que l'agilité de production sont de plus en plus présentes. L'agilité de production présente peu de cas réels.	Améliorer la compréhension et l'information disponible sur l'agilité de production.	3 études de cas semi-structure Entrevues	Effet positif des pratiques	La facilité de création et abandon de partenariats rapides pour une situation spécifique.	Le concept d'agilité est peu connu des entreprises.
(Nakayama & De Mesquita Spinola, 2015)	Les entreprises d'outils caractérisés par leur diversité de produits et leur petite taille ont de la difficulté à adopter les systèmes de planification et contrôle.	Comprendre comment les entreprises de fabrication d'outils font face à la planification et au contrôle, leurs difficultés à utiliser un système ERP.	Étude de cas multiple Cas semi-structurés Entrevues			Les PME d'outils devraient avoir leur outil de planification et contrôle fait maison pour répondre à leurs besoins spécifiques.
(Ismail et al., 2007)	Les PME ne savent pas comment opérer une entreprise dans le contexte de personnalisation	Définir les principes de personnalisation de masse à adopter dans les PME dans le contexte de l'agilité et de flexibilité de production.	Étude de réutilisation des composantes dans les familles de produits dans le but de réduire la variation.			
(Gamache et al., 2017)	La personnalisation et masse et la mondialisation forcent les entreprises à revoir leur modèle d'affaires et à améliorer leur compétitivité.	Fournir un portrait des PME du Québec pour comprendre les forces et faiblesses et mesurer leur niveau à être prêt à l'implantation de l'Industrie 4.0	Revue de la littérature Analyse basée sur questionnaire de 148 PME		Produit modulaire et autres facteurs ont un impact sur le TRG	Subvention pour implanter Industrie 4.0 nécessaire pour les PME

Tableau ANNEXE 2.2: Matrice de la revue de la littérature sur l'agilité (Suite)

Référence	Problématique	Objectif	Méthodologie	Variable dépendante / Mesure de performance	Résultats	Conclusion
(Alavi, 2016)	Un manque d'agilité de la part des travailleurs est une des raisons principales pour lesquelles les entreprises ont de la difficulté avec le passage au numérique.	Définir si l'agilité des travailleurs est un facteur critique pour la flexibilité dans un environnement dynamique.	Analyse d'un questionnaire d'un échantillon de 161 PME			
(Bessant et al., 2000)	Les évidences suggèrent qu'on doit résoudre les problèmes dans une situation évolutive et non régler les problèmes priorisés initialement.	Présenter un modèle de référence expliquant et guidant le développement de l'agilité dans les entreprises manufacturières.	Étude de cas		Modèle de référence présenté	
(Sriariyawat, 2019)	L'agilité est principalement définie par des cas en grande entreprise et peu en PME.	Explorer le niveau des PME à être prêtes à implanter des pratiques d'affaires agiles.	Recherche documentaire Questionnaire et sondage			Entreprise familiale est un problème pour la PME
(Zhang, 2011)	L'agilité est acceptée dans l'industrie manufacturière comme un nouveau concept compétitif. Développer une stratégie autour de l'agilité n'est actuellement pas bien compris des entreprises.	Proposer un exemple des 3 stratégies d'agilité Expliquer pourquoi chaque cas a sélectionné une stratégie plutôt qu'une autre.	Étude de cas multiple		Le choix de l'agilité est relié à la nature du marché, à la concurrence, aux caractéristiques du produit et à la position du marché de chaque entreprise.	
(Gunasekaran & Yusuf, 2002)	L'agilité augmente la compétitivité des entreprises. Gestion du changement, incertitude, complexité.	Définir un cadre de définitions de l'agilité et des stratégies de l'agilité comprenant les technologies importantes.	Revue de la littérature Cadre conceptuel		L'agilité et la réactivité sont les 2 éléments importants de l'agilité manufacturière.	Être agile signifie être flexible, efficace au niveau des coûts, être productif et avoir une haute qualité constante.

Tableau ANNEXE 2.3: Matrice de la revue de la littérature sur l'agilité (Suite)

Référence	Problématique	Objectif	Méthodologie	Variable dépendante / Mesure de performance	Résultats	Conclusion
(Abdul-Nour et al., 1999)	Certaines grandes entreprises diminuent leurs coûts fixes en créant des réseaux intelligents avec des PME comme fournisseurs. Le tout basé sur l'agilité le juste à temps et l'innovation.	Une stratégie de gestion dans le but d'aider les PME à atteindre un système de production flexible et agile malgré leur manque de ressources.	Proposition d'une étape pas-à-pas			

ANNEXE 3 –SOMMAIRE ET RECOMMANDATIONS
DU RAPPORT DE LA CARTOGRAPHIE DE LA
CHAÎNE DE VALEUR



RAPPORT FINAL

JUN 2020

Préparé par :
Georges Abdul-Nour Ing. Ph. D.
Mathieu Payette M.Sc.A, B.Eng

Sommaire

Données confidentielles retirées

L'analyse des données recueillies permet donc d'envisager les principales pistes d'intervention suivantes :

- **Renforcer la standardisation et développer une structure modulaire, pour permettre de produire de façon plus flexible et efficace. Ceci :**
 - Diminuera le temps de passage, autant en production que pour les processus administratifs (soumission, ingénierie, conception).
 - Permettra de standardiser les postes, les méthodes et l'outillage, ce qui aidera à la planification.

- **Aménager l'usine sous forme cellule reconfigurable pour diminuer les déplacements, permettre un flux unitaire des produits et ainsi diminuer le temps de passage.**
- **Instaurer l'alimentation des cellules par un commis dédié, afin d'augmenter l'efficacité des opérateurs.**
- **Opter pour un design modulaire** et Produire des sous-assemblages en petit lot (QEP) afin de diminuer les mises en courses, l'accumulation de WIP.
 - Cela fera diminuer le temps de passage et augmenter la flexibilité de l'entreprise

Observations rapides à discuter :

À première vue, l'entreprise possède des bases assez intéressantes surtout en ce qui concerne la recherche et le développement ainsi que la conception de produits, mais il y a des améliorations à faire pour être prêt pour la nouvelle révolution industrielle 4.0 : l'entreprise intelligente. Votre entreprise a un potentiel intéressant et son marché se prête à ça. Voici quelques points à discuter :

Le processus de soumission dure environ de 6 mois à 1 an et l'ingénierie prend de 3 à 4 semaines.

On mentionne que faire une soumission complète représente environ 40 heures de travail. Il y a environ 100 à 120 demandes par an;

70% des demandes nécessitent de faire le processus de soumission complet, mais seulement 9 à 12 projets se concrétisent.

Selon les personnes rencontrées, ce serait le délai de livraison qui causerait le plus de perte de contrat.

Solutions et Discussions

La force de l'entreprise est dans sa capacité à répondre aux spécifications du client. Par contre, comme mentionnées précédemment, 90% des soumissions sont perdues, principalement à cause des délais de production. C'est pourquoi certaines recommandations ont été faites pour augmenter la standardisation et la modularisation du produit tout en répondant au besoin du client. Celles-ci permettront une production plus flexible et efficace. Ça réduit le temps de réaction de l'entreprise en réduisant le temps de passage entre la réception de la commande et la livraison, et dégage des capacités de production supplémentaires

Il faut analyser les produits, afin de développer une configuration qui correspond le plus aux besoins des clients (valeur).

Cela diminuera grandement les délais et les retours en arrière à l'ingénierie. Dans l'optique où l'entreprise est appelée à croître de façon importante, il est primordial de standardiser les méthodes de production, les temps de productions ainsi que de documenter correctement les processus. Pour y arriver voici quelques points de discussion :

- 1- **Produits et procédés dynamiques et reconfigurables**
 - Structure Modulaire et standardisation des produits/plateformes. Une commande, c'est l'assemblage de modules et options selon le besoin.
 - Réaménagement : Cellule Dynamique et ligne Mixte
 - Gestion par flux tiré, Kanban, Pièces et Modules ou Sous-Modules.
 - Standardisation des méthodes de travail. Mesure de temps standard de production.
 - Commande par catalogue/4.0
- 2- Cahier de charge DFSS
- 3- Traçabilité couleurs par commande
- 4- Gestion par projet/par Module, plus Un projet d'assemblage final selon la commande (machinerie Verville et Automobile)
- 5- Code à barre
- 6- Commis
- 7- Lean Manufacturing : Mini Six-Sigma/Matrice en T, SMED (changement d'outils rapide) et 5S (procédés et produits)
- 8- Planification sur 3 périodes/Éviter le **Préempté**.
- 9- Soumission/Commande en ligne-catalogue/4.0
- 10- Système d'information/Intranet et Tablettes
- 11- Une étude approfondie des tâches à valeur ajoutée, des déplacements, des lieux d'entreposage et traçabilité, et de la planification devrait être faite afin de réduire le fardeau des déplacements et les manutentions.

Recommandations

- 1- **Implanter un cahier de charge basé sur le DFSS pour déterminer les paramètres importants pour la qualité et instaurer un programme efficace de contrôle.**

- 2- **Implanter un programme qualité basé sur la matrice et T et une équipe formelle d'amélioration continue. Il faut analyser les données et apporter des solutions.**
- 3- **Renforcer la standardisation et développer une structure modulaire des produits.**
 - a. **Standardiser les modules et les options disponibles pour les produits**
 - b. **Standardiser les outils et les gabarits.**
 - c. **Standardiser les méthodes de travail et développer des instructions pour les opérations. Automatiser les tâches de production qui s'y prêtent (répétitives, mécanique, etc.).**
- 4- **Revoir l'aménagement de l'usine en cellules dynamiques et ligne d'assemblage Mixte. Trois zone : Manufacturier, cellules et ligne d'assemblage.**
 - a. **Organiser l'espace selon le flux de produit, plutôt qu'un aménagement de type job shop.**
 - b. **Diminuer les croisements et les retours en arrière.**
 - c. **Privilégier la formation de cellule de production pour fournir l'assemblage.**
- 5- **Favoriser la production à flux tiré en petits lots dans les cellules (Kanban des modules et des pièces):**
 - a. **Plutôt que d'entreposer du WIP entre chaque poste, on maintien un stock minimal (kanban) de sous-composants standards. Ça diminue le temps de réaction et augmente la flexibilité**
 - b. **Produire en Kanban permettra d'éliminer les multiples zones d'entreposage d'en cours et diminue le nombre de mises en course à faire.**
- 6- **Organiser les postes de façon ergonomique et efficace. Appliquer les principes de l'économie de mouvement à tous les postes de l'usine.**
- 7- **Favoriser l'alimentation des postes par un commis; de cette façon, les opérateurs se concentrent à ajouter de la valeur au processus.**
- 8- **Optimiser les setups pour augmenter la disponibilité des machines. Des projets SMED couplés à un système de gabarits standards permettraient d'obtenir des gains significatifs aux postes, notamment à la soudure.**

- 9- Éviter le préempté (passage de commande en urgence) en planifiant sur trois périodes de temps : période un fixe à 100%, deux à 50% et trois à 25%. Les urgences seront planifiées en deux et trois sans défaire des setups
- 10- Améliorer la gestion des stocks en établissant des prédictions, et des Max et Mine basés sur la consommation réelle du matériel.
- 11- Faire la planification à capacité finie utilisant la gestion de projet par module pour optimiser l'utilisation des ressources et pour bien synchroniser la production tout en mettant l'accent sur les activités critiques.

Industrie 4.0

- 12- Considérer la possibilité de l'intégration des robots collaboratifs, pour augmenter l'agilité des tâches manuelles et pallier au manque de mains-d'œuvre spécialisées.
- 13- Considérer la possibilité de l'automatisation des tâches de production qui s'y prêtent (répétitives, mécanique, etc.) et l'alimentation des machines.
- 14- Acheminer l'information via un Intranet ou des écrans visuels.
- 15- Diminuer les inventaires et les temps de passage (KPI)
- 16- Standardiser les pièces, les sous-assemblages et les assemblages et favoriser une structure modulaire dans la conception du produit. Cela permet DE FAIRE LES COMMANDES EN LIGNE.

ANNEXE 4 - QUESTIONNAIRE DE L'ÉTAPE AUDIT SITUATION INITIALE

Tableau ANNEXE 4.1 : Questionnaire de l'étape audit tiré de Gamache (2019) complété en septembre 2020

Dimension	Pratique d'affaires	Question	Note globale:	1,08	
Leadership (LDS)	Vision et stratégie	Notre vision 4.0 est cohérente avec les objectifs d'affaires de l'entreprise	0	0	
		Notre vision 4.0 est révisée régulièrement	0		
		Notre vision 4.0 et notre stratégie d'intégration sont communiquées et partagées efficacement	0		
		Notre entreprise a développé une vision de l'intégration d'outils numériques dans ses activités	0		
		Nous avons développé une stratégie d'intégration des technologies numériques cohérente avec la vision 4.0	0		
		Tous les employés comprennent l'impact de la vision 4.0 sur leur travail	0		
	Veille technologique	Les objectifs visés par les activités de veille technologique de mon entreprise sont définis	1	0,5	
		Les résultats des activités de veille technologique sont répertoriés et diffusés dans mon entreprise	0		
		Mon entreprise participe à des activités de veille technologique telles que : événements, salons ou conférences réunissant des experts du milieu	0		
		Mon entreprise se tient informée sur les nouvelles technologies pertinentes à nos activités	1		
	Nouveaux modèles d'affaires	Les technologies numériques que nous possédons permettent d'améliorer nos pratiques d'affaires	3	0,6	
		Nous intégrons les données des technologies numériques pour créer de nouveaux services	0		
		Nous nous tenons informés des changements économiques de notre secteur d'activité	0		
		Nous offrons ou envisageons d'offrir prochainement des services en complément de nos produits	0		
		Nous posons des actions concrètes pour varier notre offre de services	0		
	Engagement et exemplarité	La direction persévère dans la démarche de réalisation de la vision 4.0 malgré les difficultés	3	2	
		Les employés clés sont impliqués dans les processus d'innovation et d'adoption des technologies	3		
		Les employés comprennent comment les technologies vont les aider à accomplir leurs tâches et à atteindre les objectifs de l'entreprise	2		
		Les employés comprennent leur rôle dans la stratégie d'intégration des technologies numériques	1		
Nous avons un plan numérique qui comprend des objectifs concrets (responsable, délais, actions, etc.)		1			
Culture et organisation (CLT)	Gestion du changement	Des techniques concrètes (affiches, courriels, communications internes) sont utilisées pour communiquer la culture de notre entreprise, qui se compose de notre mission, de nos valeurs et de nos règles de fonctionnement	0	1,2	1,61
		La culture de notre entreprise est bien comprise de tous	2		
		La direction fait des efforts concrets pour que les employés se sentent interpellés par la culture de l'entreprise	1		
		Notre démarche de gestion du changement implique les employés directement	2		

Tableau ANNEXE 4.2: Questionnaire de l'étape audit tiré de Gamache (2019) complété en septembre 2020 (Suite)

Dimension	Pratique d'affaires	Question	Note			
Culture et organisation (CLT)	Gestion du changement	Nous avons une démarche structurée pour gérer le changement dans notre entreprise	1	1,51		
	Agilité et innovation	Notre équipe collabore avec un réseau de spécialistes diversifié (ex. : consultants, chercheurs...)	2			1,5
		Notre équipe s'adapte rapidement lors de situations nouvelles	2			
		Notre équipe se sent encouragée à innover par la direction de l'entreprise	1			
		Nous réévaluons nos pratiques sur une base régulière pour abandonner celles qui ne sont plus pertinentes	1			
	Investissement et ressources disponibles	Notre budget d'acquisition, de formation et de maintien des technologies prévoit l'acquisition d'automates ou de robots	0			2,00
		Notre budget d'acquisition, de formation et de maintien des technologies prévoit l'acquisition de logiciels	2			
		Notre budget d'acquisition, de formation et de maintien des technologies prévoit l'acquisition de matériel de communication (site Web, cybercommerce, présence sur les médias sociaux, plateforme de communication interne...)	2			
		Notre budget d'acquisition, de formation et de maintien des technologies prévoit l'acquisition de matériel informatique	3			
		Nous investissons dans les technologies pour accroître notre productivité	2			
		Nous investissons dans les technologies pour améliorer notre infrastructure numérique	3			
	Acquisition et développement de compétences	Nous investissons dans les technologies pour innover dans nos procédés	2			1,5
		La direction comprend les besoins en numérique de notre processus d'affaires	2			
		L'entreprise a créé des programmes de formation au numérique pour tous les employés concernés	1			
		L'entreprise fournit la formation et alloue du temps afin que les employés maîtrisent les technologies	1			
	Ouverture à l'externe et innovation ouverte	L'entreprise sait attirer, motiver et fidéliser les employés talentueux	2			3,66
		Les employés de notre processus d'affaires acceptent les innovations qui n'ont pas été développées à l'interne	4			
		Nous travaillons en collaboration avec des acteurs externes dans le but d'innover	4			
	Lean et Amélioration continue	Nous travaillons en collaboration avec fournisseurs, clients et partenaires dans le but d'améliorer nos performances	3			0,66
Des indicateurs de performance sont en place pour mesurer notre processus d'affaires		0				
Les principes de l'amélioration continue sont utilisés dans notre processus d'affaires		1				
Communication interne	Un climat favorable à l'amélioration continue est en place dans notre processus d'affaires	1	0,75			
	Il y a une bonne communication pour les enjeux touchant notre processus d'affaires	1				
	La culture de collaboration est promue par les dirigeants de l'entreprise	1				
	Les employés de notre processus d'affaires utilisent des outils de collaboration numériques dans leurs communications	1				
Gestion des Technologies (TEC)	Écosystème et architecture	Les objectifs financiers qui concernent notre processus d'affaires sont clairs et compris par les employés	0	1,17		
		Les technologies utilisées dans les opérations et la prise de décision de notre processus d'affaires sont rapides	2			
		Les technologies utilisées dans les opérations et la prise de décision de notre processus d'affaires sont interreliées	1			
		Les technologies utilisées dans les opérations et la prise de décision de notre processus d'affaires répondent à mes besoins	2			
		Les standards à respecter pour les technologies de l'entreprise sont définis	0			
		Il existe dans l'entreprise une carte à jour et détaillée de l'architecture et l'écosystème technologique complet de l'entreprise	0			
	Maîtrise des technologies	Des équipes multidisciplinaires sont formées lors de projets d'implantation des technologies	1	1,67		
		La direction, le personnel technique et les employés s'entendent sur les objectifs auxquels les technologies doivent répondre	1			
		La direction, le personnel technique et les employés s'entendent sur les priorités technologiques	2			

Tableau ANNEXE 4.3: Questionnaire de l'étape audit tiré de Gamache (2019) complété en septembre 2020 (Suite)

Dimension	Pratique d'affaires	Question	Note		
Gestion des Technologies (TEC)	Maîtrise des technologies	Les employés de notre processus d'affaires possèdent les compétences pour bien utiliser les technologies à leur disposition	2	1,00	
		Les employés de notre processus d'affaires ont accès au soutien technique adéquat lié à l'utilisation des technologies à leur disposition	2		
		Les employés de notre processus d'affaires sont impliqués dans l'implantation des technologies qu'ils auront à utiliser.	2		
	Automatisation	L'information envoyée est numérique	1	1,00	
		L'information reçue dans notre processus d'affaires est numérique	1		
		Les employés de notre processus d'affaires ont peu ou pas de tâches répétitives à faire	1		
		Les employés de notre processus d'affaires reçoivent des suggestions de la part des machines ou des systèmes	0		
		L'information envoyée peut être utilisée sans être manipulée en tout ou en partie	2		
		L'information reçue peut être utilisée sans être manipulée en tout ou en partie	1		
	Sécurité informatique	L'entreprise a un plan de continuité pour remettre ses affaires en marche après sinistre (vols, piratage, incendie)	1	2,2	
		Les employés n'ont accès qu'aux systèmes (logiciels, automates, machines) dont ils ont besoin	2		
		Les interactions des employés avec les systèmes sont restreintes à ce qui est strictement nécessaire	4		
		Les systèmes de sécurité informatique sont mis à jour sur une base régulière et systématiquement après la découverte d'une faille	2		
		Tous les employés comprennent les risques en lien avec la sécurité informatique	2		
Gestion des données (DNE)	Acquisition des données	La maintenance sur les bases de données est faite en continu	1	1,33	
		Les bases de données appropriées sont en place dans l'entreprise	2		
		Les besoins d'affaires en matière d'entreposage des données sont analysés	1		
	Livraison des données	Les données nécessaires aux analyses et à la prise de décision sont accessibles sans manipulation (ex. : tableaux croisés) par l'utilisateur	1	1,33	
		Les systèmes d'aide à la décision appropriés sont en place dans l'entreprise	1		
		L'information nécessaire aux analyses et à la prise de décision est disponible	2		
	Qualité des données	Des actions correctives sont effectuées lorsque l'on détecte un problème de qualité des données	0	0,2	
		Des actions ont été mises en place pour s'assurer de la qualité des données à la source (bonne saisie)	0		
		Il n'existe qu'une seule version de chaque entité (ex.: un seul dossier par client)	1		
		La qualité des données est surveillée continuellement	0		
Expérience client (EXP)	Personnalisation	La capacité de personnalisation des produits et services est définie	1	0,75	
		La production permet de s'adapter à des lots uniques à un coût raisonnable	2		
		Le client peut configurer lui-même certains éléments du produit sur une plateforme numérique libre-service (portail, site Web...)	0		
		L'entreprise est en mesure de personnaliser son offre à un client en fonction de ses données (habitudes, historique, etc.)	0		
	Engagement et cocréation	L'entreprise entretient une relation d'écoute avec le client tout au long du processus de création	2	1,33	
		L'entreprise est en mesure de collecter les commentaires et les attentes des clients pour développer ou améliorer les produits	1		
		L'entreprise offre au client de participer de façon constructive au processus de création	1		
					0,96
					0,75

Tableau ANNEXE 4.4: Questionnaire de l'étape audit tiré de Gamache (2019) complété en septembre 2020 (Suite)

Dimension	Pratique d'affaires	Question	Note	
Expérience client (EXP)	Orientation service et Fidélisation	L'entreprise est en mesure de cibler les clients qui lui apportent le plus de valeur	1	0,4
		L'entreprise mesure la satisfaction de ses clients par rapport à ses produits et services	1	
		L'entreprise mesure l'intention de ses clients d'acheter ses produits et services	1	
		L'entreprise mesure l'intention de ses clients de ne pas acheter ses produits et services	1	
		L'entreprise mesure l'intention de ses clients de recommander ses produits et services à ses pairs	0	
	Commerce électronique et SMAC	Les clients peuvent effectuer des achats de produits en ligne de façon autonome	0	0,5
		Les médias électroniques (logiciels de communication, réseaux sociaux, portails...) sont utilisés pour échanger de l'information avec les clients, fournisseurs et partenaires	1	
		Les médias sociaux sont utilisés pour aller chercher de l'information sur les clients	0	
		Les médias sociaux sont utilisés pour créer une relation de proximité avec les clients	1	
Système de mesure (MSR)	Utilisation des données dans les opérations	Les données nécessaires à la prise de décision sont mises à jour en temps réel	1	1
		Les employés affectés aux tâches de ce processus d'affaires ont accès à des outils d'aide à la décision (indicateurs clés de performance, tableaux de bord, rapports...)	1	
		Les employés peuvent facilement accéder aux données dont ils ont besoin	1	
		Les employés utilisent les données pour prendre des décisions efficaces	1	
	Utilisation des données dans les décisions stratégiques	Je m'assiste d'outils d'aide à la décision (KPI, tableaux de bord...)	0	0,8
		Je suis en mesure d'ajuster ma stratégie à l'aide des données et de l'information disponibles	1	
		Je suis en mesure d'analyser la situation de mon entreprise	1	
		Je suis en mesure d'avoir une vue d'ensemble complète des opérations	1	
		Je suis en mesure d'identifier les tendances, opportunités et menaces de mon environnement	1	
				0,90

ANNEXE 5 - QUESTIONNAIRE DE L'ÉTAPE AUDIT SITUATION FINALE

Tableau ANNEXE 5.1: Questionnaire de l'étape audit tiré de Gamache (2019) complété en juillet 2022

Dimension	Pratique d'affaires	Question	Note juillet 2022	1,50	
Leadership (LDS)	Vision et stratégie	Notre vision 4.0 est cohérente avec les objectifs d'affaires de l'entreprise	1	0,83	0,98
		Notre vision 4.0 est révisée régulièrement	1		
		Notre vision 4.0 et notre stratégie d'intégration sont communiquées et partagées efficacement	1		
		Notre entreprise a développé une vision de l'intégration d'outils numériques dans ses activités	2		
		Nous avons développé une stratégie d'intégration des technologies numériques cohérente avec la vision 4.0	0		
		Tous les employés comprennent l'impact de la vision 4.0 sur leur travail	0		
	Veille technologique	Les objectifs visés par les activités de veille technologique de mon entreprise sont définis	1	0,50	
		Les résultats des activités de veille technologique sont répertoriés et diffusés dans mon entreprise	0		
		Mon entreprise participe à des activités de veille technologique telles que : événements, salons ou conférences réunissant des experts du milieu	0		
		Mon entreprise se tient informée sur les nouvelles technologies pertinentes à nos activités	1		
	Nouveaux modèles d'affaires	Les technologies numériques que nous possédons permettent d'améliorer nos pratiques d'affaires	3	0,60	
		Nous intégrons les données des technologies numériques pour créer de nouveaux services	0		
		Nous nous tenons informés des changements économiques de notre secteur d'activité	0		
		Nous offrons ou envisageons d'offrir prochainement des services en complément de nos produits	0		
		Nous posons des actions concrètes pour varier notre offre de services	0		
	Engagement et exemplarité	La direction persévère dans la démarche de réalisation de la vision 4.0 malgré les difficultés	3	2,00	
		Les employés clés sont impliqués dans les processus d'innovation et d'adoption des technologies	3		
Les employés comprennent comment les technologies vont les aider à accomplir leurs tâches et à atteindre les objectifs de l'entreprise		2			
Les employés comprennent leur rôle dans la stratégie d'intégration des technologies numériques		1			
Nous avons un plan numérique qui comprend des objectifs concrets (responsable, délais, actions, etc.)		1			
Culture et organisation (CLT)	Gestion du changement	Des techniques concrètes (affiches, courriels, communications internes) sont utilisées pour communiquer la culture de notre entreprise, qui se compose de notre mission, de nos valeurs et de nos règles de fonctionnement	0	1,60	2,17

Tableau ANNEXE 5.2: Questionnaire de l'étape audit tiré de Gamache (2019) complété en juillet 2022 (Suite)

Dimension	Pratique d'affaires	Question	Note		
Culture et organisation (CLT)	Gestion du changement	La culture de notre entreprise est bien comprise de tous	2	1,60	2,17
		La direction fait des efforts concrets pour que les employés se sentent interpellés par la culture de l'entreprise	1		
		Notre démarche de gestion du changement implique les employés directement	3		
		Nous avons une démarche structurée pour gérer le changement dans notre entreprise	2		
	Agilité et innovation	Notre équipe collabore avec un réseau de spécialistes diversifié (ex. : consultants, chercheurs...)	3	1,75	
		Notre équipe s'adapte rapidement lors de situations nouvelles	2		
		Notre équipe se sent encouragée à innover par la direction de l'entreprise	1		
		Nous réévaluons nos pratiques sur une base régulière pour abandonner celles qui ne sont plus pertinentes	1		
	Investissement et ressources disponibles	Notre budget d'acquisition, de formation et de maintien des technologies prévoit l'acquisition d'automates ou de robots	0	2,14	
		Notre budget d'acquisition, de formation et de maintien des technologies prévoit l'acquisition de logiciels	2		
		Notre budget d'acquisition, de formation et de maintien des technologies prévoit l'acquisition de matériel de communication (site Web, cybercommerce, présence sur les médias sociaux, plateforme de communication interne...)	2		
		Notre budget d'acquisition, de formation et de maintien des technologies prévoit l'acquisition de matériel informatique	3		
		Nous investissons dans les technologies pour accroître notre productivité	3		
		Nous investissons dans les technologies pour améliorer notre infrastructure numérique	3		
		Nous investissons dans les technologies pour innover dans nos procédés	2		
	Acquisition et développement de compétences	La direction comprend les besoins numériques de notre processus d'affaires	2	2,00	
		L'entreprise a créé des programmes de formation numérique pour tous les employés concernés	2		
		L'entreprise fournit la formation et alloue du temps afin que les employés maîtrisent les technologies	2		
		L'entreprise sait attirer, motiver et fidéliser les employés talentueux	2		
	Ouverture à l'externe et innovation ouverte	Les employés de notre processus d'affaires acceptent les innovations qui n'ont pas été développées à l'interne	4	3,67	
		Nous travaillons en collaboration avec des acteurs externes dans le but d'innover	4		
		Nous travaillons en collaboration avec fournisseurs, clients et partenaires dans le but d'améliorer nos performances	3		
	Lean et Amélioration continue	Des indicateurs de performance sont en place pour mesurer notre processus d'affaires	0	2,00	
Les principes de l'amélioration continue sont utilisés dans notre processus d'affaires		3			
Un climat favorable à l'amélioration continue est en place dans notre processus d'affaires		3			

Tableau ANNEXE 5.3: Questionnaire de l'étape audit tiré de Gamache (2019) complété en juillet 2022 (Suite)

Dimension	Pratique d'affaires	Question	Note	
Culture et organisation (CLT)	Communication interne	Il y a une bonne communication pour les enjeux touchant notre processus d'affaires	2	2,00
		La culture de collaboration est promue par les dirigeants de l'entreprise	2	
		Les employés de notre processus d'affaires utilisent des outils de collaboration numériques dans leurs communications	3	
		Les objectifs financiers qui concernent notre processus d'affaires sont clairs et compris par les employés	1	
Gestion des Technologies (TEC)	Écosystème et architecture	Il existe dans l'entreprise une carte à jour et détaillée de l'architecture et l'écosystème technologique complet de l'entreprise	1	2,17
		Les standards à respecter pour les technologies de l'entreprise sont définis	1	
		Les technologies utilisées dans les opérations et la prise de décision de notre processus d'affaires répondent à mes besoins	2	
		Les technologies utilisées dans les opérations et la prise de décision de notre processus d'affaires sont faciles à utiliser	3	
		Les technologies utilisées dans les opérations et la prise de décision de notre processus d'affaires sont interreliées	3	
		Les technologies utilisées dans les opérations et la prise de décision de notre processus d'affaires sont rapides	3	
	Maîtrise des technologies	Des équipes multidisciplinaires sont formées lors de projets d'implantation des technologies	2	2,67
		La direction, le personnel technique et les employés s'entendent sur les objectifs auxquels les technologies doivent répondre	2	
		La direction, le personnel technique et les employés s'entendent sur les priorités technologiques	2	
		Les employés de notre processus d'affaires possèdent les compétences pour bien utiliser les technologies à leur disposition	3	
		Les employés de notre processus d'affaires ont accès au soutien technique adéquat lié à l'utilisation des technologies à leur disposition	4	
		Les employés de notre processus d'affaires sont impliqués dans l'implantation des technologies qu'ils auront à utiliser.	3	
	Automatisation	L'information envoyée est numérique	2	1,83
		L'information reçue dans notre processus d'affaires est numérique	2	
		Les employés de notre processus d'affaires ont peu ou pas de tâches répétitives à faire	2	
		Les employés de notre processus d'affaires reçoivent des suggestions de la part des machines ou des systèmes	1	
		L'information envoyée peut être utilisée sans être manipulée en tout ou en partie	2	
		L'information reçue peut être utilisée sans être manipulée en tout ou en partie	2	

Tableau ANNEXE 5.4: Questionnaire de l'étape audit tiré de Gamache (2019) complété en juillet 2022 (Suite)

Dimension	Pratique d'affaires	Question	Note	
Gestion des Technologies (TEC)	Sécurité informatique	L'entreprise a un plan de continuité pour remettre ses affaires en marche après sinistre (vols, piratage, incendie)	3	3,00
		Les employés n'ont accès qu'aux systèmes (logiciels, automates, machines) dont ils ont besoin	3	
		Les interactions des employés avec les systèmes sont restreintes à ce qui est strictement nécessaire	4	
		Les systèmes de sécurité informatique sont mis à jour sur une base régulière et systématiquement après la découverte d'une faille	3	
		Tous les employés comprennent les risques en lien avec la sécurité informatique	2	
Gestion des données (DNE)	Acquisition des données	La mise à jour des bases de données est faite en continu	2	2,33
		Les bases de données appropriées sont en place dans l'entreprise	3	
		Les besoins d'affaires en matière d'entreposage des données sont analysés	2	
	Livraison des données	Les données nécessaires aux analyses et à la prise de décision sont accessibles sans manipulation (ex. : tableaux croisés) par l'utilisateur	1	1,33
		Les systèmes d'aide à la décision appropriés sont en place dans l'entreprise	1	
		L'information nécessaire aux analyses et à la prise de décision est disponible	2	
	Qualité des données	Des actions correctives sont effectuées lorsque l'on détecte un problème de qualité des données	1	0,80
		Des actions ont été mises en place pour s'assurer de la qualité des données à la source (bonne saisie)	0	
		Il n'existe qu'une seule version de chaque entité (ex.: un seul dossier par client)	2	
		La qualité des données est surveillée continuellement	1	
Les standards de qualité des données sont établis		0		
Expérience client (EXP)	Personnalisation	La capacité de personnalisation des produits et services est définie	2	1,00
		La production permet de s'adapter à des lots uniques à un coût raisonnable	2	
		Le client peut configurer lui-même certains éléments du produit sur une plateforme numérique libre-service (portail, site Web...)	0	
		L'entreprise est en mesure de personnaliser son offre à un client en fonction de ses données (habitudes, historique, etc.)	0	
	Engagement et cocréation	L'entreprise entretient une relation d'écoute avec le client tout au long du processus de création	2	1,33
		L'entreprise est en mesure de collecter les commentaires et les attentes des clients pour développer ou améliorer les produits	1	
		L'entreprise offre au client de participer de façon constructive au processus de création	1	

Tableau ANNEXE 5.5: Questionnaire de l'étape audit tiré de Gamache (2019) complété en juillet 2022 (Suite)

Dimension	Pratique d'affaires	Question	Note	
Expérience client (EXP)	Orientation service et Fidélisation	L'entreprise est en mesure de cibler les clients qui lui apportent le plus de valeur	1	0,60
		L'entreprise mesure la satisfaction de ses clients par rapport à ses produits et services	1	
		L'entreprise mesure l'intention de ses clients d'acheter ses produits et services	1	
		L'entreprise mesure l'intention de ses clients de ne pas acheter ses produits et services	0	
		L'entreprise mesure l'intention de ses clients de recommander ses produits et services à ses pairs	0	
	Commerce électronique et SMAC	Les clients peuvent effectuer des achats de produits en ligne de façon autonome	0	0,75
		Les médias électroniques (logiciels de communication, réseaux sociaux, portails...) sont utilisés pour échanger de l'information avec les clients, fournisseurs et partenaires	2	
		Les médias sociaux sont utilisés pour aller chercher de l'information sur les clients	0	
		Les médias sociaux sont utilisés pour créer une relation de proximité avec les clients	1	
Système de mesure (MSR)	Utilisation des données dans les opérations	Les données nécessaires à la prise de décision sont mises à jour en temps réel	1	1,25
		Les employés affectés aux tâches de ce processus d'affaires ont accès à des outils d'aide à la décision (indicateurs clés de performance, tableaux de bord, rapports...)	1	
		Les employés peuvent facilement accéder aux données dont ils ont besoin	1	
		Les employés utilisent les données pour prendre des décisions efficaces	2	
	Utilisation des données dans les décisions stratégiques	Je m'assiste d'outils d'aide à la décision (KPI, tableaux de bord...)	0	0,80
		Je suis en mesure d'ajuster ma stratégie à l'aide des données et de l'information disponibles	1	
		Je suis en mesure d'analyser la situation de mon entreprise	1	
		Je suis en mesure d'avoir une vue d'ensemble complète des opérations	1	
		Je suis en mesure d'identifier les tendances, opportunités et menaces de mon environnement	1	
				1,03

