

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

PRIORISATION DES PRÉALABLES DE L'INDUSTRIE 4.0 DANS UN CONTEXTE DE PME
MANUFACTURIÈRES EN VUE DE LES PRÉPARER À LEUR TRANSFORMATION
NUMÉRIQUE

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

PAR
MARIE CHARBONNEAU-GENEST

DÉCEMBRE 2021

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

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

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 ou cette thèse. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire ou de cette thèse requiert son autorisation.

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

Ce mémoire a été dirigé par :

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

UQTR

Jury d'évaluation du mémoire :

Sébastien Gamache, Ph.D., ing.

UQTR

Pascal Forget, Ph.D., ing.

UQTR

Christophe Danjou, Ph.D.

École Polytechnique de Montréal

REMERCIEMENTS

Pour commencer, je voudrais remercier mon directeur de maîtrise. Son dévouement et son accompagnement m'ont vraiment permis de dépasser mes limites. Je me sens choyée d'avoir été sa première supervision et d'avoir été aussi bien accompagnée. Tous les prochain(e)s étudiant(e)s seront chanceux d'avoir Sébastien Gamache à leurs côtés lors de cette grande étape.

Je ne peux pas non plus passer sous silence l'Université du Québec à Trois-Rivières qui m'a offert une formation universitaire à la hauteur de mes attentes autant au niveau du baccalauréat qu'au deuxième cycle. Les contacts privilégiés avec les membres du personnel nous permettent vraiment de se développer. En combinaison à l'UQTR, j'aimerais remercier mon entreprise test, Équifab inc., pour m'avoir accueillie et fait confiance pour la durée entière de mon mandat.

Pour finir, je dois dire un merci particulier aux gens de mon entourage qui m'ont soutenue durant cette épreuve haute en émotions. Merci à mes proches, ma famille et un merci spécial à mon collègue, Marc-Antoine Roy, pour sa patience, son soutien et sa façon de me challenger dans mes décisions.

SOMMAIRE

Depuis l'arrivée de l'Industrie 4.0, il est possible d'observer un problème de performance chez les PME manufacturières dû à leur difficulté à répondre aux besoins de personnalisation de masse des consommateurs. Celles-ci doivent ainsi développer une meilleure capacité et agilité de production pour répondre à ces demandes changeantes. Les PME ressentent progressivement le besoin d'augmenter leur niveau de compétitivité afin de réagir à la pression causée par les grandes entreprises ayant déjà entamé leur virage vers l'Industrie 4.0. Ainsi, les PME manufacturières entendent de plus en plus parler des bienfaits de l'Industrie 4.0 et sont encouragées à entamer leur transformation numérique. Toutefois, les PME rencontrent parfois des problèmes majeurs lors de l'implantation de technologies, ce qui mène souvent à des échecs. Cette problématique semble provenir du fait que les PME ne sont pas prêtes à effectuer un tel changement.

Ce retard semble principalement dû au manque de ressources financières et humaines des PME. Les auteurs mentionnent une série de préalables essentiels à mettre en place afin de solidifier les fondations des PME en vue de leur transformation numérique. Les principaux préalables se regroupent en sept catégories : la connaissance et l'expertise, la stratégie d'affaires, les principes du *Lean*, l'agilité de production, l'accès aux données, la capacité financière et la cybersécurité. La recherche effectuée dans ce mémoire a pour objectif de simuler l'impact des préalables sur la performance d'une PME manufacturière. Pour y arriver, la méthodologie de la recherche proposée dans ce mémoire combine un plan d'expériences complet et un modèle de simulation pour tester l'effet de cinq des sept catégories énumérées plus haut, soit le *Lean*, l'agilité, la connaissance, la stratégie d'affaires et l'accès aux données sur l'amélioration de la performance de la PME en vue de l'introduction de l'Industrie 4.0.

Les résultats de l'étude démontrent que les cinq préalables testés ont un effet positif sur le niveau de performance des PME, lui-même mesuré par le volume de production sur un intervalle de temps déterminé. Toutefois, les préalables semblent varier d'importance selon le système de production et les enjeux de l'entreprise en question. Cette recherche a permis de soulever quatre constats principaux en lien avec la préparation nécessaire à l'implantation des pratiques et des technologies liées à l'Industrie 4.0 :

- les principes du *Lean*, à eux seuls, offrent un potentiel largement supérieur aux autres préalables;
- la stratégie d'affaires, si elle n'est pas supportée concrètement par d'autres préalables, n'offre qu'un faible potentiel d'amélioration;
- cibler l'avantage concurrentiel qui priorise les gains importants pour l'entreprise, par exemple les principes d'agilité n'offrent des gains intéressants que lorsque les délais sont un enjeu stratégique;
- la structure (et la culture) de l'entreprise est prioritaire aux technologies numériques.

De plus, cette recherche a permis de clarifier la distinction entre le *readiness* et la maturité numérique. Le sujet de recherche de ce mémoire est un sujet innovateur et important pour aider les PME à entamer leur transformation numérique. Les résultats proposent aux PME manufacturières un guide pour les orienter dans leur préparation à l'Industrie 4.0 et ce, en fonction des différents objectifs qu'elles peuvent avoir.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	IV
SOMMAIRE	V
TABLE DES MATIÈRES	VII
LISTE DES TABLEAUX	X
LISTE DES FIGURES	XII
LISTE DES ÉQUATIONS.....	XIII
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 - MISE EN CONTEXTE	3
1.1 Problématique.....	3
1.2 Questions de recherche	5
1.3 Objectifs de recherche	8
1.3.1 Objectif principal.....	8
1.3.2 Objectifs secondaires	8
CHAPITRE 2 - REVUE DE LITTÉRATURE.....	10
2.1 Industrie 4.0	10
2.2 Caractéristiques des PME.....	16
2.2.1 Caractéristiques techniques.....	16
2.3 Comparaison des termes maturité et <i>readiness</i>	18
2.4 Les préalables de l'Industrie 4.0.....	21
2.4.1 Stratégie de sélection pour la revue de littérature	21
2.4.2 Recensement de la littérature	22
2.4.3 Facteurs d'adoption de l'Industrie 4.0	36
2.5 Matrice de la revue de littérature.....	38
2.6 Discussions	44
2.6.1 Frontière entre maturité et <i>readiness</i>	44
2.6.2 Interprétation des préalables de la littérature	45

CHAPITRE 3 - MÉTHODOLOGIE DE LA RECHERCHE.....	52
3.1 Hypothèses de recherche.....	52
3.1.1 Liste des hypothèses	53
3.2 Cadre conceptuel	57
3.3 Structure de la méthodologie	59
3.4 Plan d'expériences	60
3.4.1 Quantification des préalables	62
3.5 Modèle de simulation ARÉNA	71
3.5.1 Données de l'entreprise test.....	73
3.5.2 Description du modèle de simulation.....	79
3.5.3 Calcul du régime permanent.....	80
3.5.4 Nombre de réplifications	81
3.5.5 Validation du modèle	83
CHAPITRE 4 - RÉSULTATS	86
4.1 Résultats du plan d'expériences.....	86
4.1.1 Diagrammes d'interactions.....	88
4.1.2 Modèle mathématique	91
4.2 Analyses de variances.....	92
CHAPITRE 5 - ANALYSE DES RÉSULTATS ET DISCUSSIONS	94
5.1 Analyse des résultats.....	94
5.1.1 Observations globales	94
5.1.2 Analyses de Tukey	96
5.1.3 Comparaison des gains	104
5.1.4 Présentation des constats de la recherche.....	111
5.2 Discussions	117
5.2.1 Choix des variables dépendantes à l'étude	117
5.2.2 Retour sur l'objectif et les hypothèses de recherche	118
5.2.3 Comparaison avec la littérature.....	121

CHAPITRE 6 - ÉTUDE DE CAS	124
6.1 Présentation de l'entreprise.....	124
6.1.1 Historique de l'entreprise	124
6.1.2 Mandat.....	125
6.2 Méthodologie sur le terrain	126
6.2.1 Projets d'amélioration implantés.....	127
6.2.2 Comparaison des résultats.....	129
6.3 Conclusion du projet Mitacs.....	131
6.3.1 Difficultés et limites rencontrées	132
6.3.2 Facteurs de succès	133
CHAPITRE 7 - CONCLUSION.....	135
7.1 Contributions apportées	136
7.2 Limites de la recherche	137
7.3 Sources de biais.....	138
7.4 Perspectives futures.....	139
7.4.1 Perspective future #1 : augmenter l'échantillon	139
7.4.2 Perspective future #2 : quantifier les préalables.....	140
7.4.3 Perspective future #3 : détailler la zone de transition entre le <i>readiness</i> et la maturité numérique	140
7.4.4 Perspective future #4 : première technologie	141
LISTE DES RÉFÉRENCES.....	142
ANNEXE I	152
ANNEXE II	156
ANNEXE III	159
ANNEXE IV	167
ANNEXE V	177
ANNEXE VI	180
ANNEXE VII	189

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1	Tableau de la fréquence des termes cités.....	15
Tableau 2.2	Liste des pratiques d'affaires (source : Gamache, Abdul-Nour et Baril, 2019)	23
Tableau 2.3	Liste des préalables par technologie (traduit de Pacchini, 2019)	25
Tableau 2.4	Liste des préalables par technologie (traduit de Pacchini, 2019)	26
Tableau 2.5	Liste des variables indépendantes (traduit et adapté de Gamache et al., 2017)	32
Tableau 2.6	Légende de couleur de la matrice	38
Tableau 2.7	Matrice de la revue de littérature	39
Tableau 2.8	Tableau de comparaison des termes cités par article.....	48
Tableau 3.1	Tableau des hypothèses de recherche.....	56
Tableau 3.2	Facteurs et niveaux du plan d'expériences	60
Tableau 3.3	Plan d'expériences complet	61
Tableau 3.4	Facteurs et niveaux détaillés par gains quantifiables	70
Tableau 3.5	Liste des produits offerts.....	72
Tableau 3.6	Temps de production préassemblage en heures.....	73
Tableau 3.7	Temps de production ligne d'assemblage en heures.....	74
Tableau 3.8	Temps de production sur les camions et supplémentaires en heures.....	74
Tableau 3.9	Comparaison des demi-largeurs par réplication	82
Tableau 3.10	Résultats des validations effectuées	84
Tableau 3.11	Pourcentages d'écart pour la validation des préalables	85
Tableau 4.1	Tableau des résultats moyens obtenus.....	87
Tableau 4.2	Tableau résumé des ANOVA	93
Tableau 5.1	Expériences avec les meilleurs résultats par variables dépendantes	95
Tableau 5.2	Résumé des gains en pourcentages pour chacun des préalables indépendamment.....	97

Tableau 5.3	Résumé des gains en pourcentages pour chacun des préalables combinés à la stratégie d'affaires.....	100
Tableau 5.4	Pourcentages d'augmentation avec la stratégie d'affaires.....	101
Tableau 5.5	Résumé des gains en pourcentages pour les interactions significatives	104
Tableau 5.6	Liste des gains pour le volume de production	105
Tableau 5.7	Liste des gains pour le temps de fabrication.....	108
Tableau 5.8	Liste des gains pour le temps de passage et délai de création	110
Tableau 5.9	Résumé de l'atteinte des objectifs	119
Tableau 6.1	État des préalables présents dans l'entreprise	130
Tableau 6.2	Comparaison de l'état initial et l'état amélioré de l'entreprise test.....	131

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1	Les 25 groupes de préalables (traduit et adapté de Rauch et al., 2019)	29
Figure 2.2	Échelle entre <i>readiness</i> et maturité	44
Figure 2.3	Résumé des préalables cités dans la littérature	50
Figure 3.1	Diagramme d'Ishikawa	53
Figure 3.2	Cadre conceptuel	58
Figure 3.3	Représentation des indicateurs de temps	64
Figure 3.4	Schéma de la ligne d'assemblage	71
Figure 3.5	Visuel du modèle de simulation	75
Figure 3.6	Visuel du modèle de simulation	76
Figure 3.7	Visuel du modèle de simulation	77
Figure 3.8	Visuel du modèle de simulation	78
Figure 3.9	Résultats du régime permanent.....	81
Figure 4.1	Diagramme d'interactions pour le temps de fabrication.....	88
Figure 4.2	Diagramme d'interactions pour le temps de passage	89
Figure 4.3	Diagramme d'interactions pour le délai de création	90
Figure 4.4	Diagramme d'interactions pour le volume de production	90
Figure 5.1	Test de Tukey pour l'interaction <i>Lean</i> -Connaissance-Stratégie (ABC)	107
Figure 5.2	Échelle augmentée de la phase de préparation au numérique.....	120
Figure 6.1	Gantt de réalisation chez Équifab	128

LISTE DES ÉQUATIONS

Équation 5.1	Gains potentiels engendrés par les préalables	95
Équation 5.2	Calcul du pourcentage d'écart	97
Équation 5.3	Exemple d'un calcul du pourcentage d'écart pour le <i>Lean</i>	97
Équation 5.4	Pourcentage d'amélioration obtenu par la combinaison <i>Lean</i> -Connaissance-Stratégie.....	107

INTRODUCTION

L'évolution du secteur manufacturier lors du dernier siècle a montré le passage de la mécanisation aux chaînes d'assemblage grâce à l'électrification pour ensuite introduire l'automatisation. Depuis 2011, une nouvelle révolution, aussi connue sous le nom d'Industrie 4.0, a fait son apparition avec les systèmes cyber-physiques (Qin, Liu, & Grosvenor, 2016). L'Industrie 4.0 correspond à l'ère de l'interconnectivité en temps réel. Cette révolution permet aux entreprises d'améliorer leur productivité ainsi que leur agilité en production (PWC, 2016). Ces gains permettent aux entreprises de mieux répondre aux exigences de leurs clients face à la personnalisation de masse (Porter & Heppelmann, 2014). Selon plusieurs auteurs, une entreprise ayant intégré des concepts et des technologies issues de l'Industrie 4.0 améliore en parallèle sa productivité, ses coûts et sa qualité et réussit par le fait même à améliorer sa compétitivité globale (Brettel, Friederichsen, Keller, & Rosenberg, 2014).

Ce virage numérique requiert de mettre en place plusieurs outils technologiques tels que l'Internet des Objets ou l'Infonuagique (Schumacher, Erol, & Sihn, 2016). Cela implique pour les entreprises de grands investissements en temps et en argent (Ghobakhloo & Fathi, 2019). Dans le milieu manufacturier d'aujourd'hui, les grandes entreprises sont de plus en plus nombreuses à adhérer à l'Industrie 4.0 (Rauch, Dallasega, & Unterhofer, 2019). Les auteurs montrent que les petites et moyennes entreprises (PME) font face à un retard d'adhésion à la transformation numérique (Dassisti, Giovannini, Merla, Chimienti, & Panetto, 2019). En fonction du retard ciblé, ce mémoire vise à offrir une orientation technique pour aider les PME manufacturières à être prêtes pour accomplir cette transformation. Dans la littérature, il est possible d'identifier les faiblesses des PME manufacturières qui se lancent dans le virage numérique, notamment au niveau du manque d'expertise, de main-d'œuvre et de capacité financière (Gamache, Abdul-Nour, & Baril, 2017); (Machado, et al., 2019);

(Moeuf, et al., 2020). Toutefois, les PME doivent s'assurer de maintenir leur niveau de compétitivité sur les marchés et doivent, elles aussi, être en mesure d'améliorer leur productivité et leur agilité de production, ce que l'Industrie 4.0 devrait leur permettre (Leurent & Boer, 2019) (Türkes, et al., 2019); (Zhang, Chen, Chen, & Chong, 2021). Ce mémoire tente de cibler les préalables essentiels à mettre en œuvre pour augmenter les chances de succès du passage à l'Industrie 4.0 des PME. La recherche proposée a simulé les préalables ciblés dans la littérature à l'aide d'un plan d'expériences et d'un modèle de simulation. Cela dans le but de connaître l'impact positif de ces préalables sur la performance des PME manufacturières en vue de les préparer à entamer leur transformation vers l'Industrie 4.0. Les résultats ont été testés dans une PME québécoise et ceux-ci ont permis de prioriser les préalables à la préparation à l'Industrie 4.0 et de les classer en fonction de l'objectif ciblé par la PME manufacturière.

Le mémoire suivant présente six chapitres, soit la mise en contexte de la problématique et les objectifs, une revue de littérature détaillée sur les termes importants de ce mémoire, la méthodologie, les résultats, l'analyse des résultats et l'étude de cas en entreprise. Finalement, une conclusion présente un résumé du mémoire, les principaux résultats obtenus, les constats marquants du travail exécuté, les contributions apportées par cette recherche et des perspectives de recherche futures.

CHAPITRE 1 - MISE EN CONTEXTE

1.1 Problématique

Dans le contexte industriel d'aujourd'hui, les besoins des clients changent continuellement. Les consommateurs désirent de plus en plus des produits personnalisés à faibles coûts. Pour répondre aux exigences de personnalisation de masse, les entreprises doivent améliorer leur agilité afin de réduire les délais de réaction (Rauch et al., 2019). Depuis l'arrivée de la quatrième révolution industrielle, il est possible d'aller chercher un gain d'agilité grâce aux technologies numériques (Zhang et al., 2021). Toutefois, il est aussi possible d'améliorer son agilité avec des méthodes plus classiques, par exemple les structures de produits modulaires (Abdul-Nour, Drolet, & Lambert, 1999). L'Industrie 4.0 permet d'améliorer la concurrence globale de l'entreprise, autant au niveau de la productivité, des coûts de production et de la qualité (Brettel et al., 2014) qu'au niveau de l'agilité (Zhang et al., 2021). Les grandes entreprises semblent avoir plus de ressources pour réagir à cette demande personnalisée (Machado et al., 2019).

La littérature exprime toutefois que les petites et moyennes entreprises manufacturières ne suivent pas cette tendance technologique (Li, Fast-Berglund, & Paulin, 2019); (STIQ, 2020). Il est mentionné que les PME ne semblent pas capables d'exploiter le potentiel d'amélioration qu'offre l'Industrie 4.0 (Rauch et al., 2019); (Samaranayake, Ramanathan, & Laosirihongthong, 2017). Cette difficulté d'engagement peut s'expliquer par le fait que les PME ne sont pas équipées, autant en équipements qu'en compétences, pour implanter et s'approprier les technologies associées à l'Industrie 4.0 (Chonsawat & Sopadang, 2020); (Faller & Feldmüller, 2015). L'aspect de la capacité financière est aussi un facteur limitant dans les PME (Ghobakhloo & Ching, 2019); (Rauch et al., 2019). De plus, puisque cette révolution est plutôt récente, les

bénéfices et les exigences de l'Industrie 4.0 ne sont pas encore connus des PME (Machado et al., 2019); (Moeuf, Pellerin, Lamouri, Tamayo-Giraldo, & Barbaray, 2018). Les PME ont de la difficulté à comprendre la portée offerte par la numérisation manufacturière (Harris, Yarbrough, Abernathy, & Peters, 2019), ce qui les empêche de voir le potentiel de ce changement.

Pour le succès futur des PME manufacturières, celles-ci doivent être en mesure de répondre aux exigences grandissantes de leurs clients afin de rester compétitives sur les marchés (Moeuf et al., 2018; Zhang et al., 2021). Le virage numérique qu'offre l'Industrie 4.0 est donc la direction à prendre pour assurer la survie des entreprises (Zhang et al., 2021). Si les entreprises ne s'adaptent pas à cette révolution numérique, celles-ci risquent de perdre des parts de marché et tranquillement disparaître (Kiraz, Canpolat, Özkurt, & Taskin, 2020).

Cette problématique d'adhésion est aussi observable chez les PME manufacturières (PMEM) du Québec (Gamache, Abdul-Nour, & Baril, 2019); (Gamache et al., 2017). Ce manque d'adhésion crée un écart entre la productivité des PMEM québécoises et leurs concurrents étrangers (STIQ, 2020). Ce retard pourrait être causé par un manque de connaissances du sujet. Selon un rapport du STIQ, il n'y a qu'environ un tiers des PMEM québécoises (39 %) qui connaissent et qui ont entendu parler de l'Industrie 4.0 (STIQ, 2020). Les PME ont souvent des stratégies d'affaires orientées vers la flexibilité, la réactivité et la proximité avec sa clientèle (Mittal, Khan, Romero, & Wuest, 2018). Cela étant dit, l'Industrie 4.0 s'aligne avec les valeurs réactives des PME et semble ainsi offrir une solution aux PMEM québécoises pour continuer de se démarquer sur les marchés. Selon Investissement Québec, il est important pour les PME de prendre action face à cette ère de changement qu'est l'Industrie 4.0 (Leblanc, 2020); (Zhang et al., 2021). De plus, selon Leurent et Boer (2019), cette révolution est accessible autant aux PME qu'elle l'est pour les grandes entreprises.

1.2 Questions de recherche

La littérature scientifique montre que l'Industrie 4.0 offre aux entreprises différents potentiels d'amélioration : réduction des coûts, optimisation des infrastructures, meilleures prises de décisions, meilleure performance opérationnelle, augmentation de l'agilité de production et plusieurs autres (Anggrahini, Kurniati, Karningsih, Parenreng, & Syahroni, 2018); (Leurent et Boer, 2019). En réfléchissant sur la disparité entre le niveau d'adhésion des grandes entreprises versus les PME manufacturières pour l'Industrie 4.0, une question se pose :

- Sachant le potentiel que semble apporter l'implantation d'outils technologiques issus de l'Industrie 4.0, pourquoi les PMEM n'introduisent-elles pas les outils de l'Industrie 4.0 dans leur organisation?

La littérature scientifique identifie à ce sujet un manque de compréhension des PME par rapport aux avantages de l'Industrie 4.0 (Machado et al., 2019; Moeuf et al., 2018) et un manque de compétences pour commencer et maintenir cette transformation (Harris et al., 2019). Un autre problème qui retarde la transformation est que les PME manquent de temps et de ressources qualifiées (Lefebvre, 2021); (Matt, Orzes, Rauch, & Dallasega, 2018); (Rioux, 2021). Il y a donc plusieurs enjeux qui freinent l'adhésion des PMEM à débiter leur transformation numérique. De plus, une étude du Boston Consulting Group (BCG) indique que 70 % des PME ayant mis en place des actions technologiques pour suivre le mouvement numérique ont rencontré un échec d'implantation (Forth, Reichert, de Laubier, & Chakraborty, 2020). Une autre étude réalisée en 2008 indique aussi un faible pourcentage de réussite lié à une implantation technologique, soit que 70 % des PME qui intégraient un système ERP (*Enterprise Resource Planning*) vivaient, elles aussi, un échec d'implantation (Poba-Nzaou, 2008). Ces pourcentages soulèvent un

parallèle important par rapport à la relation des PME avec les technologies. À la suite de cette première question et ce contexte, une deuxième question se pose :

- Comment est-il possible de réduire les risques d'échecs lors d'implantations technologiques reliés à l'Industrie 4.0 dans les PMEM?

Étant donné les multiples échecs reliés à des implantations technologiques, il est intéressant de se questionner sur les causes racines de ceux-ci. Plusieurs articles mentionnent l'aspect financier ou même le manque de ressources à titre de sources potentielles (Matt et al., 2018), mais y a-t-il une raison plus globale qui peut expliquer ces nombreux échecs d'implantation? Pourquoi un grand nombre de PME ne semblent pas prêtes à implanter les technologies de l'Industrie 4.0? Dans la littérature scientifique et la littérature grise, il y a des dizaines d'échelles de maturité numérique (Ganzarain & Errasti, 2016); (Lichtblau, et al., 2015); (Mittal et al., 2018); (Schumacher et al., 2016). Il y a aussi des échelles de *readiness* (Indrawan, Cahyo, Simaremare, Aisyah, & Tauviquirrahman, 2019); (Pacchini, Lucato, Facchini, & Mummolo, 2019). Toutefois, dans la littérature scientifique, il semble y avoir peu de distinction entre la définition de ces deux termes (Pacchini et al., 2019). La définition de la frontière entre la préparation au numérique et la transformation de l'Industrie 4.0 est d'ailleurs un point de départ important pour bien déterminer les préalables à considérer dans ce mémoire.

D'un niveau plus pratique, depuis 2017 au Québec, il y a un programme de diagnostic et de plan numérique (appelé Audit Industrie 4.0) qui a pour objectif d'aider les PME à entamer leur transformation vers l'Industrie 4.0 (Investissement Québec, 2020). Malgré les subventions associées, seulement 12 % des PME ont effectué un Audit Industrie 4.0 (STIQ, 2020). Après deux ans, il y a de moins en moins d'audits 4.0 réalisés parce que ceux-ci n'apportent pas les résultats espérés, soit seulement 7 % des PME ont mis en œuvre un plan stratégique numérique (STIQ, 2020). Ainsi, le ministère de l'Économie et

de l'Innovation (MEI) du Québec a apporté des modifications à son programme d'accompagnement numérique (Chamberland, 2020). Les PME ne semblent pas prêtes à entamer le virage numérique (Rauch et al., 2019). Sachant qu'elles ne sont pas prêtes, il est possible de chercher une solution pour les aider à être prêtes et ainsi diminuer le risque d'échec relié à l'implantation de l'Industrie 4.0. Ces deux premières interrogations mènent à la question principale de cette recherche :

- **Quels sont les préalables que les PMEM doivent mettre en place pour s'assurer d'être prêtes et performantes lors de l'implantation des concepts et technologies de l'Industrie 4.0?**

Cette question principale apporte plusieurs questionnements secondaires. Ces interrogations ont permis d'orienter la recherche.

1. Que signifie être prêtes à l'Industrie 4.0? Où se trouve la frontière entre le *readiness* et la maturité?
2. Quels préalables ont une influence positive sur la performance des PMEM en vue de leur préparation à l'Industrie 4.0? Par exemple :
 - est-ce que le *Lean* est un facteur facilitant à cette transformation?
 - est-ce que les outils d'agilité tels que la standardisation par conception modulaire sont des facteurs facilitants à cette transformation?
 - est-ce que l'implantation d'un système de gestion de l'information (ERP, MES, système de gestion de base de données) est un facteur facilitant à cette transformation?
3. Comment prioriser les préalables pour s'assurer que les PMEM sont prêtes pour ce virage technologique?

1.3 Objectifs de recherche

1.3.1 Objectif principal

L'objectif principal est de **simuler les préalables de l'Industrie 4.0 dans un contexte de PMEM et de mesurer leur impact sur la performance de l'entreprise, pour ensuite proposer un guide d'implantation de ces préalables en vue d'aider les PMEM à avoir des bases solides pour leur transformation numérique.**

Les préalables sont des actions/étapes à mettre en place de façon préliminaire pour rendre une PMEM **prête** à commencer sa transformation vers l'Industrie 4.0. Ainsi, une entreprise qui désire commencer sa transformation numérique doit mettre en place les étapes préalables. Ces préalables permettent aux PME manufacturières d'avoir les outils nécessaires pour assurer le succès de cette transformation.

1.3.2 Objectifs secondaires

Pour atteindre l'objectif principal, il est nécessaire d'explorer différentes avenues du sujet. Ces différentes avenues sont présentées à titre d'objectifs secondaires. Les objectifs secondaires sont les suivants.

1. Établir la frontière entre la phase de préparation (*readiness*) et la phase d'implantation (maturité) de la transformation vers l'Industrie 4.0.
2. Identifier les préalables à l'Industrie 4.0 au niveau technique, technologique et humain.
3. Simuler les préalables et leurs combinaisons pour connaître leur impact sur la performance des PMEM en vue d'être prêtes à entamer leur transformation vers l'Industrie 4.0.

4. Valider les résultats de l'effet des préalables sur le *readiness* numérique lors d'une étude de cas dans une PMEM québécoise.

La mise en contexte de ce chapitre permet de cibler la problématique explorée lors de cette recherche. L'identification et l'analyse des préalables permettront d'aider les PMEM moins outillées à suivre la tendance numérique. Les résultats de cette recherche orienteront les PMEM dans leur transformation en leur offrant un guide pour s'assurer que celles-ci soient prêtes. Ce mémoire pourra par la suite servir de guide permettant aux PMEM de se préparer à cette transformation et ainsi viser un accroissement de leur performance et favoriser leur succès lors de l'implantation de l'Industrie 4.0.

CHAPITRE 2 - REVUE DE LITTÉRATURE

Le sujet principal de ce mémoire, soit le *readiness* numérique, englobe l'utilisation de plusieurs concepts. La littérature a permis d'établir une vue d'ensemble sur les définitions des concepts utilisés en plus d'exposer les différentes interprétations des auteurs par rapport au sujet étudié. En fonction de l'objectif de recherche préalablement présenté, la revue de littérature couvre les aspects permettant l'atteinte du niveau de *readiness* visé dans cette étude.

Les sujets de recherche présentés dans cette revue de littérature sont l'Industrie 4.0, les caractéristiques des PMEM et la comparaison des termes maturité et *readiness*. Ensuite, **les préalables à l'Industrie 4.0 sont abordés**. À la fin de chaque partie, les termes de la recherche utilisés sont définis précisément en fonction des définitions soulevées dans la littérature et la pensée des auteurs de ce mémoire afin d'aligner le terme avec la pertinence de la recherche.

Lors de la réalisation de cette revue de littérature, les bases de données qui ont été utilisées sont Scopus, IEEE Xplore, EBSCO et Google Scholar. Pour chaque section de la revue, les mots-clés utilisés pour les recherches sont identifiés.

2.1 Industrie 4.0

La définition de l'Industrie 4.0 varie beaucoup d'un auteur à l'autre. Il est cependant possible de cibler les ressemblances. Le mot-clé utilisé dans cette partie est « Industry 4.0 ».

L'Industrie 4.0 a fait son apparition en Allemagne à la Foire d'Hanovre en 2011 (Qin, Liu et al., 2016). Les auteurs Quin et al. (2016) mentionnent que depuis l'introduction de ce

sujet, les recherches se multiplient, ce qui permet d'orienter davantage la définition de cette révolution. Les auteurs décrivent l'ère de l'Industrie 4.0 dans le milieu manufacturier comme étant composée d'échange d'informations, donc de machines et unités de production contrôlées, qui seront autonomes et intelligentes dans leur interopérabilité (Qin et al., 2016). Malgré les nombreuses recherches, les composantes correspondant à l'Industrie 4.0 ne sont pas encore bien définies et continuent de varier d'un auteur à l'autre (Lasi, Fettke, Kemper, Feld, & Hoffmann, 2014).

Tortorella et Fettermann (2018) font un parallèle avec la définition présentée lors de la Foire d'Hanovre, soit l'introduction de la connectivité des machines, de l'intelligence des produits, des systèmes et des solutions interconnectés et l'intègrent à la définition présentée par d'autres auteurs pour approfondir la compréhension. Ashton (2009) et Lasi et al. (2014) indiquent que la combinaison de ces aspects technologiques sert à établir des unités de production intelligentes grâce à l'intégration de composantes numériques pouvant enregistrer et contrôler les équipements. En se basant sur ces définitions, Tortorella et Fettermann (2018) mentionnent que l'Industrie 4.0 a pour objectif de créer un système de production autonome et dynamique. La création de ce nouveau système de production se base principalement sur l'obtention d'informations et la communication technologique permettant de faciliter la production de masse de produits personnalisés.

Dans la littérature, l'article de Schumacher et al. (2016) est cité plus de 700 fois et souvent la citation fait référence à leur définition de l'Industrie 4.0. Les auteurs indiquent que l'Industrie 4.0 fait référence à l'avancement technologique où l'internet et les outils technologiques représentent la ligne directrice vers l'intégration des différents concepts. Ces concepts font référence aux machines intelligentes, aux équipements, aux lignes de production et aux processus à travers les différents secteurs de l'organisation afin de créer une nouvelle forme d'intelligence, un réseau et une

chaîne de valeur agile. Les auteurs indiquent que les exigences du virage numérique correspondent à l'Internet des objets, l'Internet industriel, le *cloud-based manufacturing* et le *smart manufacturing* (Schumacher et al., 2016).

D'un autre point de vue, Geissbauer, Vedso et Schrauf (2016) décrivent l'Industrie 4.0 comme étant une révolution qui se concentre sur la numérisation de bout en bout de tous les actifs physiques de l'entreprise. Il s'agit donc d'intégrer des écosystèmes numériques entre les différents éléments de la chaîne de valeur. Selon les auteurs, les gains reliés à la mise en place de l'Industrie 4.0 touchent principalement la création de valeur. Ces gains sont reliés à la mise en place de nouvelles technologies et à leur capacité d'analyser et de communiquer l'information entre elles. Les auteurs mentionnent que de façon générale, le terme Industrie 4.0 permet de répondre à la tendance actuelle vers la numérisation et l'automatisation des entreprises.

Les auteurs Moeuf et al. (2018) font référence à trois définitions présentées dans la littérature afin de les comparer et émettent leur propre définition. Selon Trappey, Trappey, Hareesh Govindarajan, Chuang et Sun (2017), l'Industrie 4.0 correspond à l'intelligence tactique pour les industries manufacturières, grâce à l'implantation de technologies telles que l'Internet des objets, l'Infonuagique, et le *Big Data*. Pour l'organisation québécoise CEFRIO (Danjou, Pellerin, & Rivest, 2017), l'Industrie 4.0 peut prendre une définition plus globale. Elle définit l'Industrie 4.0 comme étant une initiative pour améliorer les processus, les produits et les services dans l'objectif de décentraliser la prise de décisions grâce à l'acquisition des données en temps réel. Pour les auteurs Kohler et Weisz (2016), l'Industrie 4.0 est une nouvelle approche permettant de contrôler les processus de production en fournissant la synchronisation en temps réel des flux de production. Cette synchronisation en temps réel permet de faciliter la fabrication personnalisée des produits. Leur conclusion porte sur le fait que l'Industrie 4.0 est basée sur l'émergence de nouvelles technologies telles que l'Infonuagique,

l'Internet des objets, les Systèmes cyber-physiques et l'Analyse des données massives (*Big Data*). Les auteurs mentionnent aussi que l'utilisation de ces types de technologies permet d'améliorer le partage d'information à travers l'entièreté du système. Ces technologies facilitent l'adaptation des opérations en temps réel pour mieux répondre aux demandes variantes des clients ainsi qu'offrir un meilleur contrôle global des systèmes (Moeuf et al., 2018).

L'article de Castelo-Branco, Cruz-Jesus et Oliveira (2019) présente une définition concise du terme Industrie 4.0 en référant aux travaux de deux groupes d'auteurs : Smit, Kreutzer, Moeller et Carlberg (2016) et Hofmann et Rüsch (2017). L'Industrie 4.0 est de plus en plus utilisée pour décrire une entreprise numérique. Cela signifie une entreprise ayant des processus manufacturiers complètement automatisés qui sont intégrés dans la chaîne d'approvisionnement afin de réduire au maximum l'intervention humaine.

Dans la littérature, plusieurs autres auteurs présentent une définition de l'Industrie 4.0. Certaines de ces définitions supplémentaires sont présentées afin d'approfondir la compréhension de la révolution industrielle pour ce travail de recherche. Selon Dilberoglu, Gharehpapagh, Yaman et Dolen (2017) et Mostermann et Zander (2016), l'Industrie 4.0 correspond à l'intégration d'un système de production intelligent et de technologies d'informations avancées basées sur l'utilisation de logiciels intégrés. Pour Li, Hou et Wu (2017), l'Industrie 4.0 est un ensemble de technologies basées sur la numérisation et l'interconnectivité de toutes les unités de production présentes dans un système économique. Machado et al. (2019) définissent l'Industrie 4.0 comme étant des systèmes intégrés et connectés permettant d'éliminer les barrières entre les limites de l'usine réelle et virtuelle et ce, en les reliant à l'implantation de l'Internet des objets et les Systèmes cyber-physiques. Pour finir, Kagermann, Wahlster et Helbig (2013) définissent l'Industrie 4.0 comme étant l'intégration des Systèmes cyber-physiques dans la production et la logistique d'une entreprise, en plus d'implanter l'Internet des objets

dans les processus industriels. Pour eux, l'Industrie 4.0 occasionne des conséquences positives sur la chaîne de valeur, sur l'environnement de travail, sur les services et sur les modèles d'affaires de l'entreprise. Ils indiquent aussi l'importance d'utiliser les Systèmes cyber-physiques pour mieux traiter et communiquer l'information technologique permettant ainsi de faciliter les processus manufacturiers.

Tous ces auteurs partagent une opinion variée de l'Industrie 4.0 mais l'idée principale revient toutefois au même, soit que **l'Industrie 4.0 correspond à l'implantation de technologies numériques permettant de créer des systèmes intelligents et connectés qui partagent des données en temps réel**. Les conclusions, elles, varient davantage d'un auteur à l'autre entre les sujets suivants : les gains d'autonomie, d'interconnectivité, de valeur ajoutée, de contrôle ou d'adaptabilité de production personnalisée.

Les 10 articles ciblés pour comparer la définition de l'Industrie 4.0 proviennent premièrement d'articles qui adressent tous un lien avec le *readiness* numérique. Ce choix est stratégique afin d'obtenir une définition de l'Industrie 4.0 pour ce travail en relation avec le sujet principal du mémoire. Ensuite, en fonction de ces 10 articles sélectionnés, tous les termes utilisés par les auteurs ont été regroupés sous 10 catégories, soit en fonction d'un nombre de catégories permettant de regrouper toutes les différentes appellations dans les définitions. Pour chaque article, la définition a été associée aux termes choisis. Par exemple, pour toutes références à l'Infonuagique, l'Internet des objets, les Systèmes cyber-physiques, le *Big Data* et autres mentions de technologies, l'article est regroupé sous la catégorie des technologies 4.0.

Le Tableau 2.1 présente la comparaison des termes utilisés par les auteurs afin de définir l'Industrie 4.0 pour ce travail.

Tableau 2.1 Tableau de la fréquence des termes cités

Articles	Ecosystème numérique	Systèmes intelligents	Autonomie	Connectivité	Production de masse personnalisée	Automatisation	Communication/ accès informations	Technologies 4.0	Contrôle	Valeur ajoutée	TOTAUX
Qin. et al. (2016)		x	x	x		x		x			50%
Tortorella et Fettermann (2018)	x	x	x	x	x	x	x	x			80%
Schumacher, Erol, et Sihn. (2016)		x		x	x		x		x		60%
Geissbauer. et al. (2016)	x				x	x	x		x		50%
Moeuf. et al. (2018)		x			x		x	x	x		70%
Castelo-Branco. et al. (2019)	x	x	x		x						40%
Mostermann, P.J. et Zander, J. (2016)		x					x				20%
Li. et al. (2017)	x			x			x				30%
Machado. et al. (2019)		x		x			x				30%
Kagermann. et al. (2013)						x	x		x		30%
Pourcentage de popularité	40%	70%	30%	50%	30%	30%	50%	80%	30%	40%	

Les comparaisons du Tableau 2.1 permettent d'éclaircir le niveau de compréhension face à cette nouvelle ère industrielle. En fonction de ce tableau, il a été possible de choisir la définition utilisée pour ce travail de recherche, soit celle de Tortorella et Fettermann (2018). Ainsi, l'**Industrie 4.0** correspond à l'implantation de technologies numériques permettant de rendre les systèmes de production plus autonomes, plus dynamiques, plus connectés et plus contrôlés. Cette implantation favorise la communication et la gestion de l'information pour faciliter la production de masse de produits personnalisés (Tortorella et Fettermann, 2018).

Ce choix s'explique premièrement par rapport à l'importance de la problématique de ce mémoire. Ainsi, il était important que le choix soit basé principalement sur le fait que la définition inclut un lien avec la production de masse personnalisée. Cette première contrainte permettait de cibler les définitions présentées par trois des auteurs (Moeuf et al., 2018; Schumacher et al., 2016; Tortorella et Fettermann, 2018). Deuxièmement, le choix final s'est arrêté par rapport à la définition avec le plus de termes associés à la définition, soit 8 sur 10 (Tortorella et Fettermann, 2018). Cette deuxième contrainte

permet d'éviter de restreindre la définition et ainsi lui garder un horizon ouvert face aux bénéfices associés à l'implantation des concepts et technologies de l'Industrie 4.0.

2.2 Caractéristiques des PME

La problématique de cette recherche concerne les petites et moyennes entreprises manufacturières du Québec. Il est donc nécessaire de cibler les caractéristiques qui définissent une PME manufacturière, entre autres parce que la réalité entre une PME et une grande entreprise est différente sur plusieurs niveaux (Rauch et al., 2019). Cette partie de la revue de littérature sert à établir les différentes caractéristiques afin de présenter une définition complète et claire pour le travail de recherche. Les mots-clés utilisés dans les outils de recherche bibliographiques sont les suivants : PME, *SME**, manufacturier et *manufacturing*.

2.2.1 Caractéristiques techniques

La littérature présente plusieurs caractéristiques différentes pour décrire les PME manufacturières. Pour Moeuf et al. (2018), les stratégies d'affaires d'une PME sont souvent basées sur la flexibilité, la réactivité et la proximité avec la clientèle. De telles caractéristiques rendent les PME très propices à l'intégration de l'Industrie 4.0, une révolution qui partage des valeurs similaires. Toutefois, Romelaer et Mintzber (1982) mentionnent que la majorité des PME utilise des stratégies à court terme, ce qui les limite dans leurs décisions d'investissement à long terme telles que les technologies reliées à l'Industrie 4.0. De plus, les PME ont souvent accès à des ressources financières limitées pour le secteur de la recherche et développement en plus d'avoir peu d'employés qualifiés (Matt et al., 2018), ce qui peut aussi se définir par un faible taux d'investissement dans des projets de croissance (STIQ, 2020).

De plus, selon Torrès (1999), la structure organisationnelle d'une PME se caractérise par la proximité de l'équipe de direction. La proximité au sein d'une PME occasionne une implication directe de la part de l'ensemble des employés et la direction dans les prises de décisions, ce qui peut être un atout important (Moreira, 2021). Sous un autre angle, cette proximité peut être nuisible vue la relation personnelle des dirigeants dans les décisions stratégiques (Torrès, 2016). Un autre point qui reflète la réalité des PME est qu'il y a souvent une absence d'experts techniques au sein d'une PME, ce qui limite le niveau de ressources en soutien pour les différents processus (Moeuf et al., 2018). Cela amène les PME à souvent avoir une plus faible productivité, des coûts de production plus élevés et une plus faible performance de livraison que les grandes entreprises (Moeuf et al., 2018).

Gamache, Abdul-Nour et Baril (2017) présentent les objectifs des PME, peu importe le secteur d'activités. Les PME se concentrent à offrir des produits ou des services de qualité supérieure aux plus faibles coûts possibles, dans les délais les plus courts. Les auteurs indiquent aussi que les PME veulent développer des processus de production efficaces et compétitifs. Pour y arriver, les PME doivent continuer d'innover au niveau de leurs produits et de leurs processus. Selon les auteurs, il est donc essentiel que les PME utilisent le *Lean* pour les aider à atteindre leurs objectifs en éliminant au maximum le gaspillage. De plus, Rauch et al. (2019) mentionnent que pour les PME, l'implantation de l'Industrie 4.0 représente un grand défi. Ce défi est expliqué par les auteurs par le fait que les PME ne sont pas prêtes à ce changement technologique en raison des limites occasionnées par la capacité de l'organisation.

D'un point de vue quantitatif, la littérature caractérise les PME comme étant des entreprises qui possèdent moins de 250 employés (Direction générale des entreprises et de l'UE, 2008) ou encore qui possèdent entre 10 et 249 employés (OCDE, 2004). Au Canada, la description d'une PME compte moins de 500 employés (Riding & Orser,

2007). De plus, selon les trois références citées, les PME génèrent un chiffre d'affaires annuel inférieur à 50 millions de dollars.

Pour ce travail, la définition de PME utilisée est celle proposée par l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE, 2004), parce qu'il s'agit de la source offrant la plus grande précision sur le nombre d'employés. Ainsi, selon les auteurs, les **PME manufacturières** possèdent entre 10 et 249 employés et ont un chiffre d'affaires annuel inférieur à 50 millions de dollars.

Pour le bienfait de la recherche, cet intervalle du nombre d'employés aurait pu être limité davantage. Un intervalle plus ciblé aurait permis de faire une distinction entre une moyenne et une petite entreprise, parce que la réalité entre une PME de moins de 19 employés est bien différente de celle d'une PME de plus de 100 employés (STIQ, 2020). Toutefois, aucune précision supplémentaire n'est établie puisque dans les articles ciblés, les descriptions respectent toujours l'intervalle choisi.

2.3 Comparaison des termes maturité et *readiness*

Le contexte de ce mémoire étant principalement basé sur le fait que les PME manufacturières ne semblent pas prêtes à l'Industrie 4.0, le terme *readiness* numérique prend tout son sens et représente le thème principal de ce travail. Toutefois, dans la littérature, il semble avoir une confusion dans entre les termes maturité et *readiness*. Lors des recherches effectuées, il est possible d'observer que les définitions et l'utilisation du terme *readiness* varient d'un auteur à l'autre. Parfois, lorsqu'il est question de présenter un modèle ou une étude sur le *readiness*, il est en réalité question de maturité technologique. Par exemple, Lichtblau et al. (2015), dans un rapport cité près de 180 fois pour présenter le *readiness*, présentent un modèle de *readiness* qui, finalement, semble plutôt être un modèle de maturité pour l'implantation des

technologies de l'Industrie 4.0. Le rapport de Lichtblau et al. (2015) est un exemple de cette confusion, mais d'autres auteurs utilisent aussi le terme *readiness* pour finalement présenter des indicateurs ou des échelles de maturité directement liés à l'utilisation des technologies de l'Industrie 4.0 (Chonsawat et Sopadang, 2020). Certains auteurs émettent toutefois une distinction claire (Machado et al., 2019; Pacchini et al., 2019; Schumacher et al. 2016), tandis que d'autres contribuent à accentuer le flou entre les deux termes en les utilisant de façon interchangeable. Cette confusion diminue la compréhension des chercheurs et des praticiens. À la suite de cette remarque, il est important d'établir une comparaison claire de ces deux termes pour ensuite se concentrer uniquement sur l'aspect du *readiness* lors de ce travail de recherche.

Pour cette partie de la revue de littérature, les mots-clés utilisés sont « *readiness* », « *digital readiness* », « modèle de maturité » et « *Maturity model* ».

L'article de Schumacher et al. (2016) présente une définition très distincte entre les deux termes. Le terme de *readiness* est défini comme étant l'évaluation de l'état de préparation qui a lieu avant de s'engager dans le processus de maturité. En d'autres mots, l'auteur mentionne que le *readiness* démontre que l'entreprise ou le processus en question est prêt à engendrer son développement vers une nouvelle évolution. Ceci corrobore le fait que le terme *readiness* corresponde à être prêt et est donc relié à ce que la recherche actuelle tente d'établir pour la transformation numérique. De l'autre côté, le terme maturité est défini par les auteurs comme étant l'évaluation de l'état actuel de la maturité d'un processus en action, ce qui veut dire être capable de saisir l'évolution de la mise en place d'un nouveau processus aux différentes étapes de l'implantation en vue de l'état final recherché, un état considéré complètement mature. De plus, dans cet article, l'auteur fait la comparaison de l'objectif d'un modèle de maturité versus un modèle de *readiness*. Selon l'auteur, un modèle de maturité sert d'instrument pour conceptualiser et mesurer la maturité d'une organisation ou d'un

processus en fonction de cibles prédéterminées. Tandis qu'un modèle de *readiness* a pour objectif de cibler le point de départ d'un projet et ainsi permettre l'initiation au processus de développement visé.

Pacchini et al. (2019) présentent un modèle de *readiness* pour établir à quel niveau les entreprises sont prêtes à intégrer les technologies associées à l'Industrie 4.0. Les auteurs cherchent à définir les deux termes afin de bien orienter leur recherche. Pour y arriver, les auteurs comparent plusieurs définitions de la littérature. Ils utilisent la définition de Schumacher et al. (2016) présentée dans le paragraphe précédent. Cette définition est fréquemment utilisée par les chercheurs lorsqu'ils établissent une distinction entre les deux termes. Pour approfondir sa comparaison, Pacchini et al. (2019) font aussi référence aux définitions présentées dans différents dictionnaires. Le *Cambridge Dictionary* (Press & Walter, 2015) présente le *readiness* comme étant l'état d'être préparé pour quelque chose, tandis que la maturité est un état très avancé ou développé. Pour le *Oxford Dictionary* (Stevenson, 2010), le terme *readiness* signifie l'état d'être prêt pour quelque chose et le terme maturité signifie l'état d'être mature. À la suite de ces définitions, les auteurs expriment leurs propres définitions utilisées dans leur travail de recherche. Dans l'article, le terme *readiness* signifie la capacité d'une organisation d'accomplir une nouvelle tâche. En comparaison, le terme maturité est défini comme étant le niveau d'évolution qu'une organisation a atteint face à l'accomplissement d'une certaine tâche (Pacchini et al., 2019).

À la suite de cette comparaison de la littérature, les termes *readiness* et maturité sont définis comme suit dans le travail de recherche actuel.

***Readiness* numérique :** l'état initial lorsque l'organisation est prête à entamer sa transformation vers l'Industrie 4.0 (Pacchini et al., 2019);

Maturité : la façon dont les organisations évoluent étape par étape le long d'un chemin anticipé, souhaité ou logique (Röglinger, Pöppelbub, & Becker, 2012).

À partir de maintenant, le terme *readiness* sera utilisé dans ce mémoire comme un terme francophone. Le *readiness* servira toujours à présenter la capacité d'être prêt au numérique, soit lorsque les préalables sont mis en place.

2.4 Les préalables de l'Industrie 4.0

Dans la littérature, plusieurs auteurs se questionnent sur les outils technologiques permettant le déploiement de l'Industrie 4.0 tels que le *Big Data* ou l'Internet des objets ou encore sur l'étude de modèles de maturité. Cependant, peu d'auteurs s'intéressent aux préalables nécessaires à mettre en place pour accomplir ce virage numérique avec succès. Tel que présenté dans le Chapitre 1, une entreprise est prête à entamer sa transformation vers l'Industrie 4.0 lorsqu'elle a implanté tous les préalables. Cette partie de la revue de littérature a servi à établir les préalables les plus populaires et les mots-clés utilisés sont : *readiness*, *readiness digital*, *préalables*, *prerequisite*, *requirement*, *barrières* et *barriers*.

2.4.1 Stratégie de sélection pour la revue de littérature

Pour cette section, il est important d'établir la méthode utilisée afin de sélectionner les articles pertinents à l'identification des préalables à l'Industrie 4.0. Premièrement, cette revue de littérature a été faite en deux phases. La première en novembre 2019 afin de réaliser la revue de littérature de ce mémoire et la deuxième en mars 2021 afin d'augmenter la revue de littérature par rapport aux nouvelles publications.

Premièrement, tous les articles choisis ont fait partie d'une inclusion globale, soit uniquement des articles en français ou anglais et publiés après 2015 pour garder les références les plus récentes possibles. Deuxièmement, en fonction de recherches associées aux mots clés présentés, il y a eu un premier tri par rapport à l'intérêt du titre et ensuite un deuxième tri en fonction de la pertinence du sommaire. Pour finir, les articles finaux ont été sélectionnés dû à leur concordance avec la définition du *readiness* numérique, de là l'importance de la section 2.3 de la revue de littérature. En plus de leur concordance, les articles devaient présenter des préalables associés à l'Industrie 4.0 ou cibler des barrières limitant le succès de la transformation numérique.

En 2019, la revue de littérature comptait sept articles alignés avec le sujet de recherche. Il a toutefois été possible en 2021 d'ajouter 17 articles présentant des préalables de l'Industrie 4.0 pour ainsi obtenir un total de 24 articles considérés pour leur pertinence pour ce mémoire.

2.4.2 Recensement de la littérature

Pour commencer, il y a un parallèle à faire avec l'article des auteurs Gamache, Abdul-Nour et Baril (2019) et la problématique à laquelle ce mémoire tente de répondre. Leur article est basé sur la problématique qu'il y a peu d'efforts de recherche pour établir une manière efficace d'effectuer son passage vers l'Industrie 4.0 et ce, encore moins pour les PME manufacturières. L'article présente un modèle de maturité testé dans 21 PME en transformation vers le numérique en se basant sur les pratiques d'affaires et les outils numériques à intégrer. Toutefois, les résultats démontrent que les PME qui ont commencé leur transformation ont un niveau de performance numérique discipliné, mais peu intégré et pas en temps réel, ce qui signifie que les processus sont soutenus par plusieurs outils mais que ceux-ci ne sont pas intégrés entre eux. Gamache, Abdul-Nour et Baril (2019) soulèvent aussi une problématique supplémentaire reliée au

manque de préparation des PME. Cette problématique provient du fait que sur l'échantillon de 21 entreprises, 13 entreprises n'étaient pas prêtes à commencer leur transformation, soit 62 % de l'échantillon approchées n'étaient pas en mesure de commencer leur transformation. Ce pourcentage élevé permet de confirmer l'importance d'établir les préalables à l'Industrie 4.0 pour aider les PME dans leur transformation.

À travers la liste de pratiques d'affaires ciblées dans le modèle de maturité présenté par Gamache, Abdul-Nour et Baril (2019), certaines de ces pratiques peuvent être considérées comme des préalables. Le Tableau 2.2 présente les pratiques d'affaires pouvant être mises en place préalablement au début de la transformation.

Tableau 2.2 Liste des pratiques d'affaires (source : Gamache, Abdul-Nour et Baril, 2019)

Leadership	Vision et stratégie
	Engagement et exemplarité
Gestion des données	Collecte de données de qualité
	Utilisation stratégique et opérationnelle des données
Culture et organisation	Organisation du travail (Lean)
	Acquisition et développement des compétences
	Agilité et innovation
	Investissement et ressources
Expériences clients	Personnalisation
Technologie	Cybersécurité

Les pratiques d'affaires identifiées par les auteurs peuvent être considérées comme des préalables, puisqu'une pratique d'affaires représente un travail en continu. Par exemple, une stratégie établie préalablement au projet sera utilisée à long terme afin de suivre l'évolution de la transformation. Les auteurs ciblent quelques pratiques d'affaires permettant un gain de performance supérieur à 20 %, soit la vision et

stratégie, l'engagement et exemplarité et la collecte de données de qualité. Sachant cela, les auteurs indiquent qu'il est essentiel de savoir par où commencer la transformation et d'implanter une vision et une stratégie en vue d'accomplir une transformation numérique Gamache et al. (2019).

Pacchini et al. (2019) présentent un modèle pour évaluer le niveau de *readiness* d'une entreprise face à l'Industrie 4.0. Le modèle présenté se base sur les technologies de l'Industrie 4.0 les plus souvent citées dans la littérature, soit l'Internet des objets, le *Big Data*, l'Infonuagique, les Systèmes cyber-physiques, les Robots autonomes, la Fabrication additive, la Réalité augmentée et l'Intelligence artificielle (Pacchini et al., 2019). En connaissant les technologies les plus pertinentes pour l'Industrie 4.0, les auteurs se sont concentrés pour établir la liste des préalables nécessaires pour chaque technologie. Ils ont déterminé que six préalables sont essentiels à mettre en place avant l'introduction de chaque technologie. En fonction des huit technologies, il y a donc une liste de 48 préalables en vue de préparer l'entreprise à une transformation vers l'Industrie 4.0. Le Tableau 2.3 présente la liste exhaustive des préalables cités dans le travail complet de Pacchini (2019). Les préalables identifiés en vert représentent une redondance entre les prérequis de quelques technologies.

Tableau 2.3 Liste des préalables par technologie (traduit de Pacchini, 2019)

Internet des objets	Big Data
Avoir et utiliser la technologie RFID	Avoir toutes les données et informations organisées et maintenues dans un système numérique
Utiliser des codes de produits électroniques	Avoir un système de communication permettant le trafic de beaucoup de données
Disposer d'un réseau et d'une capacité sans fil à haute vitesse	Avoir des ressources qualifiées pour la gestion des données
Avoir un protocole de communication M2M	Adresser le <i>Big Data</i> de façon stratégique
Disposer de systèmes de sécurité de l'information pour atténuer les cyber-attaques	Cibler les problèmes à régler avec l'accès des données
Organiser des événements virtuels	Disposer de systèmes de sécurité de l'information pour atténuer les cyber-attaques
Infonuagique	Systèmes cyber physiques
Avoir un pare-feu pour la sécurité des données	Disposer d'un réseau et d'une capacité sans fil à haute vitesse
Avoir des employés formés pour les nouvelles technologies de l'infonuagique	Installer des capteurs sur les objets pour assurer leur connectivité
Avoir une culture basée sur la décentralisation des données	Avoir une grande capacité de gestion de données
Disposer de systèmes intégrés pour assurer l'interopérabilité de ses processus	Avoir accès aux données par l'infonuagique
Avoir la capacité financière pour l'investissement de l'infonuagique	Avoir une structure informatique physiquement installée
Disposer d'un réseau et d'une capacité sans fil à haute vitesse	Avoir une architecture orientée vers le service

Tableau 2.4 Liste des préalables par technologie (traduit de Pacchini, 2019)

Robots collaboratifs	Fabrication additive
Avoir des ressources qualifiées en robotique	Évaluer les caractéristiques des pièces à produire
Être conscient des limitations liées aux robots collaboratifs	Prendre en considération la capacité technique
Avoir la capacité financière	Prendre en considération le temps de production
Faire une cartographie détaillée des processus et du flux de production	Avoir une cybersécurité
Faire un travail psychologique avec les employés en relation avec les robots collaboratifs	Avoir des ressources qualifiées
Avoir les connaissances des standards: ISO TS 15066 et NBR 12110/2	Avoir numérisé en 3D les produits
Réalité augmentée	Intelligence artificielle
Prendre en considération l'environnement des postes de travail	Avoir la capacité financière
Avoir tous ses documents numérisés	Avoir une stratégie et des connaissances reliées au IA
Avoir une cartographie détaillée du processus	Avoir une communication M2M
Faire une étude ergonomique du poste de travail de l'employé	Avoir des capteurs sur les équipements
Avoir un logiciel avec la capacité d'opérer la réalité virtuelle	Mettre en place des facilitateurs à l'intégration des technologies numériques
Savoir quelle information doit pouvoir être partagée	Avoir une cybersécurité

Les préalables qui reviennent les plus fréquemment et ce, peu importe la technologie sont les suivants :

- avoir une grande capacité de réseau internet;
- avoir une communication *machine-to-machine*;
- avoir un système de sécurité contre les cyberattaques;
- avoir des employés qualifiés;
- avoir accès à des données en temps réel grâce à des capteurs;
- avoir les ressources financières suffisantes.

Étant donné les problèmes des PME face à leurs ressources financières et leur accessibilité à des employés qualifiés, ces dernières éprouvent de la difficulté à se lancer dans l'implantation des technologies de l'Industrie 4.0 dès le début de leur transformation numérique. Il y a plusieurs facteurs qui doivent être considérés par les entreprises avant de commencer leur transformation vers l'Industrie 4.0 (Pacchini et al., 2019).

En fonction de chaque technologie, les préalables sont analysés afin de pouvoir calculer le niveau de *readiness* global de l'entreprise. Le modèle de Pacchini et al. (2019) utilise un questionnaire présentant les différents préalables ainsi qu'une échelle d'accomplissement du préalable. Par exemple, le niveau zéro de l'échelle représente que la compagnie n'a pas infrastructure pour recevoir un système numérique. Le questionnaire doit être rempli par les entreprises et par la suite, chaque critère est évalué afin d'établir le niveau de *readiness* de chaque technologie ainsi que le niveau de *readiness* global de l'entreprise face à l'Industrie 4.0. En utilisant ces résultats, les auteurs présentent une charte d'évaluation permettant de représenter visuellement à l'entreprise leur niveau de *readiness*, soit embryonnaire, débutant, primaire, intermédiaire, avancé ou prêt.

Les auteurs Samaranayake et al. (2017) utilisent une approche plutôt similaire à Pacchini et al. (2019). Sans créer un modèle de *readiness*, ces auteurs tentent de déterminer le degré d'importance de différents facteurs dans la transformation des PME vers l'Industrie 4.0. Les auteurs déterminent une liste de préalables en fonction des besoins technologiques que requiert l'Industrie 4.0. Les auteurs regroupent les sous-facteurs sous six dimensions du *readiness* technologique :

- développer des systèmes et infrastructures basés sur l'internet;
- augmenter les connaissances des employés sur les technologies;

- augmenter l’agilité des machines et équipements (connexion internet);
- créer des compétences en gestion de données;
- augmenter le partage de données (décentralisé);
- développer une cybersécurité pour les données.

En fonction de quatre variables dépendantes, soit la réduction de coûts, la flexibilité de la production, la stabilité des processus et la réduction de consommation d’énergie, les auteurs ont fait l’analyse d’importance pour les six dimensions. En se référant à un groupe d’experts dans le secteur, il est déterminé dans l’article de Samaranayake et al. (2017) que la variable dépendante la plus importante pour cette étude est la flexibilité de production. Cette variable est considérée comme celle ayant la plus grande importance, soit 37,7 %. Celle-ci est suivie de près par la stabilité dans les processus, avec 34 % d’importance. Ainsi, les auteurs ont pu cumuler les différentes opinions des experts pour les facteurs d’importance et les deux dimensions les plus importantes pour assurer le *readiness* des entreprises dans leur transformation numérique sont les connaissances technologiques des employés et la gestion des données. Il y a une ressemblance entre les dimensions et les résultats obtenus dans cet article et celui de Pacchini et al. (2019). Les deux critères les plus importants font aussi partie de la liste à haute fréquence des préalables présentée par Pacchini et al. (2019).

Singh et Bhanot (2019) se concentrent, de leur côté, sur les préalables à mettre en place pour introduire l’Internet des objets. L’Internet des objets fait partie des technologies de l’Industrie 4.0. Les deux facteurs qui ressortent comme étant les plus importants sont la cybersécurité des données et la connaissance et l’expertise de la main-d’œuvre. De plus, l’Internet des objets demande d’avoir mis en place une infrastructure informatique et un réseau internet permettant de faire la gestion d’un grand flux de données. Les auteurs indiquent aussi que l’aspect financier est un aspect à ne pas négliger car une

telle implantation occasionne des investissements importants. Les conclusions de cet article sont similaires aux conclusions des auteurs précédents, soit Pacchini et al. (2019) et Samaranayake et al. (2017).

Rauch et al. (2019) présentent une liste des exigences liées au *Smart Manufacturing*, soit le manufacturier intelligent. Les auteurs établissent les exigences, les barrières et les limitations du manufacturier intelligent. À la suite des ateliers avec des PME manufacturières, il a été possible pour les auteurs de regrouper les 65 exigences les plus pertinentes en 25 groupes distincts. La Figure 2.1 présente les groupes qu'utilisent les auteurs.

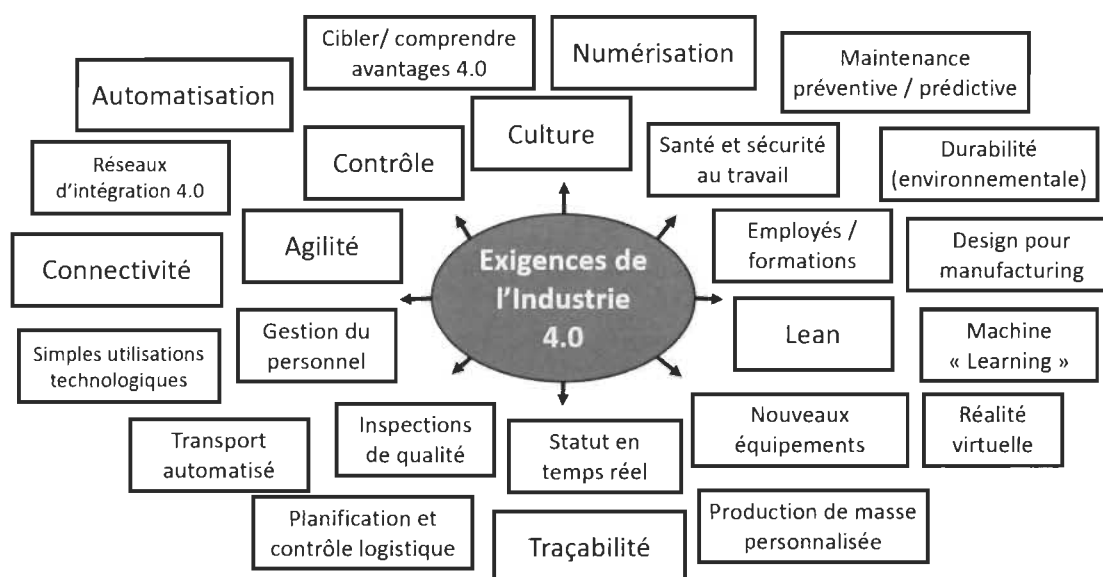


Figure 2.1 Les 25 groupes de préalables (traduit et adapté de Rauch et al., 2019)

Les auteurs font référence à plusieurs groupes qui ne concernent pas la technologie. Ces exigences, considérées comme des préalables, mettent en évidence que plusieurs actions doivent être accomplies par les entreprises voulant adhérer à l'Industrie 4.0, par exemple, réduire les temps de production à non-valeur ajoutée pour améliorer la

productivité grâce aux outils du *Lean*. Puis, les auteurs indiquent que pour les PME interrogées, quatre préalables ont plus d'importance pour la transformation numérique :

- un milieu manufacturier agile et axé sur la production de masse personnalisée;
- la collecte de données en temps réel, la numérisation et la connectivité;
- avoir des processus de fabrication de pointe (*Advanced Manufacturing*) en introduisant des technologies de précision et des processus automatisés;
- les technologies faciles d'utilisation (*Ease of use*) et à faible investissement.

Selon les résultats des ateliers réalisés par les auteurs, ces quatre axes représentent les piliers de l'Industrie 4.0. Une entreprise doit être réactive et adaptable pour améliorer au maximum ses compétences de personnalisation de masse. Pour y arriver, l'entreprise doit augmenter le niveau d'agilité de sa ligne de production en réduisant ses temps de mises-en-course, par exemple.

L'entreprise doit aussi être en mesure de collecter les données de sa production, notamment en implantant une mentalité de communication verticale avec l'aide d'un progiciel de gestion de type ERP. De plus, l'entreprise doit se procurer des machines numériques de haute précision. Toutefois, l'entreprise doit se concentrer sur les achats technologiques faciles d'utilisation et à faible coût. À la suite de l'identification des quatre préalables les plus importants, les PME consultées s'entendent pour ajouter un préalable à la liste d'exigences ciblées par les auteurs :

- la formation et l'apprentissage machine (*machine learning*) et l'analyse de données intelligentes (*smart data analytics*).

Ce préalable est considéré comme un pilier au fait que la majorité des PME n'est pas préparée pour ce virage technologique et numérique. Cet article fournit une liste exhaustive des actions à prendre en vue d'implanter le manufacturier intelligent. De plus, les barrières et limitations présentées par les auteurs permettent d'offrir des conseils face à l'implantation de l'Industrie 4.0. Les conseils présentent l'importance de l'engagement de la direction et la considération face au manque d'expérience et de qualification des ressources. De plus, les auteurs insistent sur la nécessité de mettre en place une stratégie d'implantation et un système de protection des données fiable afin d'assurer la sécurité des données de l'entreprise.

Les auteurs Von Haartman, Bengtsson et Niss (2016) présentent la conclusion d'une étude par rapport à la relation entre le *Lean* et les technologies numériques. Les principes du *Lean* ont longtemps été utilisés et le sont encore pour améliorer l'efficacité et la compétitivité des entreprises. Aujourd'hui, les solutions numériques sont de plus en plus utilisées en vue d'atteindre ces mêmes résultats. Von Haartman et al. (2016) se questionnent sur le futur de l'application des principes du *Lean* par rapport à l'introduction des outils numériques. L'étude réalisée permet de croire qu'il y a un parallèle à faire entre l'implantation de solutions numériques et l'application des principes du *Lean* dans les systèmes de production d'une entreprise. Les résultats de cette étude présentent ainsi que le *Lean* est un préalable à l'utilisation de technologies numériques en milieu manufacturier (Von Haartman et al., 2016). Cette conclusion a poussé les auteurs Tortorella et Fettermann (2018) à réfléchir davantage sur la relation entre l'implantation des pratiques du *Lean* en production et le *readiness* d'une entreprise envers l'Industrie 4.0 par rapport à la performance opérationnelle de celle-ci. Les résultats de l'étude présentent qu'une entreprise ayant déjà implanté les principes du *Lean* a plus tendance à intégrer l'Industrie 4.0 et que cette association a un impact positif sur la performance de celle-ci (Tortorella et Fettermann, 2018). Ces deux articles permettent d'établir que les principes du *Lean* sont des préalables à

l'Industrie 4.0 et ce, pour les entreprises de toutes les tailles. En appui à cette relation favorable, Rosin, Forget, Lamouri et Pellerin (2020) établissent que le *Lean* peut être considéré comme une fondation nécessaire à l'Industrie 4.0. D'après Rosin et al. (2020), l'Industrie 4.0 et le *Lean* sont deux concepts qui entre eux s'aident à atteindre une meilleure efficacité d'application.

Gamache et al. (2017) présentent des outils techniques exerçant une influence potentielle sur la performance globale d'une entreprise. Pour les auteurs, la performance de l'entreprise est définie par la combinaison du taux de disponibilité, du taux d'efficacité, du taux de qualité, du rendement au goulot de production et du rendement global de la ligne de production. Les auteurs utilisent la littérature pour cibler 15 variables indépendantes pouvant exercer une influence sur la performance globale de l'entreprise. Ces 15 variables peuvent être regroupées en catégories, telles que présenté dans le Tableau 2.5.

Tableau 2.5 Liste des variables indépendantes (traduit et adapté de Gamache et al., 2017)

Vulnérabilité de l'entreprise	Principes du Lean
Secteur d'activité	Système de valeur ajoutée (SMED et 5S)
La présence d'un client représentant plus de 60% des ventes	Système d'assurance qualité
L'entreprise possède plus de 60% de production dans le même secteur	Système d'amélioration continue
Gestion informatique	Type d'aménagement utilisé
Avoir un système ERP	Système de maintenance préventive
Utiliser un logiciel de dessin (CAD)	Système Kanban
Accès aux données	Standardisation des produits
Avoir accès aux temps standards de production	Avoir des familles de produits
Avoir accès aux données d'inventaire en temps réel	Utiliser des structures modulaires

L'étude réalisée souligne que plusieurs de ces variables indépendantes exercent une influence sur un des aspects de la performance de l'entreprise et donc une influence sur

la performance globale elle-même. À la suite d'une analyse détaillée, les auteurs expriment que plusieurs actions peuvent être accomplies afin d'améliorer la performance globale de l'entreprise et ce, avant l'introduction de technologies numériques. Il est aussi noté que les PME ne possèdent pas les connaissances et les ressources nécessaires pour passer à l'Industrie 4.0. Les PME doivent donc commencer par implanter les outils du *Lean*, tels que le 5S, le kanban, etc., et mettre en place un système d'amélioration continue avant de pouvoir débiter l'implantation des concepts et technologies de l'Industrie 4.0.

Moeuf et al. (2020) font l'identification des risques et des facteurs de succès reliés à l'Industrie 4.0. Ils ont consulté un groupe d'experts pour comptabiliser le niveau d'importance de chacun des facteurs. Les cinq facteurs les plus populaires pour les experts ($\geq 80\%$) sont les suivants :

- former ses employés pour pallier le manque de connaissances technologiques dans les PME;
- faire des études pour choisir les projets technologiques à implanter;
- avoir accès aux données de son entreprise;
- avoir un système d'amélioration continue;
- prévoir l'infrastructure nécessaire pour la gestion des données associées aux technologies de l'Industrie 4.0.

Les auteurs soulèvent aussi des facteurs humains importants lors de la transformation numérique, tels que :

- avoir une bonne communication à l'interne;
- impliquer la direction dans les échanges;

- offrir un support constant lors de l'implantation.

Ces différents facteurs peuvent se regrouper sous l'aspect d'implication. Les auteurs mentionnent que l'implication et l'engagement des humains dans le processus de transformation sont des aspects à ne pas négliger. Il est aussi non recommandé de commencer cette transformation sans avoir établi une stratégie d'affaires.

Les articles présentés précédemment partagent les résultats des recherches d'auteurs face aux préalables de l'Industrie 4.0. Dans la littérature, il est possible de séparer les auteurs en deux approches distinctes. Il y a les auteurs axés sur les technologies et les auteurs axés sur les pratiques d'affaires. Certains auteurs présentent des préalables axés sur l'intégration des technologies correspondant à l'Industrie 4.0 (Pacchini et al., 2019; Samaranayake et al., 2017; Singh et Bhanot, 2019). Tandis que les autres auteurs présentent davantage des actions à prendre avant même de penser à l'introduction de la technologie (Gamache et al., 2019; Gamache et al., 2017; Moeuf et al., 2020, Rauch et al., 2019; Tortorella et Fettermann, 2018; Von Haartman et al., 2016). Rauch et al. (2019) présentent une liste complète des préalables techniques à mettre en place sans toutefois négliger l'introduction d'aspects technologiques. Les auteurs Von Haartman et al. (2016) et Tortorella et Fettermann (2018) se concentrent sur l'importance de l'application des principes du *Lean* pour favoriser l'intégration du numérique. Gamache et al. (2017) utilisent les résultats provenant de cartographies de la chaîne de valeur pour cibler les variables ayant un impact positif sur la performance globale de l'entreprise. Les variables présentées sont considérées comme des actions à prendre afin d'améliorer la performance des entreprises et ainsi les rapprocher de l'intégration de l'Industrie 4.0. Moeuf et al. (2020) présentent une vision plus globale sur les grandes lignes des actions à prendre pour favoriser la transformation, que ce soit pour préparer l'entreprise et les employés à l'introduction de technologies ou simplement préparer l'ensemble des processus à ce virage.

En effectuant un survol plus large de la littérature scientifique, il est possible de trouver plusieurs autres auteurs qui partagent des points de vue similaires aux auteurs des articles présentés précédemment. Le préalable le plus souvent cité est celui de la connaissance et de l'expertise. Plusieurs auteurs s'entendent pour dire qu'avoir **l'expertise et les connaissances** reliées aux technologies est un des facteurs les plus importants à considérer pour entamer une transformation numérique (Dassisti et al., 2019; De Carolis, Macchi, Negris et Terzi (2017); Indrawan et al., 2019; Machado et al., 2019; Türkes et al., 2019). L'expertise est présentée sous deux angles différents dans la littérature, soit l'augmentation des connaissances de ressources à l'interne ou l'introduction d'experts externes dans l'entreprise pour préparer et accompagner la transformation (Moeuf et al., 2020).

De plus, d'autres auteurs indiquent que le **Lean et les processus d'amélioration continue** sont des préalables à l'ère numérique (Ghobakhloo et Fathi, 2019; Mayr, Weigelt, Kühl, Grimm, Erll, Potzel et Franke (2018); Moeuf et al., 2018). Les principes du *Lean* ont fait leurs preuves dans le passé mais sont encore considérés comme des indispensables pour plusieurs auteurs (Von Haartman et al., 2016).

Un autre point commun émis par les auteurs est l'importance d'avoir **accès aux données** de l'entreprise (Dassisti et al., 2019; De Carolis et al., 2017; Mittal, Khan, Purohit, Menon, Romero et Wuest (2019); Türkes et al., 2019) et ce, dans un objectif de les avoir en temps réel. Ce préalable prend tout son sens lorsqu'il est question des technologies associées à l'Industrie 4.0. L'Industrie 4.0 permet l'interconnectivité des systèmes : cette réalité occasionne ainsi une grande génération de données. Il est donc primordial que les entreprises soient en mesure d'avoir accès à leurs données et d'avoir les capacités pour faire l'analyse et la gestion des données (Mittal et al., 2019).

L'**agilité de production** est aussi un point fréquemment identifié dans la littérature. L'agilité correspond à la capacité de modifier rapidement tout aspect de l'entreprise manufacturière en réponse à l'évolution des demandes du marché (Duguay, Landry, & Pasin, 1997). L'agilité est un concept souvent associé à la flexibilité, la vitesse, la réactivité, les coûts et les compétences (Duguay et al., 1997). L'agilité est toutefois apportée par les auteurs sous différentes actions, par exemple la production par modules standards (Gamache et al., 2017) ou avoir une ligne de production en cellules flexibles et compactes (Rauch et al., 2019). Sachant que l'Industrie 4.0 permet d'augmenter l'agilité des entreprises, les auteurs mentionnent qu'il est important de déjà avoir mis en place des processus agiles préalablement aux technologies (De Carolis et al., 2017; Moeuf et al., 2018).

Pour ce qui a trait à la relation avec la technologie, les auteurs s'accordent pour dire qu'il faut que l'entreprise soit en mesure de libérer de la **capacité financière** (Ghobakhloo (2019); Ghobakhloo et Fathi, 2019; Hess, Matt, Benlian et Wiesböck (2016); Machado et al., 2019) et qu'il faut penser à l'aspect de **cybersécurité** des données dès le début des démarches (Indrawan et al., 2019; Machado et al., 2019; Prause (2019); Türkes et al., 2019).

2.4.3 Facteurs d'adoption de l'Industrie 4.0

En comparaison aux articles précédents, l'article de Vrchota, Volek et Novotna (2019) et celui de Ghobakhloo et Ching (2019) se concentrent sur l'étude des facteurs exerçant une influence sur l'introduction du numérique dans les PME. Ce point de vue permet de comprendre quel environnement et quels aspects exercent une influence sur l'intérêt des PME pour la transformation vers l'Industrie 4.0. Le premier article présente six volets, soit la planification des finances, les machines, les employés, les processus de management, les facteurs externes et les connaissances (Vrchota et al., 2019). Chacun

de ces volets possède une liste de facteurs pouvant exercer une influence sur l'introduction d'une entreprise à l'Industrie 4.0. Le deuxième article présente neuf hypothèses pouvant possiblement exercer une influence sur l'adoption du manufacturier intelligent. Les hypothèses des auteurs sont les suivantes : la perception de la valeur des outils numériques, les coûts associés, la compatibilité des outils dans l'entreprise, l'accessibilité à l'information, les connaissances d'experts, les plans stratégiques, l'environnement, la pression des concurrents et la taille de l'entreprise (Ghobakhloo et Ching, 2019). Les deux articles concluent que les stratégies d'affaires face à l'implantation sont l'élément avec la plus grande influence par rapport à l'introduction du numérique dans les entreprises. Il est aussi présenté que les coûts, les connaissances et la valeur du processus sont des facteurs d'influence. Il est aussi possible de voir une ressemblance par rapport à la conclusion que les PME sont moins prêtes que les grandes entreprises pour ce virage numérique, mais qu'une telle transformation offre aux PME un grand potentiel pour l'amélioration de leur agilité et de leur productivité pour ainsi rester compétitives sur le marché.

L'importance d'une **stratégie d'affaires** est l'un des préalables où les auteurs s'entendent le mieux, que ce soit a priori ou en parallèle à la transformation numérique (Anggrahini et al., 2018; Indrawan et al., 2019; Schumacher et al., 2016). Chez les PME, il s'agit d'un aspect trop souvent négligé (CEE-UQAC, 2018), mais les auteurs indiquent à plusieurs reprises qu'en vue de la transformation numérique, il est essentiel de mettre en place une stratégie d'affaires avec des objectifs et des échéanciers clairs (De Carolis et al., 2017). Pour d'autres, il s'agit d'aligner la vision de l'entreprise en vue des objectifs recherchés pour cette implantation (Mittal et al., 2019), tout en mettant l'accent sur le niveau de sensibilisation des dirigeants pour ce projet. Ce point, davantage orienté sur l'aspect organisationnel, revient fréquemment dans la littérature, que ce soit dans un aspect de facteur de succès à l'adoption ou dans les articles plus orientés plan d'action.

2.5 Matrice de la revue de littérature

À la suite de la revue de littérature, il a été possible de synthétiser les éléments principaux des articles les plus pertinents sous la forme d'une matrice. Un code de couleur a été utilisé pour faire ressortir les méthodologies utilisées dans les articles, les ressemblances de variables dépendantes, des variables indépendantes ainsi que les conclusions. La colonne des conclusions présente les faits marquants ressortis dans les articles et qui permettent de poser des recommandations pour ce mémoire. En fonction des variables dépendantes les plus fréquentes, il sera possible de déterminer et de détailler le cadre conceptuel présenté au Chapitre 3.

Le Tableau 2.6 présente la logique de la légende des couleurs utilisées dans le Tableau 2.7. L'objectif principal de cette légende est de faire ressortir les ressemblances entre les références trouvées dans la matrice de la revue de littérature.

Tableau 2.6 Légende de couleur de la matrice

Variable dépendante		Variables indépendantes		Conclusion	
	Readiness	R	Lean / amélioration continue	R	Lean
	Adoption 4.0	B	Accès aux données	B	Potentiel PME
	Maturité	V	connaissance/ expertise	V	Connaissances
		M	Stratégie d'affaires	M	Stratégie d'affaires
		O	Agilité		
		P	Cyber Sécurité		
		C	Capacité financière (coûts)		

Tableau 2.7 Matrice de la revue de littérature

Auteurs/Titres/Journal/Année	Objectif	Méthodologie	Variables dépendantes	Variables indépendantes	Conclusion
-Luz Tortorella, G. et Fettermann, D. - Implementation of Industry 4.0 and lean production in Brazilian manufacturing companies - International Journal of Production Research - 2017	Examiner la relation/synergie entre l'implantation simultanée de l'industrie 4.0 et le Lean production	- Questionnaire - Test d'hypothèses - Test de variance	Performance organisationnelle	- Démographie de l'entreprise - Degré d'adoption 4.0 - Niveau d'adoption Lean Facteurs de performance - Productivité - Niveau de service livraison - Niveau d'inventaire - SST - Qualité	- Faible niveau de 4.0 et de Lean = faible niveau de performance - Association positive du Lean et 4.0 - Entreprise avec Lean = plus de chance d'implanter 4.0
-Pacchini, A.P.T., Lucato, W.C., Facchini, F. et Mummolo, G. - The degree of readiness for the implementation of Industry 4.0 - Elsevier - 2019	Créer un modèle pour mesurer le niveau de readiness des entreprises manufacturières	- Revue de littérature - Étude de cas	Degré de readiness au numérique	6 préalables/ technologies Big Data: - infrastructure - accès aux données - système de communication - employés qualifiés - Stratégie d'affaires - connaître les problèmes rencontrés	- Modèle de readiness permettant aux entreprises de connaître leur niveau de préparation au numérique - Permet d'orienter les entreprises face aux actions à prendre
-Rauch, E., Dallasega, P. et Unterhofer, M. - Requirements and barriers for introducing smart manufacturing in SMEs - IEEE - 2019	Présenter les exigences, barrières et les limites de l'implantation de l'industrie 4.0 dans les PME	- Ateliers	Readiness au numérique	(27 groupes) - Industrie manufacturière agile (small, flexible, personalized) - Collecte de données en temps réel - introduction technologie / automatisation - implanter les technologies faciles et à faibles coûts - Augmenter les connaissances	- Implantation du 4.0 offre un grand potentiel aux PME - Important de considérer les préalables (var. ind.) - Garder en tête les barrières (ex: sécurité des données)
-Gamache, S., Abdul-nour, G. et Baril, C. - Toward Industry 4.0 : Studies and practices in Quebec SMEs - CIE47 Proceedings - 2017	Établir un plan de match pour assurer le succès des PME québécoise face à l'implantation du 4.0	- Cartographie - Test de variance - Test d'hypothèses	Performance globale de l'entreprise : - efficacité - qualité - eff. Equip. Goulot - eff. Equip. Globale - disponibilité	- secteur d'activité - connaissance préalable - Présence client - Activité dans le même secteur - ERP - Kanban - Temps standards disponibles - Amélioration continue - Maintenance préventive - Production à valeur ajoutée - type d'aménagement - Charges initiales - Logiciel CAD	- qualité améliorée : design modulaire, amélioration continue, aménagement. - Eff. Equip.globale: SMED, 5S, Kanban, design modulaire, Cad, Valeur ajoutée, amélioration continue, Kaizen, ERP - implanter du Lean (1e étape) - les PME ont une grande lacune de ressources et de connaissances - les PME doivent passer par la 3e révolution
- von Haartman, Bengtsson, S. Nuss - Lean practices as requisites for the use of digital technology in production - EurOMA - 2016	Explorer la relation entre le Lean et les technologies numériques	- Questionnaires	Introduction du numérique	- principes du Lean	- Le Lean est un bon prédicteur de l'introduction du numérique - Le Lean est un préalable du numérique

Tableau 2.7 Matrice de la revue de littérature (suite)

Auteurs/Titres/Journal/Année	Objectif	Méthodologie	Variables dépendantes	Variables indépendantes	Conclusion
- Vrchota, J., Volek, T et Novotna - Factors introducing Industry 4.0 to SMEs - Social sciences - 2019	Identifier les facteurs ayant une influence à l'introduction de l'industrie 4.0	- Questionnaires - Test d'hypothèses - Étude de cas	Introduction de l'industrie 4.0	- la planification des finances - les employés - Technologies/ machines - Processus management (risques) - les facteurs externes - les connaissances	- Avoir un plan stratégique favorise l'introduction au 4.0 - facteurs d'importance : employés, les finances (retour investissement) - 4.0 « un grand potentiel pour les PME » - Les GE sont mieux outillées pour implanter le 4.0
- Ghobakhloo, M. et Tan Ching, N. - Adoption of digital technologies of smart manufacturing in SMEs - Elsevier - 2019	Identifier les facteurs ayant une influence sur l'adoption du Smart manufacturing dans les PME	- Questionnaires - Test de variance - Test d'hypothèses - Étude de corrélation	Adoption du Smart manufacturing	Perception... - la valeur ajoutée - les coûts - la compatibilité - l'accès à l'information/données - les connaissances (expert) - Plan stratégique (cartographie) - l'environnement - Pression des compétiteurs - la taille de l'entreprise	- le facteur le plus important est d'avoir un plan stratégique - les coûts ont un effet négatif - facteurs d'influence: la valeur ajoutée, la compatibilité, les connaissances, l'accès à l'information - le smart manufacturing permet au PME d'acquies une meilleure agilité = préparation pour le 4.0
- Schumacher A., Erol, S. et Sih, W. - A maturity model for assessing Industry 4.0 readiness and maturity of manufacturing enterprises - ScienceDirect (Article) - 2016	Créer un modèle pour mesurer le niveau de maturité des entreprises face à leur transition vers le 4.0	- Questionnaires - Étude de cas	Niveau de maturité	- Stratégie - Leadership - Clients - Produits - Opération - Culture - Employés - Gouvernance - Technologies	- connaître le niveau de maturité - cibler les lacunes et les actions à prendre face à l'implantation du 4.0
- Moeruf, A., Pellerin, R., Lamouri, S., Tamayo-Giraldo, S. et Bardaraj, R. - The Industrial management of SMEs in the era of industry 4.0 - International journal of production research - 2016	Étudier les situations des PME pour cibler les lacunes face à l'implantation du 4.0	Revue de littérature	Performance	Flexibilité: - faibles coûts - Productivité - amélioration de la qualité - réduction "lead time" Surveillance: - Contrôle - Optimisation - Autonomie Moyens de réalisation: - Big data - Simulation - Internet des objets - Systèmes Cyber-physique Infonuagique : - réalité virtuelle - Robot collaboratif - Machine à machine	- l'implantation du 4.0 doit être fait avec une approche simultanée du Lean - Les PME ont une faiblesse au niveau des expertises (connaissances) des processus. - Les PME doivent se concentrer sur la surveillance et la collecte de données

Tableau 2.7 Matrice de la revue de littérature (suite)

Auteurs/Titres/Journal/Année	Objectif	Méthodologie	Variables dépendantes	Variables indépendantes	Conclusion
Gamache, S. et Abdul-Nour, G. - Stratégie d'implantation de l'industrie 4.0 dans la PME manufacturière québécoise 2019	- Évaluer les facteurs d'influence du 4.0 les plus significatifs (identifier les moyens de passage au 4.0) Développer une stratégie efficiente de passage à l'industrie 4.0 dans les PMEM québécoises (démarche d'exécution pour la transformation au numérique)	Questionnaire Test statistique	Niveau de performance numérique	- Culture et organisation (Lean , Agilité , Compétences) - Expériences clients (Personnalisation) - Technologies (Cyber sécurité) - Leadership (Stratégie, Engagement) - Gestion des données - Système de mesures	Les PME ne savent pas par où commencer leur transformation, elles ne sont pas prêtes Pour savoir par où commencer, les PME doivent introduire une Vision et une Stratégie
Harris, G., Yarbrough, A., Abernathy, D. et Peters, C. - Manufacturing readiness of the digital manufacturing 2019	- Identifier les lacunes des entreprises manufacturières par rapport à l'implantation du numérique - Cibler pourquoi les SMIMs sont encore dans les premières phases d'implantation du digital (quels sont les problèmes?)	Entrevues	Digital manufacturing		- Les PMEM ont un faible niveau de readiness pour l'implantation du digital - La plus grande barrière est les mauvaises perceptions et la mauvaise compréhension de cette transition - "digital manufacturing" devrait être mieux défini par le gouvernement USA pour aider la compréhension - Les PMEM savent qu'elles doivent faire le virage digital mais ne savent pas par où commencer
- Prause, M. - Challenges of Industry 4.0 technology adoption for SMEs : the case of Japan - Sustainability - 2019		Tests d'hypothèses	le niveau d'adoption de l'industrie 4.0		L'adoption des technologies du 4.0 est principalement influencée par des facteurs externes: - Les avantages perçus - L'incertitude du marché - Le support de la haute direction PRÉALABLES: La confidentialité et la sécurité d'information doit être un concept mis en place avant l'adoption des technologies 4.0
- Gonçalves Machado, C., Winroth, M., Carlsson, D., Almqvist, P., Centerholt, V. et Hallin, M. - Industry 4.0 readiness in manufacturing companies: challenges and enablers toward increased digitalization - ScienceDirect - 2019	Identifier les défis, les facilitateurs et les bonnes pratiques dans le processus de changement vers la numérisation. Comprendre et évaluer le niveau de préparation au digital.	- Questionnaire en ligne (self-check) - Workshop avec l'entreprise - Étude de cas (entrevue)	Niveau de préparation au numérique	Dimensions étudiées: - Stratégie - Industrie intelligente (smart factory) - Opérations intelligentes (smart operations) - Data-diver - Employés	L'étude de cas a permis de conclure que le processus de numérisation est un long processus. Ce processus est plus difficile pour les petites entreprises. La connaissance sur le sujet est une grande lacune, il est important d'investir dans la formation et dans l'ajout de compétences.
- Morteza Ghobakhloo - Determinants of Information and digital technology Implementation for smart manufacturing - International Journal of Production Research - 2019	Identifier les facteurs qui déterminent l'implantation des informations et des technologies numériques du Smart Manufacturing	- Revue de littérature - Ateliers avec des experts	Adoption du Smart manufacturing	- Perception des bénéfices - Disponibilité de capacité financière - Implication de la direction - Gestion et collecte des données - Maturité numérique - Ouverture d'esprit aux changements - Qualification des employés - Ecosystème informatique - Culture de responsabilité - Stratégie d'affaires - Cyber sécurité	Les deux facteurs les plus importants : - Perception des bénéfices - Implication de la direction Grande relation entre la maturité technologique et la sécurité des données

Tableau 2.7 Matrice de la revue de littérature (suite)

Auteurs/Titres/Journal/Année	Objectif	Méthodologie	Variables dépendantes	Variables indépendantes	Conclusion
- P. samaranayake, K. Ramanathan et la. - Implementing Industry 4.0 - A technological readiness perspective	Déterminer les poids relatifs à l'importance des facteurs facilitants à l'implantation du 4.0	Revue de littérature	Readiness au numérique	D1 : Développer et améliorer les systèmes/interfaces internet D2 : Connaissances des employés envers la technologie et son fonctionnement D3 : Améliorer les capacités des machines/équipements à se connecter à l'internet D4 : Capacité à gérer des données (Big Data) D5 : Faire le partage des données entre les parties prenantes. D6 : Développer un système de sécurité des données.	Les facteurs les plus importants sont : - Connaissances / compétences technologique - Gestion des données Pour réussir leur transformation les entreprises doivent se concentrer à améliorer ses deux facteurs
- Rajdeep Singh et Neeraj Bhanot. - An integrated DEMATEL-MMDE-ISM based approach for analysing the barriers of IoT implementation in the manufacturing industry 2019	Analyser les barrières durant l'implantation de l'Internet des Objets dans le milieu manufacturier Classer les barrières les plus importants pour être en mesure de prendre une décision informée	Revue de littérature	Readiness au numérique	Cybersécurité, Standardisation des équipements. Collecte de données + infrastructure Gestion des problèmes d'équipements L'efficacité des équipements lacunes des Software utilisés l'importance du talent et l'expertise Gestion des données Flexibilité des équipements Manque de capacité financière	Facteurs les plus importants : - lien étroit entre les investissements et l'expertise / formation - Cybersécurité
Anna De Carolis, Marco Macchi, Elisa Negri et Sergio Terzi - Guiding manufacturing companies towards digitalization	Faire un guide pour orienter la transformation digital, en fonction de l'identification des forces et faiblesses des entreprises	- Questionnaire - Étude de cas	Niveau de readiness au numérique	- Cycle de vie du produit - Système de maintenance - Retirer les informations en temps réel - Faire de l'analyse de données - Niveau de réactivité du système de production - Utiliser un système pour supporter les prises de décisions - Introduire une collaboration avec les fournisseurs.	1) développer une vision et échéancier clair 2) Prioriser les projets de transformation en fonction des profits et des simplicité d'implantation : Stratégie Les compagnies sont plus intéressées à connaître leurs faiblesses et leurs forces pour être en mesure de cibler des opportunités de savoir leur niveau de maturité
Alexandra Moeuf et al. - Identification of critical success factors, risks and opportunities of Industry 4.0 in SMEs 2019	Identifier les risques, les facteurs de succès et les opportunités des PME par rapport à l'industrie 4.0	Ateliers avec des experts	Readiness au numérique	- Stratégie d'affaires à court terme - Implication de la direction - Expertise - Importance des données - infrastructure technologique pour le flux d'information - Formation nécessaire - compétences - Amélioration continue	Problèmes majeurs de PME: 1) Manque d'expertise 2) Manque de structure - Stratégie d'affaires Les facteurs de succès: - Accès aux données - Offrir des formations - être impliqué

Tableau 2.7 Matrice de la revue de littérature (suite)

Auteurs/Titres/Journal/Année	Objectif	Méthodologie	Variables dépendantes	Variables indépendantes	Conclusion
Sameer Mittal, Muztoba Ahmad Khan, Jayant Kishor, Karan Menon, David Romero et Thorsten Wuest A smart manufacturing adoption framework for SMEs - International Journal of Production Research - 2019	Développer un "framework" pour aider les PME à accomplir leur transformation vers le smart manufacturing	Étude de cas	Adoption du Smart manufacturing	1) Identifier les données générées dans une PME 2) Cibler les outils de readiness 3) Développer une conscience / compréhension du numérique 4) Développer une vision numérique 5) Identifier les outils et pratiques à réaliser	Les PME sont en retard dans leur transformation contrairement aux grandes entreprises La vision et le plan de match sont important pour les PME Développer l'accès aux données et son traitement est essentiel
Mirela Catalina Turkey, Ionica Onciul, Hassan Danial Aslam, Andreea Marin-Pantelescu, Dan Ioan Topor et Sorinel Capusneanu Drivers and barriers in Using Industry 4.0: A perspective of SMEs in Romania - Processes - 2019	Répondre au manque d'informations face au processus de décisions par rapport à l'implantation de technologique dans les PME Identifier les facteurs et les barrières à l'implantation de l'industrie 4.0	Questionnaires Analyses statistiques	Niveau de préparation au numérique	- Compétences des employés vers les "usines du futur" - Manque de culture/ Vision - Manque de législation relié aux technologies CYBERSECURITE - Importance des données	85% des PME en Roumanie ont entendu parler de l'industrie 4.0 Les principales barrières : - Manque de connaissances/ compréhension 4.0 - Manque de Standard - Concentrer sur les opérations VS développement de l'entreprise - Manque de compréhension Stratégique - Manque de ressources à l'interne - Importance de l'éducation/ formation des employés
Harry Indrawan, Anon Simaremare et Siti Atsyah Readiness Index for Indonesian Power Plant toward Industry 4.0 - IEEE Xplore - 2019	Identifier les piliers pour mesurer les niveau de readiness d'une entreprise	Questionnaires	Niveau de readiness au numérique	5 Piliers = 15 facteurs - Culture et employés : Développement de compétences - Connectivité : Cybersecurité - Numérisation - Technologies - Direction et organisation : Stratégie d'affaires	
Morteza Ghobakhloo et Masood Fathi Corporate survival in Industry 4.0 era : The enabling role of lean-digitized manufacturing - Journal of manufacturing technology management - 2019	Démontrer aux PME que développer un approche Lean-numérique offre un niveau de compétition dans l'ère de l'industrie 4.0	Étude de cas	Adoption du numérique	- Capacité financière - Infrastructure - Implication et ouverture aux changements - Besoin important de connaissances/compétences/expertises - Capacité de gestion de données	Les problèmes principaux durant la transformation ne sont pas reliés aux technologies, mais aux problème à l'intérieur de l'organisation. Le Lean Numérique est un facteur de succès pour la performance manufacturière durant la transformation numérique.
Gonçalves Machado, C., Wieroth, M., Carlsson, D., Almqvist, P., Centerholt, V. et Hallin, M. Industry 4.0 readiness in manufacturing companies: challenges and enablers toward increased digitalization - ScienceDirect - 2019	Identifier les défis, facilitateurs et les bonnes pratiques dans le processus d'introduction au numérique	- Questionnaires - Ateliers - Étude de cas (entrevue)	Niveau de readiness au numérique	- Stratégie - Industrie intelligente - Opérations intelligentes - Accès aux données - Employés	- processus de numérisation plus difficile pour les PME - Améliorer les connaissances et les formations sur le sujet

2.6 Discussions

2.6.1 Frontière entre maturité et *readiness*

En relation avec les distinctions offertes dans la littérature, il est possible d'établir pour ce mémoire une distinction claire entre les termes maturité et *readiness*. Cette distinction permet de définir la limite de la recherche. Cette limite provient de la frontière entre la phase de préparation et la phase d'implantation. Cette frontière consiste au point zéro où une PME pourrait démarrer sa transformation numérique. Il y a actuellement une zone grise par rapport à ce que devraient être les préalables à l'Industrie 4.0 et sur ce qu'est le point zéro où les entreprises ont les outils en main pour entamer leur transformation. Dans cette recherche, il est important d'être en mesure de savoir quand une entreprise est prête ou à partir de quand elle peut dire qu'elle démarre sa transformation numérique. La Figure 2.2 présente la différence utilisée dans ce mémoire pour distinguer le *readiness* et la maturité.

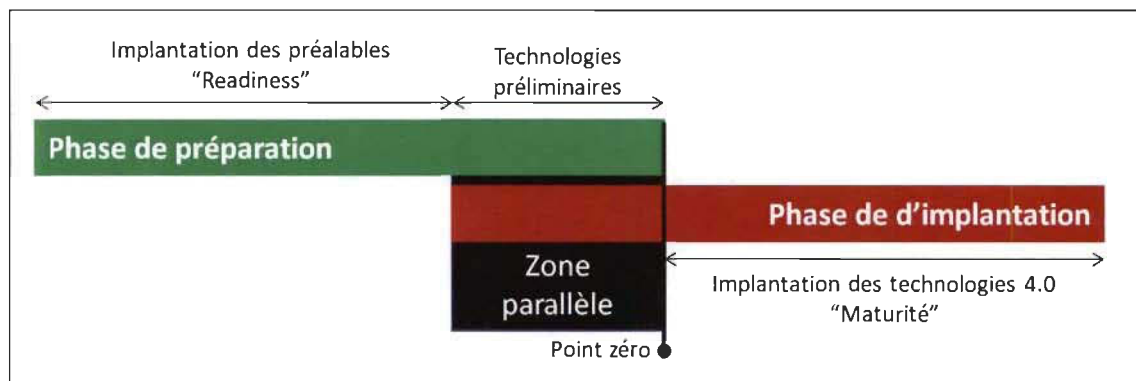


Figure 2.2 Échelle entre *readiness* et maturité

Dans le contexte de la recherche, le niveau de *readiness* est atteint lorsque l'entreprise possède tous les préalables nécessaires à la transformation vers le numérique. Tel qu'exposé dans la Figure 2.2, la phase de préparation et la phase de l'implantation

peuvent s'entrecroiser à un certain point. Cette zone parallèle provient de l'arrivée de certaines technologies qui peuvent être considérées comme préalables ou encore comme les premières implantations technologiques reliées à l'Industrie 4.0. Toutefois, pour cette recherche, il est uniquement question de la zone verte de l'échelle, tous les préalables étudiés dans ce mémoire ne correspondent pas à un avancement de maturité de la PME dans sa transformation numérique.

2.6.2 Interprétation des préalables de la littérature

La revue de littérature a permis d'identifier les préalables à l'Industrie 4.0. Malgré les différences de points de vue des auteurs, il est tout de même possible d'identifier une convergence. Les PME voulant commencer leur transformation vers l'Industrie 4.0 devraient se concentrer au début sur les préalables offrant un plus grand ratio bénéfices/efforts tels que certains outils du *Lean*. Les principes du *Lean* offrent aux entreprises un éventail d'outils permettant d'acquérir une opportunité d'amélioration au niveau de la productivité de l'entreprise (Rosin et al., 2020). Ainsi, les projets dans les entreprises, qu'ils soient numériques ou non, doivent passer par une démarche d'amélioration continue qui est elle-même liée à la stratégie d'affaires de l'entreprise. Il est possible de dire qu'une culture d'amélioration continue devrait être une des premières étapes à être instaurées dans une entreprise. Par la suite, les entreprises peuvent aussi introduire des méthodes classiques pour augmenter leur agilité de production. De plus, la mise en place du *Lean* et de l'agilité entraîne une structure supplémentaire dans les entreprises. Cette structure est utile pour orienter la préparation à l'Industrie 4.0 (Charbonneau Genest & Gamache, 2020).

En parallèle, il semble important que la direction soit impliquée de près dans ce processus de transformation. Tel que mentionné par la majorité des auteurs, l'entreprise doit mettre en place une stratégie d'affaires pour orienter les décisions face

à tous ces changements. De plus, cette implication de la direction permettra d'influencer la culture de l'entreprise face à la transformation future et ainsi réduire la résistance au changement (Gaumond, 1999). La littérature indique aussi que le facteur de la main-d'œuvre est un aspect important dans l'intégration de l'Industrie 4.0. Le niveau de connaissance et de compréhension des employés à la technologie est un préalable à ne pas négliger. Un programme de formation approprié pourrait ainsi être introduit dans les entreprises afin de répondre à cette problématique en plus d'apporter des bienfaits sur la productivité (Uxpertise, 2020). Ce programme de formation pourrait même soutenir les actions préliminaires telles que l'introduction d'une culture d'amélioration continue.

À la suite des gains obtenus par les outils demandant peu d'investissements, il est important pour les organisations de réfléchir aux premières technologies devant être intégrées. À la suite de ces décisions, l'entreprise pourra se concentrer sur l'implantation des préalables spécifiques aux technologies ciblées tels que présenté par Pacchini (2019) afin d'assurer le succès de l'introduction de ces technologies. Tous les aspects technologiques n'étant pas prioritaires à l'atteinte du *readiness* ne sont toutefois pas à négliger. Dans cette optique, les préalables ciblés dans la littérature doivent être liés aux données de l'entreprise. Une entreprise doit premièrement mettre en place des processus pour avoir accès à ses données. L'introduction de l'accessibilité aux données est à ne pas négliger, parce que l'Industrie 4.0 est basée sur le traitement et le partage des données en temps réel (Kohler et Weisz, 2016). L'entreprise doit donc déjà être en mesure d'avoir accès à une certaine quantité de données et avoir les compétences pour les interpréter. Deuxièmement, l'entreprise doit acquérir la capacité et la sécurité nécessaires pour faire la gestion et le stockage de toutes ses données informatiques présentes et futures (Castelo-Branco et al., 2019).

À partir des articles cités dans cette revue de littérature, il est possible de faire une analyse des ressemblances dans les préalables et cibler les plus critiques à l'implantation de l'Industrie 4.0. Le Tableau 2.8 présente un résumé des termes soulevés par les différents auteurs ainsi qu'un décompte de popularité des préalables cités dans la littérature.

Tableau 2.8 Tableau de comparaison des termes cités par article

Articles	Stratégie d'affaires	Capacité financière	Connaissances et expertise	Lean (Amélioration continue)	Agilité	Accès de données	Données en temps réel	Cybersécurité	Infrastructure informatique
Anggrahini et al. (2018)	X								
Dassisti et al. (2019)			X		X				
De Carolis, Macchi, Negri et Terzi (2017)	X		X	X	X	X			
Gamache, Abdounour et Baril (2017)			X	X	X				
Gamache et Abdounour (2019)	X			X	X		X		
Ghobakhloo (2019)	X	X	X		X	X	X		X
Ghobakhloo et Fathi (2019)		X	X	X	X				X
Ghobakhloo et Ching (2019)	X	X	X		X				
Harris et al. (2019)			X						
Hess et al. (2016)	X	X							
Indrawan et al. (2019)	X		X		X		X		
Machado et al. (2019)	X	X	X		X		X		X
Mittal et al. (2019)	X		X		X				
Moeuf et al. (2018)		X	X	X					
Moeuf et al. (2020)	X		X	X	X				X
Pacchini et al. (2019)		X	X		X	X	X		X
Rauch, Dallasega et Unterhofer (2019)	X	X	X	X		X	X		
Samaranayake, Ramanathan et Laosirihongthong (2017)			X		X	X	X		X
Schumacher, Erol, et Sihm (2016)	X								
Singh et Bhanot (2019)		X	X		X		X		X
Tortorella et Fettermann (2018)	X			X					
Türkes et al. (2019)			X		X	X	X		
Von Haartman, Bengtsson et Niss (2016)				X					
Vrchota et Novotna (2019)	X	X	X						
Nombre d'articles où le terme est cité	14	10	18	9	5	15	6	9	7
Pourcentage d'articles où le terme est cité	58,3%	41,7%	75,0%	37,5%	20,8%	62,5%	25,0%	37,5%	29,2%

Les deux dernières lignes du tableau ci-dessus permettent de constater que certains préalables sont plus souvent associés à l'Industrie 4.0 dans la littérature. L'aspect le plus fréquemment mentionné par les auteurs est le manque de connaissances et d'expertise des ressources envers les technologies, celui-ci représente 75 % des mentions. Sachant que l'Industrie 4.0 comprend l'intégration de nombreuses technologies, il est possible d'identifier cet aspect comme un problème majeur. Il est juste d'en comprendre que le manque de qualification des employés est un facteur nuisible à la transformation des PME vers l'Industrie 4.0 et qu'une adaptation au niveau des formations pourrait être envisagé. Du point de vue de la direction, il est mentionné que dans 58,3 % des cas, une entreprise avec une stratégie d'affaires préétablie en vue de la transformation vers l'Industrie 4.0 est plus susceptible d'accomplir cette transformation avec succès. Pour 41,7 % des articles ciblés, la capacité financière d'une entreprise est une limite vers la transformation. Pour ce qui est des préalables de type actions à prendre, 62,5 % mentionnent l'importance de l'accessibilité aux données de l'entreprise, 37,5 % des auteurs s'entendent pour dire que le *Lean* est un préalable essentiel pour l'Industrie 4.0, 25 % s'entendent sur la nécessité d'avoir accès aux données en temps réel grâce à des capteurs et 20,8 % indique l'importance d'avoir en place une agilité élevée en production et dans une vision plus technologique, les auteurs s'entendent à 37,5 % pour dire qu'il est essentiel d'avoir un système de protection de données avant l'arrivée de technologies. Il est très pertinent de connaître ces proportions pour bien cibler la pertinence relative de tous les préalables selon les différents auteurs. De plus, ces pourcentages permettent d'établir les dominances des termes étudiés et ainsi orienter les préalables à considérer pour cette étude.

En résumé, cette revue de littérature a permis de définir les termes utilisés dans ce mémoire de recherche, d'établir la frontière entre les termes maturité et *readiness* et d'identifier les préalables de l'Industrie 4.0 (objectifs #1 et #2). Les différents préalables ciblés peuvent être regroupés sous trois axes. Il y a l'axe technique avec l'implantation

des pratiques d'affaires et d'outils appliqués tels que les kanbans et les structures modulaires. Il y a l'axe humain, organisationnel et stratégique, pour être en mesure d'assurer la cohérence entre les employés et les nouvelles technologies. Il y a aussi l'axe technologique à intégrer et ne pas négliger lorsque le *readiness* approche sa cible. Il n'est pas question de prouver qu'aucune technologie ne devrait être intégrée avant d'atteindre le point zéro de la transformation de l'Industrie 4.0 déterminée par le terme *readiness*. Par exemple, il est déjà question auprès de certains auteurs qu'un des préalables est l'intégration d'un système ERP (Gamache et al., 2017). Cet aspect technologique prend du sens en se référant à la Figure 2.2, où l'établissement de la phase préparatoire à une zone parallèle avec l'implantation de technologie. Pour assurer le succès de la transformation, il est important de connaître où l'entreprise se situe initialement et comment elle désire se démarquer pour être en mesure d'orienter les choix vers l'atteinte de la transformation vers l'Industrie 4.0 (Pacchini et al., 2019).

Dans l'ensemble, la littérature cible neuf groupes de préalables les plus populaires, ceux-ci sont identifiés dans le Tableau 2.8 (objectif #3). Il est possible d'associer ces neuf groupes aux trois différents axes. La Figure 2.3 présente ses regroupements.

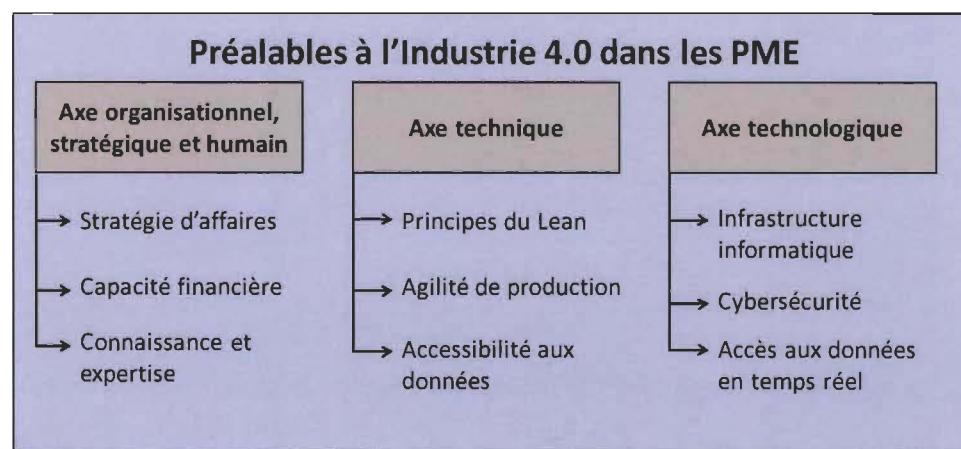


Figure 2.3 Résumé des préalables cités dans la littérature

Les problématiques soulevées dans la littérature ciblent principalement les préalables des axes humains et techniques. Les PME doivent mettre à jour leur structure et processus afin de se préparer à leur virage numérique. Toutefois, dans une optique de planification à long terme, il ne faut pas négliger l'aspect financier en vue de la transformation numérique. L'implantation de technologies de haut niveau demande une réflexion financière a priori pour s'assurer de répondre aux besoins de capacité de réseaux, d'infrastructure information et de gestion de la cybersécurité.

CHAPITRE 3 - MÉTHODOLOGIE DE LA RECHERCHE

La méthodologie de ce mémoire correspond à la combinaison d'un modèle de simulation et d'un plan d'expériences pour tester l'effet des préalables ciblés dans la littérature sur la performance d'une entreprise. Ce chapitre permet d'établir les hypothèses de recherche et de développer sur la méthodologie utilisée afin d'obtenir les résultats recherchés grâce à la simulation.

3.1 Hypothèses de recherche

Les neuf groupes de préalables ciblés dans la revue de la littérature peuvent être associés à sept catégories distinctes, soit l'accessibilité aux données, qui regroupe l'accès des données en temps réel et l'infrastructure informatique de collecte, le niveau de connaissance, les principes du *Lean*, l'agilité de production, les stratégies d'affaires, la cybersécurité et la capacité financière.

En utilisant un diagramme d'Ishikawa comme outil d'analyse, il a été possible de faire une compilation entre les préalables cités dans la littérature et les outils techniques associés. La Figure 3.1 présente le diagramme d'Ishikawa qui expose visuellement les préalables et leurs sous-facteurs en relation avec la variable dépendante de l'étude, soit le niveau de *readiness* à acquérir.

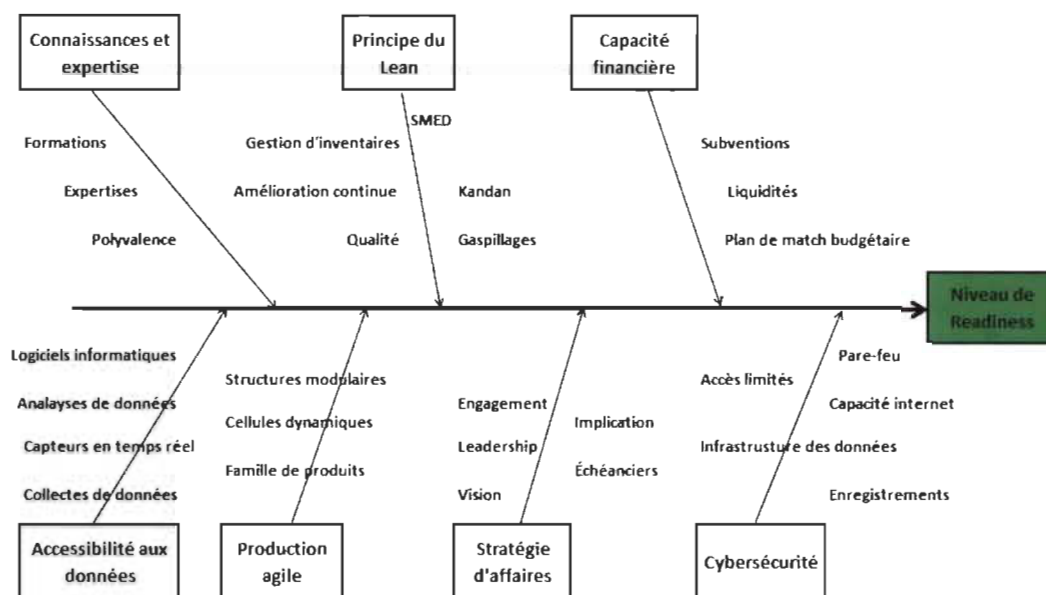


Figure 3.1 Diagramme d'Ishikawa

Cet outil permet de montrer les facteurs ciblés comme ayant un impact potentiel sur la recherche. Ensuite, en fonction des préalables cités dans la littérature, les variables indépendantes de la recherche ont pu être choisies et détaillées.

3.1.1 Liste des hypothèses

La méthodologie de ce mémoire est directement reliée aux sous-hypothèses à l'étude. Pour orienter les sous-hypothèses, il faut premièrement établir l'hypothèse principale de la recherche. Depuis le début de la recherche, il est question de l'importance du *readiness* numérique, puisque les PMEM ne sont pas prêtes. Toutefois, afin de prioriser ces préalables, il est important d'établir un lien entre le *readiness* et son impact sur la performance du système de production. Cette recherche prend donc pour hypothèse **que certains préalables issus du *readiness* numérique ont plus d'impact que d'autres sur la performance d'une entreprise manufacturière**. La priorisation des préalables permettra aux entreprises d'aller chercher des gains de performance plus rapidement,

leur permettant ensuite de mettre en place les préalables complémentaires pour leur transformation numérique.

Le Tableau 3.1 présente en sept catégories tous les préalables cités et ceux-ci sont regroupés selon l'axe exploré. Chaque variable indépendante regroupe un ensemble de sous-facteurs. Ces sous-facteurs correspondent à tous les outils cités dans la littérature regroupés par catégorie. Toutefois, les sous-facteurs n'ont pas été évalués individuellement parce que leur effet est inclus globalement dans l'effet des préalables principaux. À partir de ces sept catégories, il est possible d'établir les cinq sous-hypothèses que cette recherche tente de valider :

Préalable A : la connaissance/expertise des employés.

Hypothèse 1. Développer le niveau de connaissances et d'expertise des employés permettra à la PMEM d'améliorer sa performance.

Préalable B : avoir une stratégie d'affaires.

Hypothèse 2. Mettre en place une stratégie d'affaires permettra à la PMEM d'améliorer sa performance.

Préalable C : les principes du *Lean*.

Hypothèse 3. Introduire les principes du *Lean* permettra à la PMEM d'améliorer sa performance.

Préalable D : l'agilité de production.

Hypothèse 4. Augmenter son agilité de production permettra à la PMEM d'améliorer sa performance.

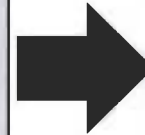
Préalable E : l'accès aux données.

Hypothèse 5. Mettre en place des méthodes pour avoir accès à ses données pertinentes permettra à la PMEM d'améliorer sa performance.

Ces hypothèses ont été utilisées pour simuler l'effet des préalables sur la performance de l'entreprise. Les résultats ont pour objectif de confirmer ou d'infirmer l'importance de l'atteinte du niveau de *readiness* des PME manufacturières pour améliorer leur performance en vue de leur transformation vers l'Industrie 4.0.

Tableau 3.1 Tableau des hypothèses de recherche

Catégories d'hypothèses		Sous-hypothèses	Axes	Résultats	
Hypothèse 1	Connaissances et expertises	Niveau de qualification des employés	Axe organisation, stratégique et humain		
		Expertises spécialisées (ex : technologies)			
		Programmes de formation			
		Partages de connaissances			
		Polyvalence des employés			
Hypothèse 2	Stratégies d'affaires	Établir une stratégie d'affaires			
		Avoir une vision et une culture d'entreprise			
		L'implication de la direction (leadership)			
		Engagement et exemplarité			
		Gestion du changement			
-	Capacité financière	Libérer de la capacité financière			
Hypothèse 3	Principe <i>Lean</i>	Amélioration continue	Axe Technique		
		Mettre en place des SMED			
		Utiliser un système 5S			
		Utiliser un système Kanban			
		Faire des ateliers Kaizen			
Hypothèse 4	Agilité de production	Système d'assurance qualité			
		Gestion d'inventaire			
		Type d'aménagement			
		Avoir des familles de produits (Standardisation)			
		Personnalisation des produits			
Hypothèse 5	Accessibilité des données	Structures modulaires	Axe Technologique		
		Aménagement avec des cellules dynamiques			
		Systèmes de gestion de données			
		Utilisation stratégique des données (Analyses)			
		Disponibilité des temps standards de production			
Hypothèse 5	Accessibilité des données	Système ERP			
		Collecte de données en temps réel			
		Mettre des capteurs			
		Infrastructure informatique			
		Capacité suffisante de stockage des données			
-	Cybersécurité	Infrastructure pour protéger ses données			



Niveau de Readiness

Les préalables associés à la capacité financière et la cybersécurité ont été rejetés de l'étude. La raison est la suivante : ces deux préalables ne sont pas axés sur la performance du plancher de production. L'hypothèse principale est reliée à la performance, donc l'impact des préalables sur le système de production est associé à des indicateurs de performance. Ceux-ci permettent de quantifier et d'analyser les résultats. Les indicateurs choisis servent à démontrer les améliorations causées par les préalables sur le système de production. La capacité financière n'a pas d'impact technique sur la productivité du plancher de production. Elle est citée dans la littérature à titre de préalable pour signifier l'importance de l'aspect financier lors des décisions d'acquisition et d'appropriation des technologies. De plus, bien que la cybersécurité soit un aspect à ne pas négliger en vue de l'introduction des technologies de l'Industrie 4.0, celle-ci n'a pas non plus un impact sur le niveau de performance de la production. Il est toutefois important de noter que ces préalables ont été rejetés dans un aspect pratique uniquement. Il s'agit tout de même, selon la littérature, de préalables essentiels à considérer pour les PMEM dans leur transformation vers l'Industrie 4.0. Parfois, dans la littérature, il est mentionné que le manque de capacité financière ou la mauvaise gestion de celle-ci peut causer des échecs lors de la transformation numérique (Matt et al., 2018). Pour réussir leur transformation vers le numérique, les PMEM doivent avoir prévu un budget pour l'intégration de technologies et en intégrant des technologies d'acquisition de données, celles-ci doivent aussi être en mesure d'avoir un système de sécurité pour ces données.

3.2 Cadre conceptuel

Maintenant que la revue de littérature a été réalisée et que l'identification des sous-hypothèses de recherche a été posée, il est possible de réaliser un cadre conceptuel pour résumer le sujet du mémoire. En fonction de l'importance de réagir à la demande de personnalisation de masse pour rester compétitif (Hassani, 2020), il est possible

d'effectuer le lien logique entre tous les concepts touchés dans ce mémoire en considérant premièrement le problème de performance que les PME manufacturières rencontrent (Lihra, 2009).

Le cadre conceptuel présenté à la Figure 3.2 permet de mettre en relation visuellement les différents concepts ressortis de la littérature scientifique afin de confirmer l'importance du *readiness* numérique.

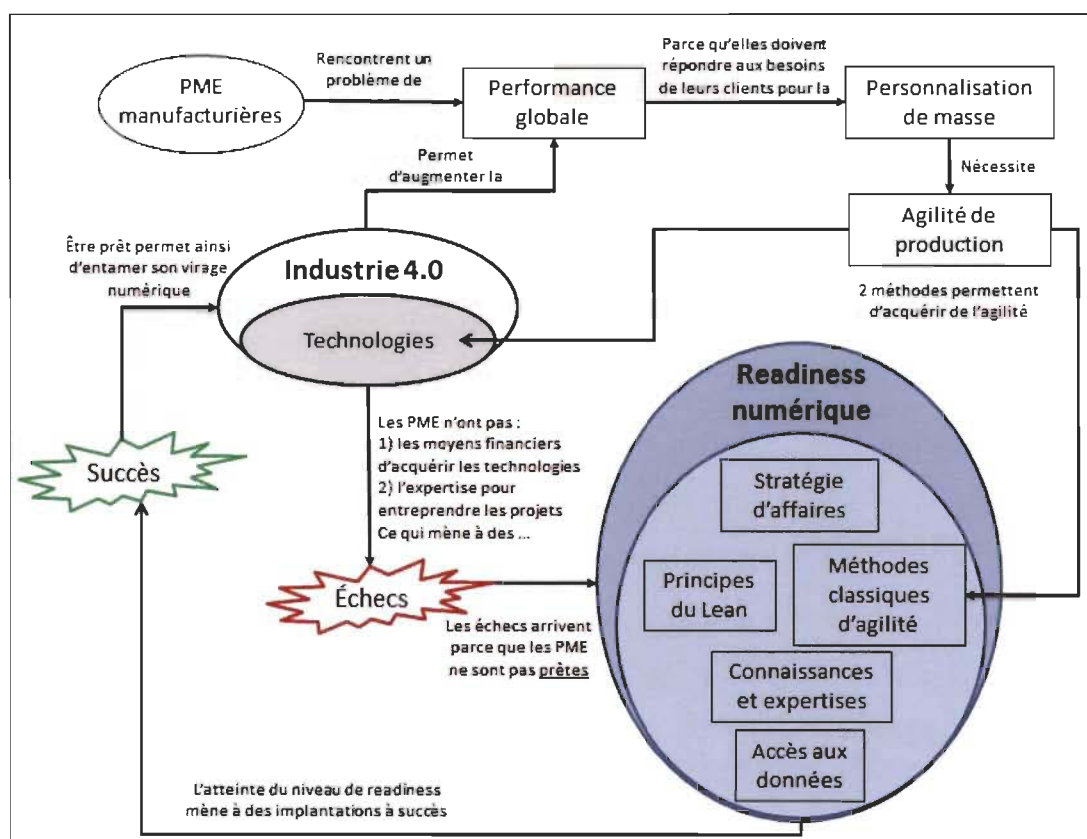


Figure 3.2 Cadre conceptuel

Tandis que les grandes entreprises améliorent leur performance, les PMEM, elles, rencontrent plusieurs obstacles (Matt et al., 2018; Rauch et al., 2019). Elles doivent intégrer le concept d'agilité de production. Pour s'y faire, les technologies de l'Industrie

4.0 sont souvent considérées (Zhang et al., 2021). Toutefois, les projets passés démontrent que les PMEM qui se lancent dans cette transformation numérique rencontrent souvent des échecs (Forth et al., 2020). Ces échecs sont principalement dus au fait que les PME ne sont pas prêtes pour un tel changement (Forth et al., 2020). C'est là que le concept de *readiness* numérique entre en ligne de compte. Pour atteindre le *readiness* nécessaire, il a été possible d'émettre une liste de préalables avec la littérature. Ceux-ci agissent à titre de piliers afin de stabiliser l'entreprise et ainsi lui permettre d'être prête à accomplir avec succès sa transformation numérique. Une telle transformation permettra aux PME manufacturières d'augmenter leur performance globale et ainsi rester compétitives sur le marché qui ne cesse d'évoluer (Moeuf et al., 2018; Zhang et al., 2021).

3.3 Structure de la méthodologie

Premièrement, les données pratiques utilisées pour la méthodologie proviennent d'une situation de production réelle chez une PME québécoise. La liste complète des données de l'entreprise est présentée dans la section informative du modèle de simulation (Section 3.5). L'entreprise Équifab inc. œuvre dans le milieu de l'assemblage par soudure de l'aluminium et n'a pas encore mis en place de stratégie pour introduire les concepts et les technologies de l'Industrie 4.0 dans son usine.

La méthodologie consiste à jumeler un plan d'expériences et un modèle de simulation. Le plan d'expériences permet d'établir les différentes combinaisons des variables indépendantes à tester et le modèle de simulation permet de quantifier les résultats des expériences. Dans le cas présent, le plan d'expériences qui est utilisé est un plan complet. Le modèle de simulation a été fait avec le logiciel ARÉNA et utilise les données réelles de la situation de l'entreprise test. Les résultats obtenus ont servi à faire une

analyse de variance (ANOVA), ce qui a permis d'évaluer l'effet des facteurs et des interactions en comparant leur impact sur la performance d'une PME manufacturière.

Pour valider les résultats de la simulation, les résultats obtenus théoriquement ont été mis en application dans l'entreprise test lors d'une étude de cas. Cela a permis d'observer l'influence des préalables significatifs sur la performance d'un système de production réel. Cette étude de cas a permis d'observer en pratique l'influence des différents préalables considérés comme essentiels à l'implantation de l'Industrie 4.0. Le Chapitre 6 présente l'étude de cas réalisée grâce au programme Mitacs Accélération.

3.4 Plan d'expériences

Un plan complet a été utilisé pour tester les différentes combinaisons des préalables. Le choix d'un plan complet a été basé sur la fiabilité que ce plan apporte aux résultats. Ce plan d'expériences a permis de détecter les préalables significatifs pour la performance de l'entreprise, soit en fonction des différentes variables dépendantes sélectionnées.

Le Tableau 3.2 présente les variables et les valeurs de leurs différents niveaux.

Tableau 3.2 Facteurs et niveaux du plan d'expériences

Facteurs	Niveaux	
	0	1
Connaissances et expertises	Absent	Présent
Stratégie d'affaires	Absent	Présent
Principes du Lean	Absent	Présent
Agilité de production	Absent	Présent
Accès aux données	Absent	Présent

Avec cinq facteurs à l'étude ayant chacun deux niveaux (2^5), un plan complet de 32 expériences est réalisé. De plus, ce nombre d'expériences relativement faible permet la réalisation d'un plan complet dans la situation actuelle. Le Tableau 3.3 présente le plan d'expériences qui est utilisé pour générer les résultats de l'étude. L'ensemble des expériences sont réalisées par un modèle de simulation en fonction du nombre de répliques choisies (Section 3.5.4).

Tableau 3.3 Plan d'expériences complet

# Exp.	Lean (C)	Agilité (D)	Connaissance (A)	Accès aux données (E)	Stratégies d'affaires (B)
1	1	1	1	1	0
2	1	1	1	1	1
3	1	1	1	0	0
4	1	1	1	0	1
5	1	1	0	1	0
6	1	1	0	1	1
7	1	1	0	0	0
8	1	1	0	0	1
9	1	0	1	1	0
10	1	0	1	1	1
11	1	0	1	0	0
12	1	0	1	0	1
13	1	0	0	1	0
14	1	0	0	1	1
15	1	0	0	0	0
16	1	0	0	0	1
17	0	1	1	1	0
18	0	1	1	1	1
19	0	1	1	0	0
20	0	1	1	0	1
21	0	1	0	1	0
22	0	1	0	1	1
23	0	1	0	0	0
24	0	1	0	0	1
25	0	0	1	1	0
26	0	0	1	1	1
27	0	0	1	0	0
28	0	0	1	0	1
29	0	0	0	1	0
30	0	0	0	1	1
31	0	0	0	0	0
32	0	0	0	0	1

3.4.1 Quantification des préalables

Pour exécuter les expériences à travers la simulation, il est important de transformer les préalables en données quantifiables. À la suite des recherches dans la littérature, sur les plateformes internet et avec des contacts en entreprise, les préalables ont été associés à des valeurs applicables sur le terrain. Les valeurs représentent des gains qui sont quantifiés de façon à influencer directement la performance de l'entreprise définie par les variables dépendantes (VD) choisies.

3.4.1.1 Performance (VD)

Dans cette recherche, la performance agit à titre de construit de l'étude. Toutefois, pour obtenir des résultats, il est essentiel de déterminer les aspects de la performance à explorer. Il faut donc choisir des indicateurs de performance représentatifs en fonction de l'impact des préalables sur les gains de performance générés. Ces indicateurs agiront à titre de variables dépendantes de l'étude. Pour commencer, un petit survol de la littérature par rapport à la définition du terme performance a été réalisé.

Le Dictionnaire Larousse (Larousse, 2017) définit la performance comme des résultats obtenus dans un domaine précis par quelqu'un, une machine, un véhicule, etc. Gamache et al. (2019) définissent la performance numérique en se référant à la définition de Jacquet (2011) pour la performance organisationnelle, posant que la performance organisationnelle est composée de plusieurs critères variant en fonction de leur potentiel d'action et de l'objectif à atteindre. La performance numérique est définie comme la mesure permettant d'évaluer l'avancement de l'exécution d'une transformation numérique selon les pratiques d'affaires associées à l'Industrie 4.0 (Gamache et al., 2019).

Dans la littérature, un indicateur de performance souvent associé aux processus manufacturiers est le Taux de rendement global (TRG) (Bhadani, Asbjörnsson, Hulthén et Evertsson (2020); Gamache et al., 2017; Schiraldi et Varisco (2020)). Le TRG permet de couvrir l'influence des différents facteurs de la performance, soit la qualité, la disponibilité et l'efficacité. Il s'agit d'un indicateur ayant une représentation globale sur la performance de production d'une entreprise. Le TRG permet de cibler les lacunes de l'entreprise pour ensuite l'orienter dans ses phases d'amélioration. En plus du TRG, d'autres indicateurs de performance sont utilisés dans les milieux manufacturiers, comme le temps de réaction à une commande, le taux de satisfaction des clients, la cadence de production, les temps de mise-en-course, le temps de cycle, etc. (Andrews, 2019). Certains indicateurs sont plus adaptés aux décisions prises au niveau de la direction, par exemple le taux de conformité ou le volume de production tandis que d'autres sont plus pertinents pour les décisions prises sur le plancher de production comme le taux de valeur ajoutée des opérations. Les indicateurs de performance doivent être simples à comprendre et ceux-ci doivent être orientés en fonction des objectifs des entreprises.

Le principal indicateur de performance choisi pour cette étude est le volume de production. Celui-ci permet de démontrer les gains d'efficacité du système global tout en étant un indicateur qui parle beaucoup à la direction d'une entreprise. Toutefois, par souci du détail, d'autres indicateurs ont aussi été considérés afin de ne pas négliger les aspects plus spécifiques de l'Industrie 4.0 et ainsi bien représenter l'influence de tous les préalables. L'ajout de ces trois indicateurs supplémentaires a permis d'élargir les analyses. Pour l'aspect productivité, le temps de fabrication des entités sur la ligne de production est mesuré, soit le temps de cycle des produits. Pour ce qui est de l'aspect d'agilité, il y a le temps de passage des entités et le délai de création des commandes. Le volume de production permet de regrouper à titre d'ensemble les différents effets des préalables afin de pouvoir les comparer plus globalement. Ces quatre indicateurs

sont quantifiés à l'aide de la simulation. L'échelle présentée à la Figure 3.3 sert à distinguer les trois temps cumulés lors de la réalisation d'une commande dans le processus de production étudié avec la simulation.

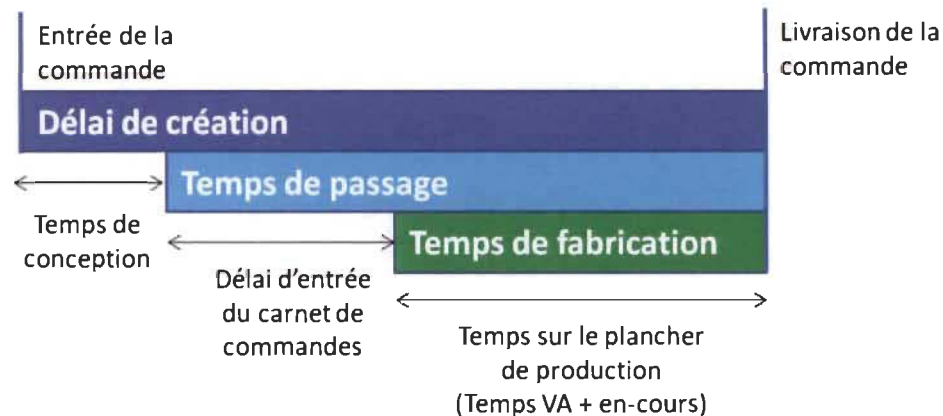


Figure 3.3 Représentation des indicateurs de temps

3.4.1.2 Les connaissances/expertises (VI 1)

Un point important pour préparer les PME à la transformation est l'aspect humain. Il est fréquent dans la littérature d'associer les PME à un faible niveau d'expertise à l'interne (Chonsawat et Sopadang, 2020; Gamache et al., 2017; Ghobakhloo et Ching, 2019; Machado et al., 2019; Mittal et al., 2018). Ce manque valorise la nécessité d'un tel facteur. Ce préalable est souvent associé aux connaissances, à l'expertise des employés ou encore au niveau de polyvalence intégrée dans une entreprise. Il est mentionné que le niveau de connaissance peut être amélioré grâce à l'introduction de programme de formation (Dumont, 2019).

En fonction de l'Industrie 4.0, il y a uniquement 26 % des PME québécoises qui ont déjà entamé un processus de formation axé sur le développement des compétences numérique de leurs employés (STIQ, 2020). Plusieurs études établissent par ailleurs un

lien étroit entre la formation et la productivité (Bernier (2014); Fabi, Raymond, Lacoursière et Arcand (2004); Lambert et Abdul-Nour (2011), autant au niveau de la productivité globale que l'amélioration de la courbe d'apprentissage. Toutefois, peu d'études indiquent un pourcentage fixe de gains obtenus grâce à la formation. Afin de quantifier le gain, l'entreprise Poka¹ a été contactée le 6 novembre 2020. Poka est une entreprise spécialisée dans la gestion des problèmes en industrie, ayant développé une plateforme sociale industrielle permettant de transmettre des connaissances pratiques. La plateforme permet, en temps réel, de rassembler la mémoire et l'expérience de tous les employés, facilitant ainsi le transfert de savoir. Poka favorise le partage, l'utilisation et l'acquisition de connaissances en continu afin d'optimiser la gestion de la production manufacturière.

À la suite d'une discussion avec le coordonnateur en amélioration continue chez Poka, Philippe Veilleux (technicien en génie industriel), il a été possible, en fonction de leur expérience et de leurs données, de conclure qu'une telle plateforme agissant à titre de programme de formation permet d'aller chercher un gain de productivité d'environ 5 % sur la production. Monsieur Veilleux indique toutefois que les avantages sont nombreux : amélioration de la qualité, diminution des pertes, réduction des temps d'observation, etc.

3.4.1.3 Stratégie d'affaires (VI 2)

Dans la littérature, il est mentionné à plusieurs reprises que de mettre en place une stratégie d'affaires au sein de son organisation favorise grandement le succès de la transformation numérique vers l'Industrie 4.0 (Anggrahini et al., 2018; Chonsawat et Sopadang, 2020; De Carolis et al., 2017; Gamache et al., 2017; Ghobakhloo et Ching,

¹ Entreprise Poka : <https://www.poka.io/fr>.

2019; Indrawan et al., 2019; Machado et al., 2019; Mittal et al., 2019; Moeuf et al., 2020; Pacchini et al., 2019; Rauch et al., 2019; Schumacher et al., 2016; Vrchota et al., 2019). En plus de favoriser le succès, avoir une stratégie d'affaires augmente les chances d'adoption de cette révolution (Vrchota, Volek et Novotna, 2019). Selon Gamache et al. (2019), une entreprise ayant implanté une stratégie d'affaires performe globalement **22,9 %** plus qu'une entreprise sans stratégie.

Ainsi, pour ce mémoire, lorsque la stratégie d'affaires est inactive, le système de production ne pourra augmenter ses gains que d'un coefficient de 77,1 % ($100 \% - 22,9 \%$). À l'opposé, la présence d'une stratégie d'affaires permettra d'atteindre 100 % des gains amenés par les différents préalables. Par exemple, le gain qu'apporte le préalable de connaissances, soit 5 %, est limité à un gain de 3,85 % ($5 * 0,771$) lorsqu'il n'y a pas de stratégie d'affaires mise en place dans l'entreprise.

3.4.1.4 Les principes du *Lean* (VI 3)

Les principes du *Lean* font souvent référence à la réduction des gaspillages, ce qui entraîne par le fait même une amélioration à plusieurs niveaux de la production. Selon plusieurs auteurs, les principes du *Lean* permettent d'améliorer principalement la productivité, la qualité, les coûts, les stocks, etc. (Acosta-Vargas, Chicaiza-Salgado, Acosta-Vargas, Salvador-Ullauri et Gonzalez (2021); Elwardi, Meddaoui, Mouchtachi et Nissoul (2021). Dans la situation actuelle, le *Lean* est uniquement représenté par la qualité et la productivité afin de se concentrer sur l'impact que le *Lean* a sur les variables dépendantes choisies et analysées dans l'étude. Par exemple, le gain d'espace par la réduction d'en-cours n'est pas généré ou quantifié par le modèle de simulation, alors il n'est pas considéré. Il est toutefois important de noter que le *Lean* permet malgré tout un gain global sur la gestion et la structure de la production.

Selon les auteurs Earley (2011) et Amjad, Rafique et Khan (2021), le *Lean* représente une amélioration de **25 %** sur la productivité du système et une élimination de **26 %** des non-conformités générées. Dans le modèle de simulation, lorsque le préalable du *Lean* est présent, ceci correspond à un taux de 75 % ($100 \% - 25 \%$) des temps de production initiaux. Pour le taux de qualité, l'entreprise possède actuellement un taux de conformité de 10 % à la suite de l'inspection finale, donc 90 % des produits subissent des retouches avant leur expédition. En activant le *Lean*, le taux de conformité des produits à la suite de leur inspection augmentera à 33 % ($10 + 0,26 \cdot 90$).

3.4.1.5 L'agilité de production (VI 4)

L'agilité de production permet au système d'être plus réactif à des imprévus ainsi qu'aux demandes des clients (Rauch et al., 2019). L'introduction des concepts de standardisation permet de rendre les processus et produits d'une entreprise agiles et ainsi répondre plus rapidement aux demandes de personnalisation de masse (Baron (2005); Zhang, Deng, Wang, Chen, Yan, Zou et Zhu (2019). L'agilité est une étape préalable essentielle car tel que mentionné dans la problématique, les entreprises doivent répondre à la personnalisation de masse pour rester compétitives et l'agilité est une bonne façon d'y arriver. L'agilité est souvent combinée à l'introduction de l'Industrie 4.0. Toutefois, d'autres méthodes, non technologiques, sont offertes aux entreprises et pourraient être privilégiées avant l'entrée de technologies de haut niveau.

N'ayant pas trouvé de pourcentage d'amélioration relié à l'agilité dans la littérature, plusieurs entreprises ont été contactées afin de recueillir des références plancher sur le sujet. À la suite de ces discussions, il est déterminé que l'agilité a un effet sur les perturbations que le système subit, autant au niveau de la fréquence de celles-ci que de leur durée.

Selon les entreprises Nita inc. (Normand Lord, pdg) et Yourbarfactory (Cédrik Bovin, directeur mécanique), l'introduction des méthodes classiques d'agilité a permis à leur entreprise de diminuer de **50 %** le nombre d'arrêts liés à une perturbation et de réagir à cette perturbation **95 %** plus rapidement qu'auparavant.

De plus, lorsqu'il est question d'agilité, il est souvent question de standardisation des produits (Baron, 2005; Gamache (2016)). Les entreprises qui désirent être plus agiles doivent être en mesure d'être plus réactives aux demandes de personnalisation de leurs clients. Pour y arriver, elles doivent faciliter leur conception de produit. La méthode recommandée est de standardiser ses produits, ses options et ses assemblages. L'introduction de structures modulaires facilite la conception de produits personnalisés. Ainsi, lorsque le préalable de l'agilité est présent dans la simulation, les produits de l'entreprise test sont standardisés. Les pourcentages de ventes de chaque type de produit (T1, T2, T3, T4, T5, T6) varient afin de présenter une réduction des commandes demandant un haut niveau de personnalisation. De plus, grâce à la standardisation, le temps de conception de chaque produit est réduit. En consultant des entreprises ayant mis en place les concepts de la standardisation (Nita inc. et Rovibec Agrisolutions inc.), il a été possible de déterminer que l'activation de l'agilité permet une réduction de **80 %** du temps de conception d'une commande.

3.4.1.6 L'accès aux données (VI 5)

En vue de l'ère numérique, il est fréquent que les auteurs indiquent l'importance des données dans les processus décisionnels (De Carolis et al., 2017; Miragliotta, Sianesi, Convertini et Distanti (2018)). Avoir accès aux données pertinentes de la production permet d'augmenter le ratio de bonnes décisions puisqu'il s'agit de décisions informées (Singh et Bhanot, 2019). De plus, la prise de décision est plus rapide (Marr, 2020).

Ce préalable est modélisé pour affecter le ratio de bonnes décisions de même que la durée des perturbations. Lorsqu'une entreprise prend une bonne décision du premier coup, le délai de la perturbation est moins long que dans le cas contraire. Il a été mentionné par Normand Lord, président de Nita inc., et Gerry Gagnon, directeur général du CNIMI (Centre national intégré du manufacturier intelligent) que l'accessibilité aux données permet d'augmenter de **50 %** le taux de bonnes décisions. Après discussion avec le directeur de l'entreprise partenaire, cette dernière a actuellement un ratio de 70 % de bonnes décisions du premier coup, donc quand le préalable est présent, la simulation permet d'atteindre un taux de 85 % de bonnes décisions ($70 + 0,5 \times 30$). Ce calcul provient d'une augmentation de 50 % sur le ratio de mauvaises décisions afin d'aller améliorer de 15 % leur ratio total de bonnes décisions du premier coup.

Pour quantifier le gain et modéliser ce préalable, il est essentiel de combiner la réduction du temps de traitement à une perturbation à la prise de décision. Lorsque le préalable d'accès aux données est présent, le taux de bonnes décisions augmente et, de façon aléatoire, permet de réagir plus rapidement à la perturbation. L'accès aux données combiné à une bonne décision permet, selon Gerry Gagnon du CNIMI, de réduire de **55 %** le temps de réaction à une perturbation imprévue.

Le Tableau 3.4 présente un résumé des deux niveaux étudiés dans le plan d'expériences selon la variation de l'état des préalables.

Tableau 3.4 Facteurs et niveaux détaillés par gains quantifiables

Facteurs	Impacts / gains	Coefficients	
		Niveau 1 (Absent)	Niveau 2 (Présent)
Connaissances et expertises	Ratio du temps de production (Productivité)	100%	95%
Stratégie d'affaires	Niveau de gains des préalables appliqués	77,9%	100%
Principes du Lean	Ratio du temps de production (Productivité)	100%	75%
	Taux de conformité des produits finis (Qualité)	10%	33%
Agilité de production	Standardisation des produits	T1: 40%, T2: 20%, T3: 10%, T4: 15%, T5: 10%, T6: 5%	T1: 50%, T2: 25%, T3: 15%, T4: 5%, T5: 4%, T6: 1%
	Taux du temps de conception	100%	20%
	Fréquence entre les perturbations	2h15	4h30
	Taux de la durée de réaction à la perturbation	100%	5%
Accès aux données	Taux bonne décision (1er coup)	70%	85%
	Taux de la durée de réaction à la perturbation	100%	45%

Le Tableau 3.4 présente pour les cinq préalables tous les effets générés sur le système de production testé en fonction de la présence ou l'absence des préalables. À noter que les identifications T1, T2, T3, T4, T5 et T6 représentent les différents types de produits offerts, ceux-ci étant détaillés plus bas dans le Tableau 3.6. De plus, les combinaisons de gains, tels que l'amélioration de productivité liée au *Lean* et à la connaissance, sont gérées dans le modèle de simulation.

L'Annexe I présente au Tableau A1.1 le plan d'expériences complet avec les gains associés à l'activation ou inactivité chaque préalable. Ce plan détaillé permet d'exposer les différentes combinaisons étudiées. Il est aussi possible de se référer au Tableau A1.2 pour voir le détail de tous les calculs effectués pour représenter les gains des préalables.

3.5 Modèle de simulation ARÉNA

Pour représenter la situation du plancher de production de l'entreprise test, un modèle de simulation à événement discret réalisé sur le logiciel Aréna a été réalisé. L'entreprise fabrique des bennes en aluminium à une ligne d'assemblage en série qui avance sur une cadence prédéterminée. Cette ligne est alimentée par des cellules de préassemblage. Le flux de production de l'entreprise est représenté de façon globale à la Figure 3.4.

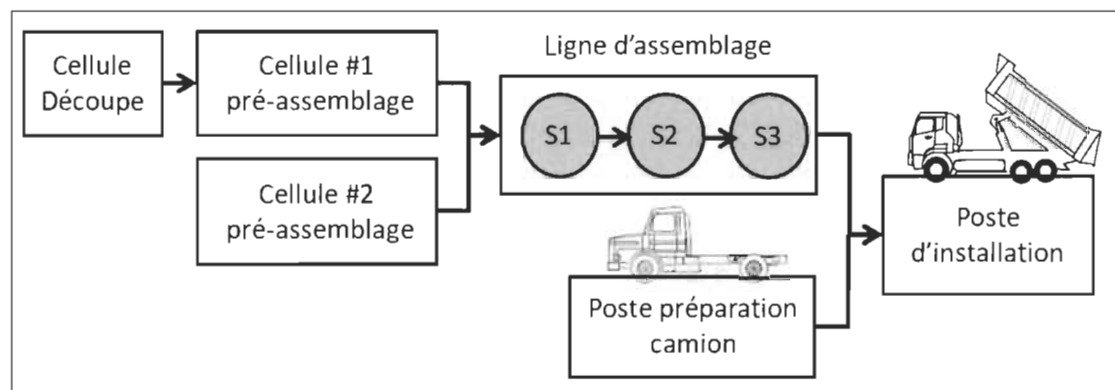


Figure 3.4 Schéma de la ligne d'assemblage

L'entreprise fabrique principalement deux types de bennes basculantes en aluminium, les bennes 9.5 et les bennes 11.5. Toutefois, l'entreprise offre plusieurs options de personnalisation pour ses produits. En plus des nombreuses options offertes pour ses produits dits standards, l'entreprise fabrique aussi des produits beaucoup plus complexes et beaucoup plus personnalisés. Malgré qu'il y ait un niveau de ressemblance élevé entre ses produits, l'entreprise doit toujours effectuer une nouvelle conception complète pour chaque produit vendu. L'entreprise désire standardiser ses produits mais n'arrive pas encore à refuser des ventes personnalisées. Ainsi, il y a une variété importante de produits qui est envoyée sur la ligne de production. Le Tableau 3.5 présente les six types de bennes principales envoyés sur la ligne.

Tableau 3.5 Liste des produits offerts

#	Descriptions	Ventes	Nb. options	Qté pièces totales
1	Benne standard de 11.5 pieds	40%	4	11
2	Benne standard de 9.5 pieds	20%	3	10
3	Benne sans option de 11.5 pieds	10%	0	7
4	Benne à copeau avec options	15%	10	17
5	Benne spécifique avec options	10%	8	15
6	Benne personnalisée avec options	5%	15	22

Lors de la simulation, certaines limites ont dû être considérées. Le nombre de types de bennes traitées était l'une d'entre elles. Lors de la création du modèle, il a été nécessaire d'établir une liste d'hypothèses. Ces hypothèses servent uniquement à encadrer la logique de modélisation du système de production étudié. Voici la liste d'hypothèses utilisées pour développer le modèle de simulation.

1. Le modèle fait la gestion d'un nombre limité de types de produits pour faciliter la gestion des temps d'opération à chaque poste (six types de bennes).
2. Le modèle ne respecte pas la planification prédéterminée de l'entreprise. Les commandes entrent en production selon leur ordre d'arrivée dans le système (premier arrivé, premier servi).
3. L'entrée des commandes est contrôlée à l'aide de contraintes de files d'attente, limitant le nombre maximal d'entrées pour éviter de surcharger le système.
4. Un nombre limité de places disponibles est associé à chaque poste pour contrôler le nombre d'en-cours sur le plancher de production.
5. Les réparations sont toujours gérées de façon prioritaire et sont gérées avant que le camion n'ait libéré l'espace de production occupé.

Une liste supplémentaire d'hypothèses est présentée à l'Annexe II. Ces hypothèses supplémentaires correspondent à des hypothèses posées modifiant la gestion détaillée

du système de production, par exemple le temps d'approvisionnement négligé dans l'étude.

3.5.1 Données de l'entreprise test

Le modèle de simulation doit représenter au mieux le plancher de production de l'entreprise test. Les Tableaux 3.6, 3.7 et 3.8 résument les temps de production associés aux différents produits pour les différents postes. Au préassemblage, le temps de production est partagé entre la découpe (opérateur) et la soudure (opérateur soudure). La différence entre l'opérateur soudure et les soudeurs de la ligne d'assemblage est que l'opérateur soudure travaille au préassemblage et est appelé à faire des tâches sans soudure tandis que les soudeurs effectuent l'assemblage par soudure du produit final.

Tableau 3.6 Temps de production préassemblage en heures

Type de pièces	#	Description	Temps de prod. (h)	
			Découpe	Soudure
Pièce de base	1	Bumper	0	1
Pièce de base	2	Frame	0,75	1
Pièce de base	3	Extrusions plancher	0,75	0
Pièce de base	4	Cabine protectrice	0	1
Pièce de base	5	Porte arrière	0,2	1,5
Pièce de base	6	Panneau latéral (G)	0,25	2
Pièce de base	7	Panneau latéral (D)	0,25	2
Option standard	8	Bras de sécurité	0,17	0,17
Option standard	9	Tuyau à gas	0,25	0,17
Option standard	10	Power pack	0,25	0
Option standard	11	Toile manuel	0,33	0
Options	12	Cylindre hydraulique (achat)	0	0
Options	13	Échelles	0,42	0,33
Options	14	Gardes boues	1	0
Options	15	Gyrophares (achat)	0	0
Options	16	Support de flèche	0,17	0,17
Options	17	Coffre	4	0
Options	18	Hfix	0	0,25
Options	19	Ancrage plancher (achat)	0	0
Options	20	Échelle panneau (achat)	0	0
Options	21	Support de cônes	0,25	0,25
Options	22	Lift gate (achat)	0	0

Tableau 3.7 Temps de production ligne d'assemblage en heures

Type #	Temps de conception (h)	Station 1 (h)	Station 2 (h)	Station 3 (h)	Installation (h)
1	TRIA(3,4,16)	UNIF(8,10)	UNIF(7,9)	UNIF(5,7)	UNIF(7,9)
2	TRIA(3,4,16)	UNIF(8,9)	UNIF(7,9)	UNIF(5,7)	UNIF(7,9)
3	TRIA(2,3,14)	UNIF(8,10)	UNIF(7,9)	UNIF(5,7)	UNIF(7,9)
4	TRIA(7,8,18)	UNIF(8,10)	UNIF(7,9)	UNIF(7,9)	UNIF(7,9)
5	TRIA(5,6,16)	UNIF(8,10)	UNIF(7,9)	UNIF(7,9)	UNIF(7,9)
6	TRIA(8,14,20)	UNIF(8,10)	UNIF(7,9)	UNIF(7,9)	UNIF(7,9)

Tableau 3.8 Temps de production sur les camions et supplémentaires en heures

Temps de production		
Type de camion	Ventes	Préparation Camion (h)
Ford	50%	UNIF(7,9)
Dodge	30%	UNIF(7,9)
Isuzu	20%	UNIF(10,14)
Temps supplémentaires		
Perturbations	TRIA (2, 15, 120)min	
Réparations	TRIA (2, 4, 8) h	

Toutes ces informations permettent de modéliser une copie du système de production chez Équifab inc. à un modèle de simulation. Les Figure 3.5, Figure 3.6, Figure 3.7 et Figure 3.8 présentent le visuel du modèle complet du modèle. Le modèle fonctionne de manière à représenter la séquence de production réelle.

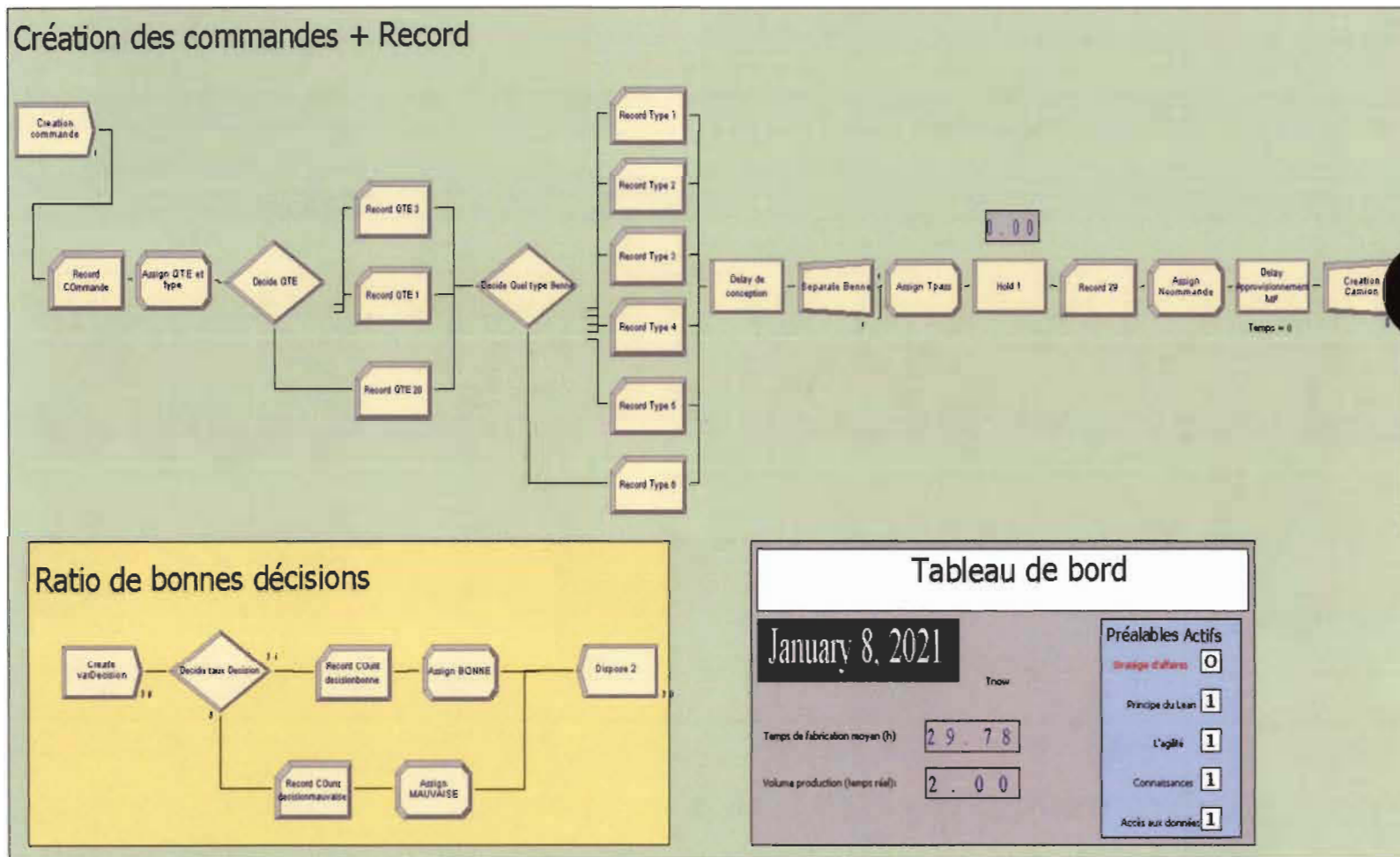


Figure 3.5 Visuel du modèle de simulation

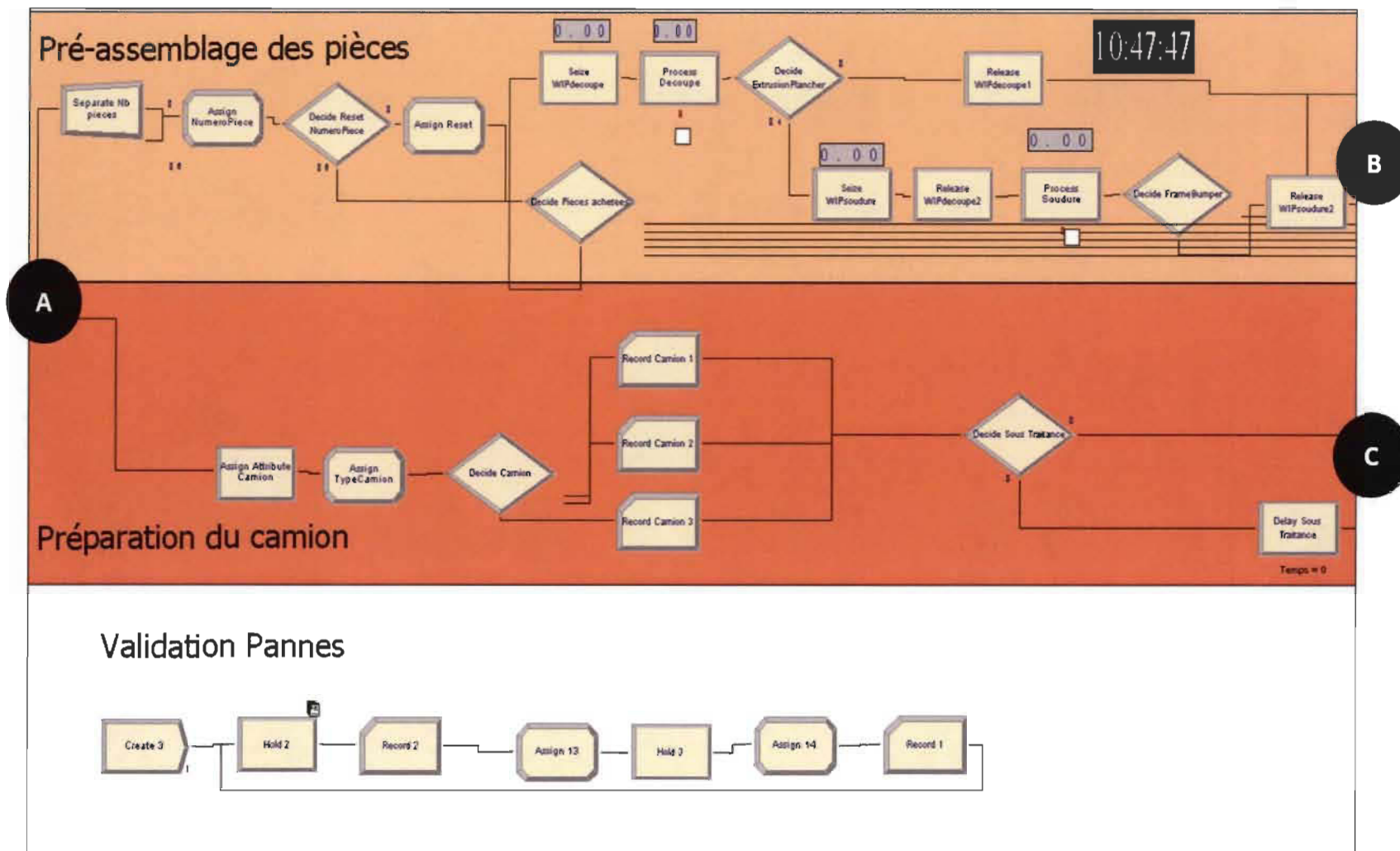


Figure 3.6 Visuel du modèle de simulation

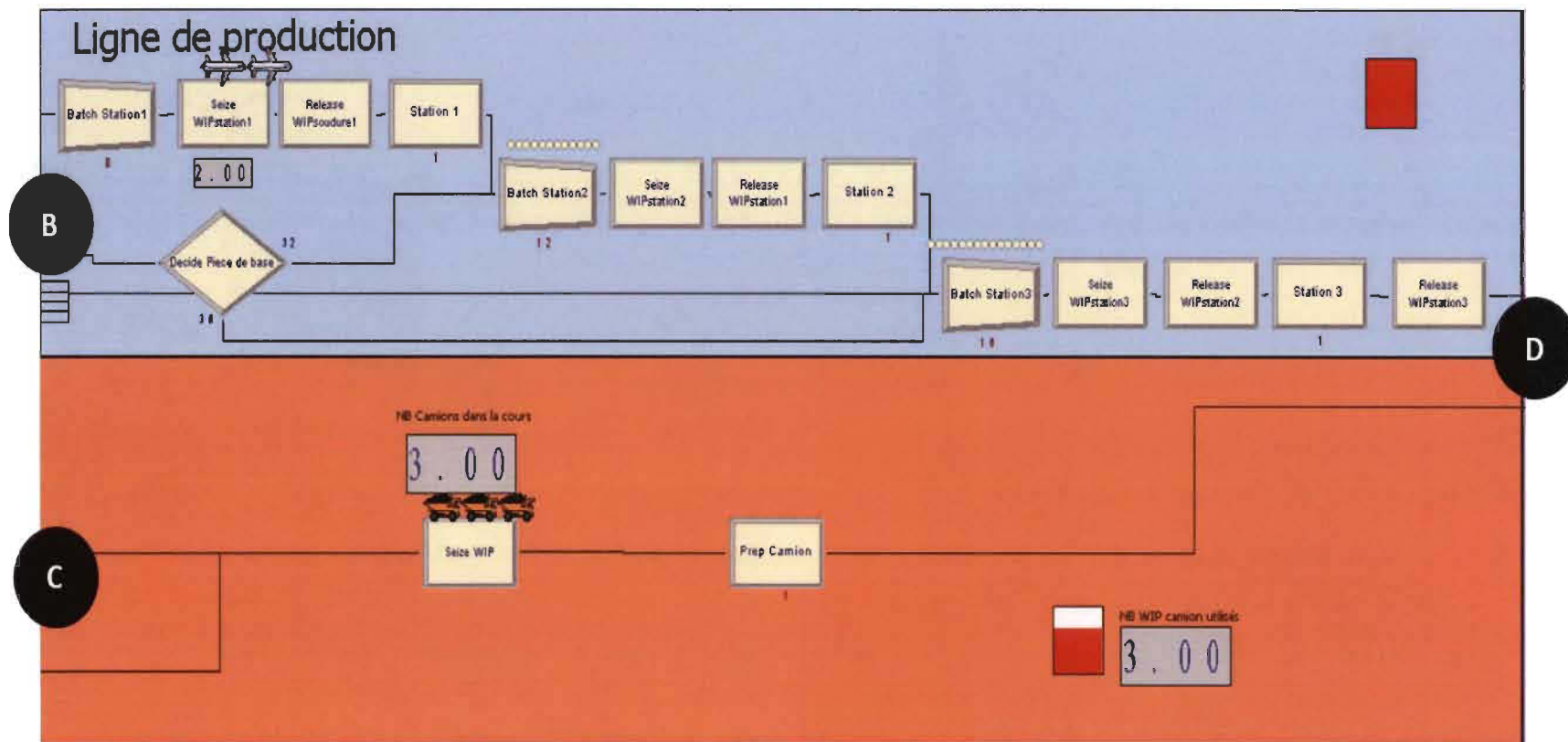


Figure 3.7 Visuel du modèle de simulation

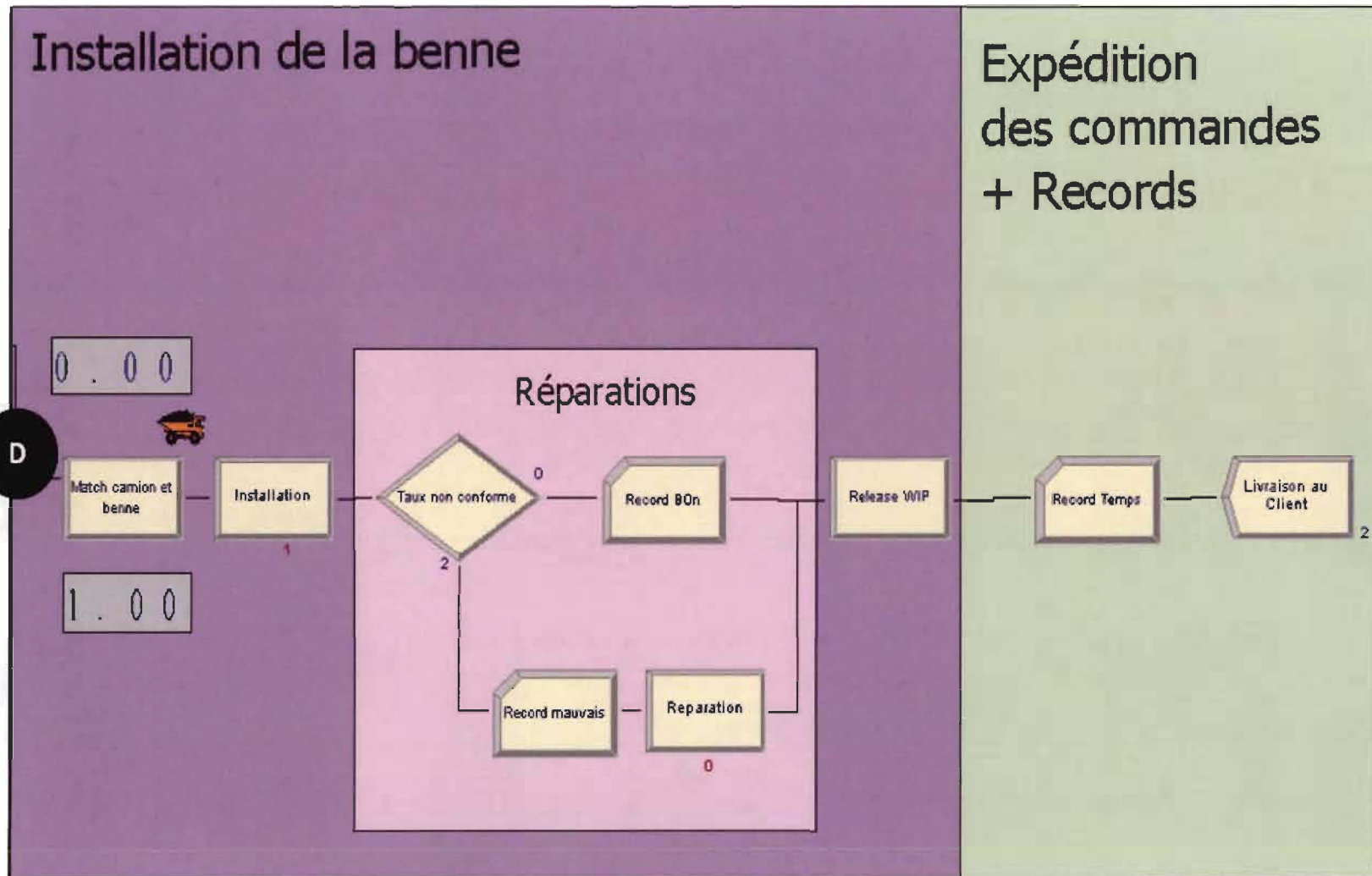


Figure 3.8 Visuel du modèle de simulation

3.5.2 Description du modèle de simulation

Dans l'ordre, le modèle génère des commandes en fonction de la fréquence de ventes des entités de commandes de l'entreprise (CREATE). Ces entités se font ensuite attribuer, à l'aide de distributions, un type de commande selon le taux de popularité des produits ainsi d'une quantité de produits dans la commande (ASSIGN). Les entités sont ensuite dupliquées selon la quantité assignée (SEPARATE), ce qui permet que le système gère des entités représentant un produit complet, soit une benne. Chaque entité est assignée à un numéro de commande unique.

Ensuite, les bennes sont envoyées en production selon une limite de capacité prédéterminée. Cette contrainte permet d'éviter de surcharger le système et d'assurer que la valeur du temps de fabrication soit représentative de la réalité. Pour s'y faire, une zone tampon est instaurée et libère des entités selon des contraintes préétablies (HOLD).

Lorsque l'entité est libérée, celle-ci est dupliquée pour créer une entité benne et une entité camion. Ces deux entités différentes ne parcourent pas les mêmes étapes de production mais possèdent le même numéro de commande. Dès leur entrée sur la ligne, les entités de benne sont transformées en entité de pièces (SEPARATE) et un numéro de pièce leur est assigné. Chacune des pièces est ainsi traitée dans les cellules de préassemblage selon le temps de production associé et elles sont acheminées aux différents postes de la ligne d'assemblage en fonction de leur séquence. Devant chaque poste, les pièces nécessaires à la fabrication des tâches du poste sont regroupées (BATCH). De cette façon, il est possible de s'assurer que tout le matériel nécessaire est disponible avant de commencer le travail : les pénuries de stock sont ainsi évitées.

À la suite du regroupement, les entités sont à nouveau identifiées à titre de benne. Les produits parcourent la ligne de production en respectant les distributions des temps de production. L'entité camion est traitée en parallèle afin d'être prête à l'installation de la benne. Pour finir, la benne est jumelée au type de camion associé à la même commande (MATCH).

Le modèle permet aussi de gérer les réparations, les perturbations ou pannes que la production rencontre ainsi que la collecte de données nécessaire à l'étude (RECORD). Les réparations sont détectées lors de l'inspection finale et sont traitées avant que le produit final soit livré au client, tandis que les perturbations sont affectées à tous les postes et respectent une fréquence prédéterminée.

Pour accomplir la modélisation, il a été nécessaire d'utiliser plusieurs attributs, variables et expressions. La liste de ceux-ci se retrouve au Tableau A2.1 de l'Annexe II.

3.5.3 Calcul du régime permanent

Le calcul du régime permanent permet d'assurer qu'un modèle en horizon infini ait atteint sa stabilité avant de rouler les expériences. Pour y arriver, il suffit de générer des répliques sur un intervalle de temps considéré long; dans le cas présent, la longueur était de 5000 heures. Les données générées sont analysées graphiquement à la Figure 3.9 et permettent de déterminer la durée de la période de réchauffement.

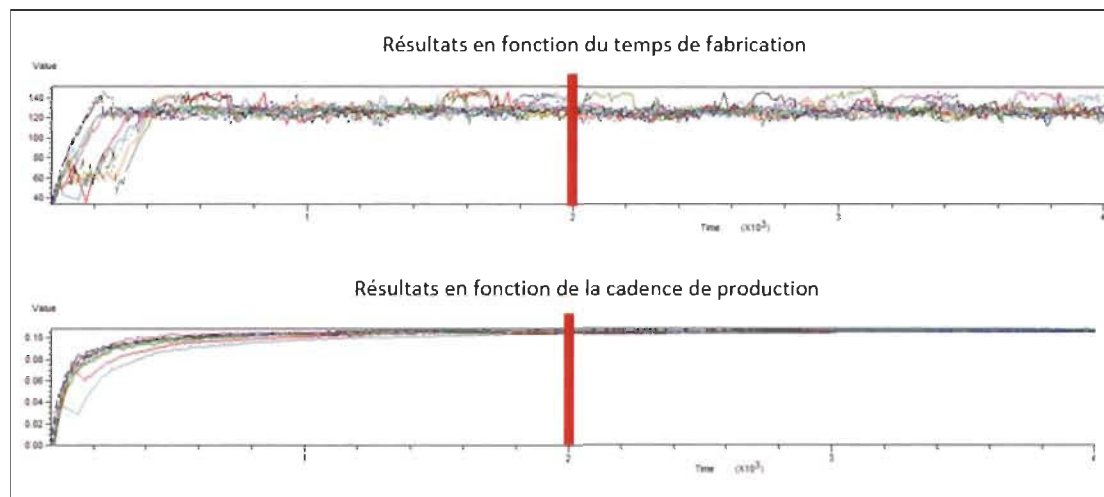


Figure 3.9 Résultats du régime permanent

Dans le cas présent, le régime permanent est atteint à 2000 heures. Le régime permanent est atteint lorsque les données analysées, ici le temps de fabrication ou la cadence de production, se stabilisent dans le temps. Ce résultat permet ainsi d'ajuster la période de réchauffement dans les paramètres de la simulation.

3.5.4 Nombre de réplifications

Le nombre de réplifications a un effet sur la précision des résultats étant donné la variabilité aléatoire entre les expériences. En roulant un nombre de réplifications établi, il est possible de diminuer l'effet de la variabilité et ainsi d'assurer la fiabilité du modèle. Pour déterminer le nombre de réplifications nécessaires, il est nécessaire de rouler des expériences selon un nombre de réplifications croissantes et de les comparer.

En comparant les résultats des demi-largeurs (*Half-Widths*) provenant du rapport de résultats (*Category Overview*) pour une donnée du modèle actuel pour tous les tests effectués, il est possible de déterminer le nombre de réplifications optimal. La donnée utilisée dans cette étude est le temps de passage. Le nombre de réplifications optimal

correspond à l'endroit où les demi-largeurs se stabilisent. Toutefois, dans une situation où il y a un plusieurs expériences à rouler (32 expériences), il doit y avoir un choix stratégique sur le nombre de réplifications à effectuer. Il faut un nombre assez élevé pour assurer la précision des résultats mais pas trop élevé pour ne pas surcharger le nombre de résultats à traiter. Cela étant dit, le nombre idéal correspond à l'endroit où les demi-largeurs arrêtent de diminuer drastiquement; dans le Tableau 3.9 il s'agit des réplifications identifiées en vert.

Tableau 3.9 Comparaison des demi-largeurs par réplification

Nombre de réplifications	Demi-largeurs du Temps de passage
1	insuffisant
2	632,66
3	276,25
4	195,18
5	133,41
6	103,04
7	83,04
8	90,36
9	78,36
10	73,26
11	65,7
12	60,58
13	55,41
14	50,96
15	51,68
20	40,34

Cette analyse nous permet de remarquer que les résultats des demi-largeurs semblent se stabiliser à neuf réplifications où la différence entre les demi-largeurs est d'environ cinq jusqu'à 14 réplifications. En effet, les demi-largeurs continuent de descendre mais le plateau de réduction constant permet de déterminer que les demi-largeurs ont terminé

de descendre drastiquement. Donc, à partir de neuf répliques, les résultats sont fiables. Ainsi, pour cette étude, le nombre de répliques a été déterminé à 10 afin d'assurer la validité des résultats sans toutefois surcharger le nombre de données à traiter.

Ainsi, en résumé, le modèle de simulation doit avoir une période de réchauffement de 2000 heures pour ensuite rouler les 32 expériences à tester pour 10 répliques (320 expériences). La durée de la simulation représente un an ouvrable chez l'entreprise test, soit 240 jours pour un total de 1800 heures.

3.5.5 Validation du modèle

Pour s'assurer de la crédibilité des résultats, il est nécessaire de faire une validation du modèle de simulation. Ces validations permettent de confirmer le fonctionnement du modèle et ainsi éliminer les sources d'erreurs dans les résultats. Les validations ont été faites en comparant les données théoriques, calculées mathématiquement, aux données simulées par le modèle.

3.5.5.1 Validation des paramètres simulés

Lors de la création d'un modèle, trois validations sont nécessaires : la création d'entités, le temps à valeur ajoutée et le taux d'utilisation des ressources.

Selon le livre *Simulation with Arena* de Kelton, Sadowski et Sturrock (2007), il est juste d'utiliser un intervalle de confiance de 95 % pour effectuer les validations d'un modèle de simulation. Cet intervalle permet de s'assurer de la validité du modèle sans pour autant nécessiter un nombre de répliques trop élevé surchargeant le modèle. Les pourcentages d'écart présentés dans le Tableau 3.10 sont presque tous inférieurs à 5 %,

soit la limite tolérée. Toutefois, pour le taux d'utilisation de l'opérateur soudeur (soudeur au préassemblage), l'écart supérieur s'explique parce que les premiers postes de la ligne ont eu le temps de traiter davantage de pièces que la fin de la ligne. Puisque le calcul théorique se base sur le nombre de produits livrés, il est normal de voir un pourcentage supérieur, soit 6 % dans le cas présent. Tous les détails des calculs des résultats de validation présentés au Tableau 3.10 sont à l'Annexe III aux points A3.1, A3.2 et A3.3.

Tableau 3.10 Résultats des validations effectuées

	Théorique	Simulé	% d'écart
Nombre de bennes sortant du système	120	120,7	0,58%
Temps de passage en VA (heures)	58,63	58,39	0,42%
Taux d'utilisation Opérateur	0,455	0,459	1,00%
Taux d'utilisation Opérateur Soudure	0,473	0,502	6,00%
Taux d'utilisation Soudeur	0,827	0,838	1,37%
Taux d'utilisation Installateur	0,718	0,721	0,46%

3.5.5.2 Validation des préalables

Étant donné l'utilité du modèle de simulation, soit de tester l'impact des préalables de l'Industrie 4.0 sur le niveau de performance, il est nécessaire de faire des validations face à l'impact des préalables testés dans le système. Les pourcentages d'écart sont présentés au Tableau 3.11. Chacune des formules utilisées pour simuler les impacts des préalables est détaillée au point A3.4 de l'Annexe III.

Tableau 3.11 Pourcentages d'écart pour la validation des préalables

Préalables et facteurs d'influence	Stratégie d'affaires absente			Stratégie d'affaires présente		
	Valeurs simulées	Valeurs théoriques	% écart	Valeurs simulées	Valeurs théoriques	% écart
1. Lean						
Productivité (T. prod VA)	18,90%	19,28%	1,95%	24,43%	25,00%	2,29%
Qualité (bon)	27,80%	28,04%	0,85%	33,87%	33,40%	1,40%
2. Connaissance						
Productivité (T. prod VA)	4,06%	3,86%	5,20%	4,90%	5,00%	2,01%
Interaction Productivité (1-2)	22,54%	23,13%	2,56%	29,28%	30,00%	2,40%
3. Agilité						
Fréquence des pannes	45,6	46,48	1,89%	54,2	52,5	3,24%
Durées des pannes	0,205	0,202	1,49%	0,038	0,0377	0,80%
4. Accès aux données						
Taux de bonne décision	81,73%	81,57%	0,20%	84,70%	85,00%	0,35%
Durée des pannes	0,4993	0,435	14,78%	0,4089	0,3399	20,30%
Interaction Durée pannes (3-4)	0,1378	0,1164	18,38%	0,0194	0,016998	14,13%

Les pourcentages d'écart faibles permettent d'établir que le modèle réagit tel qu'espéré, ce qui permet de confirmer la validité de la modélisation et de s'assurer de la fiabilité des résultats. La seule valeur qui semble être problématique parce qu'elle est supérieure à 5 % est la durée des pannes. Deux raisons peuvent expliquer ce pourcentage d'écart plus élevé. La première est que la durée des pannes est tellement courte qu'un petit écart occasionne directement un plus grand impact. Donc, même si la différence entre le théorique et la simulation est faible, l'écart est grand en comparaison aux autres facteurs d'influence, même si leur différence est plus élevée. La deuxième raison est que la gestion des pannes dans le modèle de simulation est complètement aléatoire, ce qui cause une grande variabilité à travers la distribution triangulaire liée à la durée des pannes.

CHAPITRE 4 - RÉSULTATS

Ce chapitre présente les résultats obtenus lors de la simulation. Les interactions entre les préalables sont d'abord analysées permettant de présenter le modèle mathématique du plan d'expériences utilisé dans ce mémoire. Ensuite, l'analyse de variance (ANOVA) des résultats est présentée et vise à indiquer quels préalables et quelles interactions sont significatifs par rapport à la performance du système de production simulé.

4.1 Résultats du plan d'expériences

Le modèle de simulation a permis de simuler toutes les expériences du plan complet. Le Tableau 4.1 présente les résultats moyens pour les 32 expériences. Les résultats distincts des 320 expériences sont présentés à l'Annexe IV.

Tableau 4.1 Tableau des résultats moyens obtenus

Exp. #	Temps de fabrication (h)	Temps de passage (h)	Délai de création (h)	Volume de production (bennes)
1	94,16	573,81	576,69	257,7
2	85,65	545,00	546,61	283,4
3	93,63	586,82	589,78	256,1
4	86,06	586,32	587,81	282,8
5	98,42	608,42	611,42	245
6	90,93	543,11	544,60	263,9
7	98,94	595,35	598,42	244,9
8	91,01	546,44	548,00	263,8
9	93,59	574,38	582,97	253
10	86,17	607,97	616,18	277,9
11	93,38	553,93	562,26	249,1
12	85,52	570,56	578,69	272
13	96,66	644,96	653,89	240,2
14	91,23	611,63	619,78	259,2
15	98,98	627,66	635,89	237,5
16	91,80	565,45	573,82	255,3
17	117,39	634,46	637,49	204,2
18	115,52	645,50	647,05	209
19	117,38	629,89	632,82	204,5
20	115,20	657,14	658,62	208,2
21	120,78	610,92	613,93	195,8
22	121,07	655,00	656,53	197,8
23	121,14	649,54	652,35	196,5
24	121,12	697,47	698,95	197,9
25	113,70	656,27	664,53	199,7
26	114,75	626,41	635,06	204,5
27	116,44	668,69	676,80	199,1
28	114,56	671,46	680,08	200,8
29	120,87	638,10	646,29	192,9
30	121,42	682,71	690,79	194,1
31	120,91	639,66	647,98	190,5
32	120,91	639,66	647,98	190,5

En utilisant les résultats obtenus, une analyse visuelle des interactions a été effectuée. Celle-ci a alors permis de développer le modèle mathématique utilisé pour l'ANOVA.

4.1.1 Diagrammes d'interactions

La première étape d'analyse a été de faire sortir les diagrammes d'interactions. Ces quatre diagrammes montrent visuellement la tendance des interactions potentielles entre les variables indépendantes pour les quatre indicateurs de performance. Il y a une interaction potentielle entre les préalables lorsque les lignes, bleues pour indiquer l'absence du préalable (0) et rouges lorsque le préalable est présent (1), ne sont pas parallèles entre elles. Les interactions ciblées visuellement sont encadrées en rouge dans les Figure 4.1, Figure 4.2, Figure 4.3 et Figure 4.4.

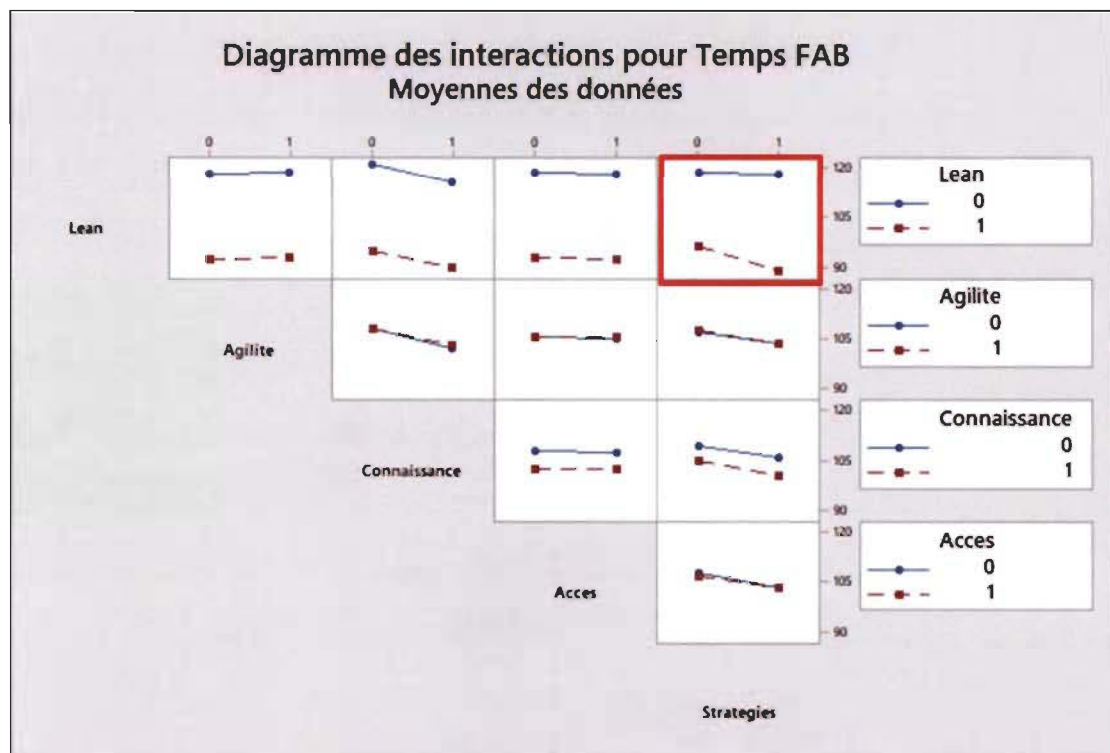


Figure 4.1 Diagramme d'interactions pour le temps de fabrication

Par exemple, pour le diagramme du temps de fabrication ci-dessus (Figure 4.1), il y a une interaction potentielle entre le *Lean* et la stratégie d'affaires parce que les deux lignes ne sont pas parallèles entre elles.

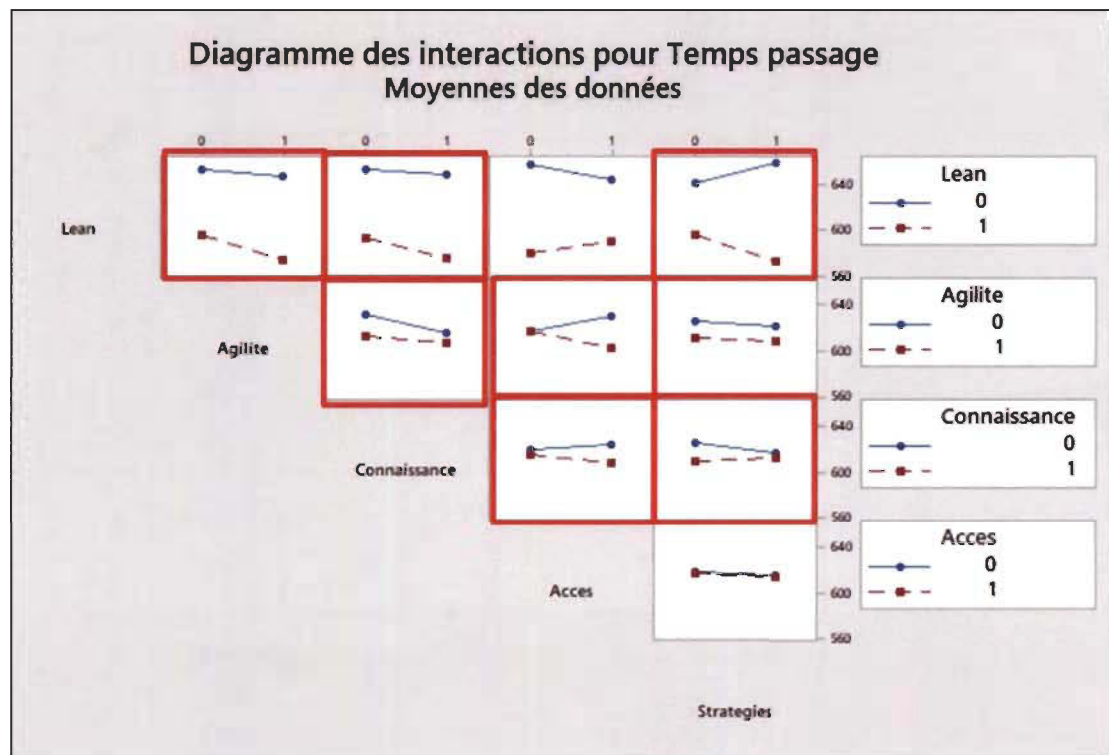


Figure 4.2 Diagramme d'interactions pour le temps de passage

Huit interactions sont ciblées dans les digrammes ci-dessus (encadré rouge). De plus, pour une meilleure étendue des résultats, les quatre interactions entre les préalables et la stratégie d'affaires ont aussi été testées, qu'elles soient ou non identifiées comme potentielles dans les diagrammes. Sachant que la présence d'une stratégie d'affaires a un effet direct sur les gains des autres préalables, il était important de ne pas négliger l'influence générée par la stratégie d'affaires sur les préalables. Donc, les quatre interactions suivantes sont testées :

- *Lean*-Stratégie (BC);
- Agilité-Stratégie (BD);
- Connaissances-Stratégie (AB);
- Accès-Stratégie (BE).

Voici les interactions supplémentaires identifiées à l'aide des encadrés rouges dans les diagrammes d'interactions :

- *Lean*-Agilité (CD);
- *Lean*-Connaissances (AC);
- *Lean*-Accès (CE);
- Agilité-Connaissances (AD);
- Agilité-Accès (DE);
- Connaissances-Accès (AE).

4.1.2 Modèle mathématique

À la suite de l'analyse visuelle des diagrammes, l'équation mathématique qui représente le plan d'expériences peut être déterminée en fonction des interactions ciblées. L'équation utilisée est la suivante :

$$Y_{ijklmn} = \mu + A_i + B_j + C_k + D_l + E_m + AB_{ij} + AC_{ik} + AD_{il} + AE_{im} + BC_{jk} + BD_{jl} + BE_{jm} + CD_{kl} + CE_{km} + DE_{lm} + \varepsilon_{n(ijklm)}$$

Où les variables sont décrites ainsi :

- Y_{ijklmn} : le temps de fabrication, le temps de passage, le délai de création ou le volume de production; indicateurs pour démontrer le gain de performance obtenu par l'activation de préalables;
- μ : la moyenne des réponses mesurées;
- A_i : le niveau i de connaissances et d'expertises;
- B_j : le niveau j de la stratégie d'affaires;
- C_k : le niveau k des principes du *Lean*;
- D_l : le niveau l de l'agilité de production;
- E_m : le niveau m de l'accessibilité aux données;
- AB_{ij} : l'interaction ij de la connaissance et l'expertise et la stratégie d'affaires;
- AC_{ik} : l'interaction ik de la connaissance et l'expertise et des principes du *Lean*;
- AD_{il} : l'interaction il de la connaissance et l'expertise et l'agilité de production;
- AE_{im} : l'interaction im de la connaissance et l'expertise et l'accès aux données;
- BC_{jk} : l'interaction jk de la stratégie d'affaires et les principes du *Lean*;
- BD_{jl} : l'interaction jl de la stratégie d'affaires et l'agilité de production;
- BE_{jm} : l'interaction jm de la stratégie d'affaires et l'accès aux données;
- CD_{kl} : l'interaction kl des principes du *Lean* et l'agilité de production;
- CE_{km} : l'interaction km des principes du *Lean* et de l'accès aux données;
- DE_{lm} : l'interaction lm de l'agilité de production et l'accès aux données;
- $\epsilon_{n(ijklm)}$: l'erreur expérimentale à chaque combinaison de $ijklm$.

4.2 Analyses de variances

La prochaine étape de traitement des données consiste à effectuer les analyses de variances (ANOVA) pour chacune des variables dépendantes reliées à la performance et ce, pour tous les préalables et les interactions. L'intervalle de confiance considéré pour

l'étude est de 95 %. La valeur de p pour le préalable ou l'interaction est donc significative si elle est inférieure à 5 %. Le Tableau 4.2 présente les résultats des p pour toutes les études ANOVA. Tous les résultats ANOVA obtenus à l'aide du logiciel Minitab sont présentés à l'Annexe V. Les données significatives sont identifiées en vert dans le tableau. L'interprétation de ces résultats est présentée au chapitre suivant.

Tableau 4.2 Tableau résumé des ANOVA

Analyses de variances (ANOVA)	Valeur de p (Significatif < 5%)			
	Temps de fabrication (h)	Temps de passage (h)	Délai de création (h)	Volume de production (u.)
Lean (C)	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Agilité (D)	13,3%	13,9%	3,9%	0,0%
Connaissance (A)	0,0%	26,7%	26,8%	0,0%
Accès aux données (E)	35,6%	90,3%	86,1%	0,0%
Stratégie d'affaires (B)	0,0%	78,6%	72,5%	0,0%
Lean-Agilité (CD)	36,3%	39,6%	39,5%	0,8%
Lean-Connaissances (AC)	48,9%	45,8%	41,6%	0,0%
Lean-Accès (CE)	94,4	23,1	22,9	4,3
Lean-Stratégie (BC)	0,0%	3,0%	2,5%	0,0%
Agilité-Connaissance (AD)	21,3%	62,9%	63,0%	31,1%
Agilité-Accès (DE)	48,2%	12,9%	11,4%	0,0%
Agilité-Stratégie (BD)	15,7%	92,3%	98,2%	2,5%
Connaissance-accès (AE)	66,4%	53,0%	53,3%	26,9%
Connaissance-Stratégie (AB)	7,2%	52,4%	48,0%	0,0%
Accès-Stratégie (BE)	24,7%	96,3%	95,6%	6,0%

CHAPITRE 5 - ANALYSE DES RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Ce chapitre expose des analyses plus détaillées des résultats et présente une comparaison des gains obtenus par préalables en fonction des différents indicateurs de performance. En fonction des résultats, les principaux constats de la recherche sont établis. Ensuite, une discussion est réalisée pour présenter une interprétation des résultats ainsi qu'une discussion par rapport à l'atteinte des objectifs, les limites de la recherche est présentée et les perspectives pour le futur.

5.1 Analyse des résultats

Dans cette section, il est question de présenter les différents constats qui peuvent être établis en interprétant les résultats obtenus. Ces constats sont basés sur les analyses de Tukey et d'une étude de comparaison des pourcentages d'amélioration permettant de comparer l'influence des préalables par rapport aux objectifs de l'entreprise.

5.1.1 Observations globales

D'abord, en se référant au Tableau 4.1, il est possible de ressortir les meilleures et les pires résultats par indicateur de performance et de les associer à leur combinaison de préalables en fonction de l'activation (ON) et l'inactivation (OFF) de ceux-ci. Le résumé des résultats présentés au Tableau 5.1 permet d'observer que les meilleurs résultats, peu importe la variable dépendante étudiée, se produisent lorsque la majorité des préalables sont présents, tandis que la pire situation arrive quand l'ensemble des préalables sont absents.

Tableau 5.1 Expériences avec les meilleurs résultats par variables dépendantes

Exp. #	Lean (C)	Agilité (D)	Connaissance (A)	Accès (E)	Stratégie (B)	Temps fabrication (h)	Temps passage (h)	Délai création (h)	Volume production (bennes)
2	Présent	Présent	Présent	Présent	Présent	85,65	545,00	546,61	283,4
6	Présent	Présent	Absent	Présent	Présent	90,93	543,11	544,60	263,9
12	Présent	Absent	Présent	Absent	Présent	85,52	570,56	578,69	272,0
31/32	Absent	Absent	Absent	Absent	Présent/ Absent	120,91	639,66	647,98	190,5

Il est possible de remarquer que l'expérience qui permet l'atteinte du plus haut volume de production correspond à l'expérience #2 où les cinq préalables sont présents. **Il s'agit ici d'un gain au niveau de volume annuel de production de près de 48,8 % (Équation 5.1) par rapport à la situation initiale de l'entreprise et ce, sans l'intégration d'aucune technologie.**

$$\frac{(Valeur\ optimale - valeur\ initiale)}{Valeur\ initiale} = \frac{(283,4 - 190,5)\ bennes}{190,5\ bennes} = 0,488$$

Équation 5.1 Gains potentiels engendrés par les préalables

De façon plus détaillée, pour les trois expériences présentant les meilleurs résultats, les préalables du *Lean* (C) et de la stratégie d'affaires (B) sont toujours présents. Il est donc possible d'en comprendre que ces deux préalables ont un impact positif supérieur sur les résultats que les autres préalables. La présence de ces deux préalables sous-entend possiblement que ces préalables devraient être priorisés lors du processus de préparation au numérique. Cette hypothèse est évaluée davantage dans la section des constats (5.1.4) lorsque toutes les analyses sont mises en commun. Dans la pire situation, l'activation de la stratégie d'affaires (B) n'a pas d'impact sur les résultats puisque ce préalable seul est inutile, tel que démontré dans la simulation. Toutefois, ce préalable sert à structurer les actions, ce qui est un aspect important pour permettre

aux préalables d'atteindre leur plein potentiel et ceci peut s'expliquer par sa présence dans toutes les combinaisons des meilleurs résultats par variables dépendantes.

Pour ce qui est de l'agilité (D) et l'accès aux données (E), ces préalables ont un effet davantage sur le temps de passage et le délai de création. C'est pourquoi il n'est pas surprenant d'observer que ces variables dépendantes obtiennent leur meilleur résultat lorsque ces deux préalables sont présents dans la simulation.

5.1.2 Analyses de Tukey

Il est possible de calculer les gains occasionnés par tous les préalables individuels et pour toutes les interactions ciblées comme potentielles. Le Tableau 5.2 présente les gains potentiels par préalable individuel. Chaque préalable présente des résultats pour les quatre variables dépendantes. Afin de calculer les pourcentages d'amélioration, des tests de Tukey ont été effectués sur Minitab. Les résultats de ceux-ci sont présentés à l'Annexe VI. Tous les pourcentages surlignés en vert représentent les valeurs significatives à la suite des analyses de variances (ANOVA) présentées au Tableau 4.2.

Tableau 5.2 Résumé des gains en pourcentages pour chacun des préalables indépendamment

Études des gains significatifs		Temps de fabrication (h)	Temps de passage (h)	Délai de réaction (h)	Volume de production (u.)
Lean (C)	Absent	118,32	649,90	655,45	199,13
	Présent	92,26	583,58	598,17	258,86
	%	22,0%	10,2%	8,7%	30,0%
Agilité (D)	Absent	105,05	623,72	632,06	226,02
	Présent	105,53	609,76	612,59	231,97
	%	-0,4%	2,2%	3,1%	2,6%
Connaissance (A)	Absent	107,89	621,97	627,53	222,86
	Présent	102,70	611,51	617,09	235,13
	%	4,8%	1,7%	1,7%	5,5%
Accès aux données (E)	Absent	105,44	617,32	623,14	228,09
	Présent	105,15	616,17	621,49	229,89
	%	0,3%	0,2%	0,3%	0,8%
Stratégie d'affaires (B)	Absent	107,27	618,02	623,97	222,92
	Présent	103,31	615,46	620,66	235,07
	%	3,7%	0,4%	0,5%	5,5%

La formule utilisée pour le pourcentage d'écart est la suivante :

$$\% \text{ écart} = \frac{(\text{valeur initiale (OFF)} - \text{valeur testées (ON)})}{\text{valeur initiale (OFF)}} * 100$$

Équation 5.2 Calcul du pourcentage d'écart

Par exemple, pour le *Lean* (C) en fonction du temps de fabrication :

$$\% \text{ écart (Lean)} = \frac{(118,32 - 92,26)}{118,32} * 100 = 22,0 \%$$

Équation 5.3 Exemple d'un calcul du pourcentage d'écart pour le *Lean*

Il y a deux résultats marquants dans ce tableau. Premièrement, *Lean* (C) est le seul préalable significatif, peu importe l'indicateur de performance étudiée. Deuxièmement,

parmi les cinq préalables étudiés, il y a seulement l'accès aux données (E) qui est significatif pour une seule variable dépendante (volume de production). Cela s'explique principalement à la réalité de l'entreprise test. Dans l'entreprise, il y a des défis importants au niveau de la productivité des opérations de production. Il est donc logique que les principes du *Lean* permettent d'améliorer globalement les résultats et ce, peu importe la variable dépendante. Deuxièmement, les résultats démontrent que l'accessibilité des données est une moins grande problématique actuellement pour l'entreprise.

La variable dépendante du volume de production est significative, peu importe le préalable concerné. Tel qu'expliqué lors de la sélection des variables dépendantes, les résultats démontrent que le volume de production regroupe l'ensemble des effets générés par les autres indicateurs pour ainsi présenter des résultats plus globaux de l'impact des préalables sur le système. Il y a toutefois une disparité marquante à ne pas négliger entre les préalables et les variables dépendantes. Les variables dépendantes ne réagissent pas de la même manière à tous les préalables. Le *Lean* (C) et la connaissance (A) ont un impact direct sur la production. Ils sont toujours significatifs pour le temps de fabrication. Cependant, l'agilité (D) et l'accès aux données (E) ne sont pas significatifs pour ce même indicateur. L'impact de ceux-ci est davantage relié au délai de réaction de l'entreprise face à une perturbation, ce qui cause un effet plus global et moins ciblé sur la productivité du système.

Ensuite, les combinaisons de tous les préalables liés à une stratégie d'affaires (B) ont été étudiées. Ces interactions ne sont pas considérées significatives dans la majorité des cas des variables dépendantes étudiées. Toutefois, 75 % des interactions sont significatives pour l'indicateur global du volume de production (Tableau 4.2). Il y a seulement la combinaison de l'Accès aux données – Stratégie d'affaires (BE) qui n'est pas significative, ce qui est surprenant considérant que sans une stratégie d'affaires (B) mise en place, les

gains des préalables sont limités à 77,1 % d'amélioration. Cela étant dit, la stratégie d'affaires (B) devrait toujours avoir un impact sur les autres préalables. Ces tests de Tukey permettent de mieux démontrer l'effet de la stratégie d'affaires sur le système. Dans le Tableau 5.2, la stratégie d'affaires présente à elle seule un gain d'amélioration de 5,5 % pour le volume de production, mais en comparant avec les pires résultats du Tableau 5.1, soit les expériences #31 et #32, il est possible de conclure que la présence de la stratégie seule n'a aucun impact. Donc, ce gain de 5,5 % provient de l'effet des autres préalables présents lorsque la stratégie est mise en place et non de la présence unique de la stratégie d'affaires. Les résultats de ces quatre interactions sont présentés au Tableau 5.3. Encore une fois, les pourcentages d'amélioration identifiés en vert dans le tableau représentent les interactions qui sont significatives lors des analyses de variances (Tableau 4.2).

Tableau 5.3 Résumé des gains en pourcentages pour chacun des préalables combinés à la stratégie d'affaires

	Stratégie d'affaires absente			Stratégie d'affaires présente	
Principes du LEAN (BC)					
Variables dépendantes	Lean absent	Lean présent	% Amélioration	Lean présent	% Amélioration
Temps de fabrication (h)	118,58	95,97	19,1%	88,55	25,3%
Temps de passage (h)	640,94	595,10	7,2%	572,06	10,7%
Délai de création (h)	646,33	601,41	6,9%	576,94	10,7%
Volume de production (u.)	197,90	247,94	25,3%	269,79	36,3%
Agilité de production (BD)					
Variables dépendantes	Agilité absente	Agilité présente	% Amélioration	Agilité présente	% Amélioration
Temps de fabrication (h)	106,82	107,73	-0,9%	103,32	3,3%
Temps de passage (h)	625,46	610,59	2,4%	608,94	2,6%
Délai de création (h)	633,83	614,11	3,1%	611,02	3,6%
Volume de production (u.)	220,25	225,59	2,4%	238,35	8,2%
Connaissances (AB)					
Variables dépendantes	Connaissance absente	Connaissance présente	% Amélioration	Connaissance présente	% Amélioration
Temps de fabrication (h)	109,59	104,96	4,2%	100,43	8,4%
Temps de passage (h)	626,26	609,78	2,6%	613,23	2,1%
Délai de création (h)	632,52	615,42	2,7%	618,77	2,2%
Volume de production (u.)	217,91	227,93	4,6%	242,33	11,2%
Accès aux données (BE)					
Variables dépendantes	Accès absent	Accès présent	% Amélioration	Accès présent	% Amélioration
Temps de fabrication (h)	107,60	106,95	0,6%	103,35	4,0%
Temps de passage (h)	618,38	617,67	0,1%	614,67	0,6%
Délai de création (h)	624,54	623,40	0,2%	619,57	0,8%
Volume de production (u.)	222,28	223,56	0,6%	236,23	6,3%

Ces résultats permettent de voir en pourcentage le gain que chacun des préalables apporte par rapport à chacune des variables dépendantes en considérant le niveau associé à la stratégie d'affaires. La première observation est qu'en comparant ces résultats avec l'analyse des préalables individuels, les combinaisons étudiées sont moins souvent significatives. Donc, il n'y a pas réellement une interdépendance significative

entre les préalables et la stratégie d'affaires. Cette observation confirme les analyses visuelles des diagrammes d'interaction (Figure 4.1, Figure 4.2, Figure 4.3 et Figure 4.4) où seulement les interactions du *Lean* et de la connaissance avec la stratégie d'affaires semblaient être significatives. Il était toutefois intéressant de tester ces quatre interactions dues à la méthode de modélisation de la stratégie d'affaires dans le modèle de simulation. De plus, l'Agilité-Stratégie (BD) obtient un pourcentage d'amélioration significatif de 8,2 % pour le volume de production, il s'agit ainsi d'un résultat supplémentaire grâce à l'analyse des interactions. Le Tableau 5.4 présente l'augmentation des pourcentages d'amélioration du système entre le préalable seul et lors de la présence d'une stratégie d'affaires.

Tableau 5.4 Pourcentages d'augmentation avec la stratégie d'affaires

% d'augmentation par la Stratégie d'affaires (B)	LEAN (C)	Agilité (D)	Connaissance (A)	Accès aux données (E)
Temps de fabrication (h)	6,3%	4,1%	4,1%	3,3%
Temps de passage (h)	3,6%	0,3%	-0,6%	0,5%
Délai de création (h)	3,8%	0,5%	-0,5%	0,6%
Volume de production (u.)	11,0%	5,8%	6,6%	5,7%

La stratégie d'affaires permet, dans la majorité des cas, d'augmenter le pourcentage d'amélioration. Cette affirmation est fautive dans un seul cas, soit lorsque la variable dépendante n'est pas affectée par le gain offert par le préalable. Il s'agit des variables du temps de passage et du délai de création pour le préalable de connaissance (A), puisque ces deux variables dépendantes ne subissent pas un gain significatif par rapport à ce préalable. N'ayant pas de gains significatifs face aux résultats, ces interactions ne subissent pas l'effet d'augmentation apporté par la stratégie d'affaires.

Toutefois, globalement, il est possible de remarquer une tendance : les variables dépendantes ne réagissent pas toutes de la même manière à l'impact de la stratégie d'affaires (B). Les indicateurs du temps de passage et du délai de création présentent toujours de plus petits gains. La stratégie d'affaires a donc moins d'impact sur ces indicateurs que sur le temps de fabrication et le volume de production. De plus, pour toutes les variables dépendantes, le gain généré par la stratégie d'affaires est toujours plus important pour le volume de production. Cela s'explique par le fait que l'indicateur du volume de production bénéficie des gains combinés liés à l'effet de toutes les variables dépendantes. Donc, si les trois indicateurs réagissent positivement aux préalables et que ceux-ci améliorent automatiquement le volume de production, il est attendu que le volume de production obtienne des gains supérieurs dus à l'effet combiné des gains.

En se référant à l'indicateur du volume de production, il est possible de remarquer que pour les deux analyses précédentes, les principes du *Lean* (C) ont le plus grand effet sur l'amélioration du système, que ce soit avec (36,3 %) ou sans l'activation de la stratégie d'affaires (30 %). Ces pourcentages élevés indiquent que le *Lean* devrait être priorisé par l'entreprise test afin d'aller chercher des gains importants sur sa productivité. Ce constat sera expliqué en détail dans la sous-section des constats (5.1.4.1).

5.1.2.1 Interaction entre les préalables

Les résultats des analyses de variances permettent de remarquer qu'il y a peu d'interactions significatives entre les préalables, excluant la stratégie d'affaires (B). Le Tableau 4.2 présenté au chapitre précédent permet de voir que les valeurs de p sont rarement inférieures à 5 % pour les interactions étudiées et ce, malgré les nombreuses interactions potentielles ciblées dans les diagrammes d'interactions (Figure 4.4).

Les interactions étudiées deux à deux entre les quatre préalables sont uniquement significatives pour la variable du volume de production, excluant les combinaisons d'Agilité-Connaissance (AD) et Connaissance-Accès (AE). Le volume de production étant l'indicateur global, il est normal que ce soit cette variable qui est significative pour les interactions. Pour ce qui est des deux interactions non significatives, c'est sans surprise puisque premièrement, l'effet avantageux généré par l'agilité ou l'accès aux données (E) n'est pas du tout relié au gain de productivité de la connaissance (A) et deuxièmement, tous ces préalables apportent les gains les plus faibles du système, donc leurs combinaisons ne sont pas plus importantes en gains.

Pour toutes les interactions significatives, une étude supplémentaire a été effectuée. Afin d'élargir l'étendue de l'analyse des interactions, toutes les interactions avec un p inférieur à 15 % dans l'analyse de variances sont aussi considérées. Seulement une interaction obtient des résultats inférieurs à 15 %. Il s'agit de la combinaison Agilité-Accès (DE) pour le temps de passage (12,9 %) et le délai de création (11,4 %). Ces résultats s'expliquent parce que l'effet de l'agilité (D) et de l'accès aux données (E) ont d'avantage un effet global sur l'entreprise, soit dès l'entrée de la commande dans le carnet de commandes. Ces faibles pourcentages portent à croire que ces deux préalables ont une interaction entre eux. Cette interaction potentielle est logique puisque ces deux préalables ont un effet sur la durée des perturbations rencontrées par le système. Le Tableau 5.5 présente les résultats des tests de Tukey pour les cinq interactions ciblées en fonction de leur variable dépendante. Comme précédemment, les pourcentages surlignés en vert représentent ceux qui sont significatifs dans l'étude ANOVA.

Tableau 5.5 Résumé des gains en pourcentages pour les interactions significatives

Temps passage (h)	Agilité- Accès aux données (DE)							
	Agilité (D)	Absent	Absent	%	Présent	%	Présent	%
	Accès (E)	Absent	Présent	d'amélioration	Absent	d'amélioration	Présent	d'amélioration
		617,13	630,30	-2,1%	617,50	-0,1%	602,03	2,4%
Délai de création (h)	Agilité- Accès aux données (DE)							
	Agilité (D)	Absent	Absent	%	Présent	%	Présent	%
	Accès (E)	Absent	Présent	d'amélioration	Absent	d'amélioration	Présent	d'amélioration
		625,44	638,69		620,84	0,7%	604,28	3,4%
Volume de production (Benches)	LEAN-Agilité (CD)							
	Lean (C)	Absent	Absent	%	Présent	%	Présent	%
	Agilité (D)	Absent	Présent	d'amélioration	Absent	d'amélioration	Présent	d'amélioration
		196,51	201,74	2,7%	255,53	30,0%	262,20	33,4%
	LEAN-Connaissances (AC)							
	Lean (C)	Absent	Absent	%	Présent	%	Présent	%
	Connaissance (A)	Absent	Présent	d'amélioration	Absent	d'amélioration	Présent	d'amélioration
		194,50	203,75	4,8%	251,23	29,2%	266,50	37,0%
	LEAN-Accès aux données (CE)							
	Lean (C)	Absent	Absent	%	Présent	%	Présent	%
	Accès (E)	Absent	Présent	d'amélioration	Absent	d'amélioration	Présent	d'amélioration
		198,50	199,75	0,6%	257,69	29,8%	260,04	31,0%
	Agilité- Accès aux données (DE)							
	Agilité (D)	Absent	Absent	%	Présent	%	Présent	%
	Accès (E)	Absent	Présent	d'amélioration	Absent	d'amélioration	Présent	d'amélioration
		224,35	227,69	1,5%	231,84	3,3%	232,1	3,5%

Les interactions incluant les principes du *Lean* (C) offrent toujours un pourcentage d'amélioration supérieur aux autres combinaisons. Cela permet de renforcer la tendance observée dans les études précédentes où le *Lean* génère toujours un gain plus important et qui devrait par le fait même être introduit en premier dans une entreprise. Pour ce qui est de l'interaction Agilité-Accès, celle-ci génère des pourcentages d'amélioration plutôt faibles contrairement aux autres gains pouvant être apportés par d'autres combinaisons, ce qui peut expliquer pourquoi cette interaction n'était pas significative dans l'ANOVA bien que les deux préalables aient un effet sur les perturbations.

5.1.3 Comparaison des gains

À la suite de ces analyses, il est possible de comparer quantitativement les gains générés par les préalables et les interactions étudiées. Ces études de comparaison sont

effectuées afin de classer en priorité les préalables à mettre en place en fonction des différents objectifs qu'une entreprise peut vouloir atteindre, par exemple l'augmentation de son volume de production annuel. Ce classement a été fait pour les quatre variables dépendantes afin de représenter les différents chemins à prendre en fonction de la problématique ciblée par l'entreprise.

5.1.3.1 Volume de production

Sachant que tous les préalables sont significatifs sur la variable dépendante du volume de production, cette première comparaison présente le plus grand nombre d'actions classées selon leur pourcentage d'amélioration. Tout d'abord, le Tableau 5.6 présente que tout ce qui implique les principes du *Lean* se retrouve dans le haut du tableau dû aux grands gains générés par celui-ci. Le *Lean* à lui seul génère un gain de 30 % d'amélioration du système.

Tableau 5.6 Liste des gains pour le volume de production

Niveau de gain	Gains (%)	Mise en place de préalables
> 30 %	37,0%	Lean et connaissances
	36,3%	Lean et Stratégie d'affaires
	33,4%	Lean et agilité
	31,0%	Lean et Accès aux données
	30,0%	Lean
< 20 %	11,2%	Connaissance et Stratégie d'affaires
< 10 %	8,2%	Agilité et Stratégie d'affaires
	6,3%	Accès aux données et Stratégie d'affaires
	5,5%	Connaissance et expertise
< 5 %	3,5%	Agilité et Accès aux données
	2,6%	Agilité
	0,8%	Accès aux données

Grâce à ce tableau récapitulatif, il est possible de mettre un ordre de priorité dans les préalables pour les entreprises qui tentent d'augmenter la productivité générale du système par la capacité de production. L'ordre proposé est le suivant :

- 1) les principes du *Lean* (C);
- 2) la connaissance et l'expertise (A);
- 3) l'agilité de production (D);
- 4) l'accès aux données (E).

Pour ce qui est de la stratégie d'affaires (B), son emplacement peut être discuté. Normalement, celle-ci devrait être mise en place le plus rapidement possible parce qu'une stratégie sert à orienter les actions à prendre afin de préparer le terrain à l'ère du numérique. De plus, tel que mentionné par plusieurs auteurs, avoir une stratégie d'affaires a un impact très positif sur les gains et le succès d'une entreprise (De Carolis et al., 2017; Gamache et al., 2019). Toutefois, les résultats indiquent clairement qu'une entreprise qui introduit tout d'abord les principes du *Lean* peut aller chercher un pourcentage d'amélioration significatif. Selon les résultats, la deuxième étape permettant d'aller chercher un gain supplémentaire d'environ 7 % est la mise en place d'un programme de formation afin d'augmenter les connaissances et les expertises des employés à l'interne. À long terme, la stratégie d'affaires sera nécessaire pour orienter les décisions futures et assurer une cohérence pour continuer de préparer les entreprises à leur transformation numérique. Cependant, en se basant sur les résultats obtenus, l'entreprise devrait tout d'abord se concentrer sur les principes du *Lean* si elle désire aller chercher un impact concret au niveau de sa performance. Les bienfaits d'un tel choix sont expliqués en détail dans la section suivante.

En voyant les résultats, il était possible de faire une étude supplémentaire pour tester l'interaction globale de *Lean*-Connaissance-Stratégie (ABC). En suivant la tendance des

améliorations, cette combinaison devrait apporter le plus grand gain. La Figure 5.1 présente les résultats obtenus dans Minitab pour un test de Tukey. Cette interaction est significative selon l'analyse de variances.

Comparaisons deux à deux de Tukey : réponse = Volume prod, terme = Lean*Connaissance*Stratégi				
Informations de groupement avec la méthode de Tukey et un niveau de confiance de 95 %				
Lean*Connaissance*Stratégies	N	Moyenne	Groupement	
1 1 1	40	279,025	A	
1 0 1	40	260,550	B	
1 1 0	40	253,975	C	
1 0 0	40	241,900	D	
0 1 1	40	205,625	E	
0 1 0	40	201,875	F	
0 0 1	40	195,075	G	
0 0 0	40	193,925	G	

Figure 5.1 Test de Tukey pour l'interaction *Lean*-Connaissance-Stratégie (ABC)

En comparant la situation où les trois préalables sont absents à la situation où les trois préalables sont présents, il est possible de calculer le gain de cette interaction, à l'aide de la formule suivante (Équation 5.4) :

$$\frac{|Valeurs\ OFF - Valeurs\ ON|}{Valeurs\ OFF} * 100$$

$$\frac{|193,925 - 279,025|}{193,925} * 100 = 43,9 \%$$

Équation 5.4 Pourcentage d'amélioration obtenu par la combinaison *Lean*-Connaissance-Stratégie

Cette combinaison triple permet en fait d'obtenir le plus haut gain au niveau du volume de production, soit 43,9 %. De plus, l'avantage de cette combinaison est qu'elle peut être faite en parallèle puisque le *Lean* touche davantage les processus de la production, alors que la connaissance des employés touche l'aspect humain et la stratégie d'affaires influence les priorités de projets, ainsi celle-ci touche plus la structure décisionnelle de l'entreprise. Donc, les trois préalables ensemble offrent une bonne étendue de gains

pour l'entreprise. Les principes du *Lean* devraient tout de même être les premiers à être introduits malgré la phase en parallèle parce que le *Lean* aura un impact positif sur la culture de l'entreprise et donc sur l'aspect humain et organisationnel.

5.1.3.2 Temps de fabrication

Pour une entreprise qui vise davantage à améliorer ses activités de production, soit réduire son temps de fabrication, elle doit se concentrer sur les résultats qui reflètent la productivité et l'efficacité de la ligne de production directement. L'atteinte de cet objectif aura un impact sur le volume de production à long terme. Les gains des préalables et des interactions présentés au Tableau 5.7 ne sont pas tous significatifs dans l'analyse de variances, mais tous ceux avec un gain calculé durant l'analyse ont été inclus pour l'analyse de comparaison, par exemple Accès-Stratégie (4 %).

Tableau 5.7 Liste des gains pour le temps de fabrication

Niveau de gain	Gains (%)	Mise en place de préalables
< 30 %	25,3%	Lean et Stratégie d'affaires
	22,0%	Lean
< 10 %	8,4%	Connaissance et Stratégie d'affaires
< 5 %	4,8%	Connaissance
	4,0%	Accès aux données et Stratégie d'affaires
	3,3%	Agilité et Stratégie d'affaires

En analysant les résultats du Tableau 5.7, il est possible de trier en ordre de priorités les actions à implanter dans l'entreprise.

- 1) les principes du *Lean* (C);
- 2) la connaissance et l'expertise (A);

- 3) l'accès aux données (E);
- 4) l'agilité de production (D).

Tout comme le volume de production, le *Lean* (C) et la connaissance (A) sont à considérer en premier lieu pour le temps de fabrication des produits. Toutefois, la stratégie d'affaires (B) semble être importante plus rapidement, bien que l'interaction *Lean*-Connaissance (AC) n'est pas considérée ici due à son pourcentage élevé dans l'AVONA ($p = 48,9 \%$). En effectuant un calcul des deux préalables seuls ($22 \% + 4,8 \%$), le gain potentiel est de $26,8 \%$, soit supérieur à *Lean*-Stratégie (BC). Donc, la même conclusion que pour le volume de production se pose, soit le *Lean* en premier, la connaissance en deuxième et la stratégie en troisième.

Toutefois, contrairement à l'étude de comparaison du volume de production, l'accès aux données (E) offre au temps de fabrication des gains supérieurs que l'agilité (D). Donc, une entreprise voulant se concentrer sur son temps de production devrait mettre en place l'accès à ses données en quatrième et ainsi aller améliorer ses prises de décisions pour réduire le temps de réaction face à une perturbation.

5.1.3.3 Temps de passage et délai de création

Pour ce qui est des variables dépendantes du temps de passage et du délai de création, ces deux variables offrent des gains similaires et un classement de priorités identique, en plus de réagir d'une façon différente aux deux indicateurs étudiés précédemment. Une entreprise qui cherche à réduire son délai de création et, par le fait même, le temps de passage de son carnet de commandes, devrait se fier au classement obtenu avec les résultats du Tableau 5.8.

Tableau 5.8 Liste des gains pour le temps de passage et délai de création

Niveau de gain	Temps de passage (%)	Délai de création (%)	Mise en place de préalables
< 20 %	10,7%	10,7%	Lean et Stratégie d'affaires
	10,2%	-	Lean
< 10 %	-	8,7%	Lean
< 5 %	2,6%	3,6%	Agilité et Stratégie d'affaires
	2,4%	3,4%	Agilité et Accès aux données
	2,2%	3,1%	Agilité
	2,1%	2,2%	Connaissance et Stratégie d'affaires
	-	1,7%	Connaissance

Les principes du *Lean* apportent encore les gains les plus importants, mais cette fois-ci, la suite des implantations diffère. Les résultats présentés dans le tableau ci-dessus suivent le même ordre d'importance d'implantation pour les deux variables :

- 1) les principes du *Lean* (C);
- 2) l'agilité de production (D);
- 3) l'accès aux données (E);
- 4) La connaissance et l'expertise (A).

La différence première est le décalage de l'importance de la connaissance (A), qui se retrouve au dernier rang pour ces variables dépendantes. Les résultats indiquent que l'agilité (D) offre des gains d'amélioration plus importante sur ces deux indicateurs de performance. Ces meilleurs gains permettent d'établir que l'agilité devrait être introduite en deuxième. Les résultats de l'accès aux données (E) indiquent aussi que ce préalable devrait être introduit plus tôt au sein de l'entreprise. Effectivement, ces deux préalables ont d'avantage un effet sur le temps global du produit, principalement dû à la réduction du temps de conception des commandes. Pour ce qui est du

positionnement de la stratégie d'affaires (B), il est aussi nécessaire de calculer approximativement l'interaction non significative ($p = 39,5 \%$) de *Lean-Agilité* (CD) en combinant les gains individuels selon le délai de création ($8,7 \% + 3,1 \%$) et selon le temps de passage ($10,2 \% + 2,2 \%$). Cette interaction offre des gains potentiels de $11,8 \%$ ou $12,4 \%$, soit tous deux supérieurs à *Lean-Stratégie* (BC). La stratégie d'affaires devrait être introduite autour de la troisième étape du plan de préparation au numérique.

5.1.4 Présentation des constats de la recherche

En analysant globalement les résultats présentés précédemment, il y a différents constats qui méritent d'être soulignés. Cette section présente en détail ces observations afin de poser des conclusions sur les actions à prendre dans le but de préparer son entreprise à la transformation numérique.

5.1.4.1 Constat #1 : prioriser les principes du *Lean*

Le premier constat présent au niveau de tous les résultats est que les principes du *Lean* (C) doivent être priorisés. Cette conclusion provient du fait que ce préalable est significatif pour toutes les variables dépendantes et offre des gains supérieurs à 20% sur le système de production dans la majorité des cas dès qu'il est impliqué. Pour ces raisons, le *Lean* est considéré comme le préalable le plus influent de l'étude pour préparer une entreprise à sa transformation numérique. Il doit être priorisé dès la première étape et ce, peu importe la problématique ou l'objectif de l'entreprise. Dans le contexte de la recherche, il est important de rappeler que cette première étape se situe dans la phase de préparation de l'échelle numérique. La PME qui est encouragée à prioriser le *Lean* n'a pas encore franchi le point de transition vers la phase d'implantation de cette échelle.

Ce choix est logique parce que les principes du *Lean* sont des techniques éprouvées et qui permettent d'apporter au sein de l'entreprise des gains rapides et à faibles coûts (Larman & Vodde, 2009). Une entreprise qui entame sa transformation vers l'Industrie 4.0 doit être la plus performante possible dans ses actions et processus, avant même de parler de technologies. Il est important pour les entreprises de ne pas se perdre dans les possibilités de productivité, les technologies semblent attirantes, mais elles ne sont pas nécessairement le bon choix au début, même si dans certains cas elles peuvent l'être. Toutefois, dans l'analyse actuelle, l'entreprise test ne devrait pas se concentrer sur les technologies potentielles. Les entreprises doivent stabiliser et optimiser leur système de production et le *Lean* semble être la méthode à favoriser. En allant chercher les gains du *Lean*, soit des gains significatifs à la performance de l'entreprise, celle-ci se rapproche d'un état « prêt » selon les préalables nécessaires pour l'Industrie 4.0.

En plus des gains estimés, le *Lean* apporte beaucoup plus à l'entreprise. En implantant le *Lean*, les entreprises intègrent par le fait même une culture d'amélioration continue. Cette culture pousse ainsi les employés à s'améliorer continuellement en éliminant le plus de gaspillages possibles dans leurs méthodes et leur environnement de travail (Čiarnienė & Vienažindienė, 2012). Cette culture favorisant la valeur ajoutée des tâches est un point fort d'une entreprise qui a à cœur sa réussite. De plus, les objectifs du *Lean* apportent par le fait même une nouvelle structure au sein de l'entreprise. Par exemple, en structurant leur flux d'informations et leur gestion des stocks, l'entreprise élimine des actions inutiles. L'introduction des principes du *Lean* s'appliquent aussi à grande échelle dans l'entreprise, ce qui obligatoirement entraîne des changements au niveau administratif. Ceux-ci permettent un ajustement dans l'attitude des parties prenantes face aux changements et cela permet une meilleure structure pour l'entreprise en transformation (Čiarnienė et Vienažindienė, 2012). Ces deux aspects supplémentaires liés au *Lean* sont des points forts pour aider l'entreprise dans sa transformation.

Ces résultats sont en accord avec la littérature. Premièrement, il est mentionné qu'une entreprise qui a implanté les principes du *Lean* est plus propice à adhérer à la transformation de l'Industrie 4.0 (Tortorella et Fettermann, 2018; Von Haartman et al., 2016), ce qui est encourageant pour les succès futurs des PMEM sur les marchés compétitifs. Deuxièmement, une entreprise qui a mis en place le *Lean* peut aller chercher des gains supérieurs lors de sa transformation numérique, environ 14 % (Gamache et al., 2019). Ces deux points rapportés par les chercheurs, en plus du fait que les principes du *Lean* sont appelés de façon populaire à titre de préalables à l'Industrie 4.0 dans la littérature, permettent de renforcer le constat ressorti lors de cette recherche.

5.1.4.2 Constat #2 : une stratégie d'affaires idéalisée

Dans la littérature, il y a un point critique qui revient souvent dans le discours des chercheurs, soit qu'avoir une stratégie d'affaires favorise la transformation numérique (Ghobakhloo et Ching, 2019; Vrchota et al., 2019). Cette recherche permet de conclure deux constats par rapport à l'importance d'une stratégie d'affaires.

Premièrement, malgré qu'il soit prôné dans la littérature que d'avoir une stratégie d'affaires est essentielle, cette recherche présente que même **sans l'utilisation d'une stratégie d'affaires, une entreprise peut aller chercher des gains**. Ces gains peuvent provenir autant grâce au *Lean*, à la connaissance ou à l'agilité. Cela étant dit, les résultats de cette recherche semblent démontrer que la stratégie d'affaires ne devrait pas être le premier préalable qu'une entreprise devrait mettre en place en vue de se préparer à la transformation numérique. En 2020, le ministère de l'Économie et de l'Innovation (MEI) du Québec a incité les entreprises à entreprendre le virage de l'Industrie 4.0 (Investissement Québec, 2020). Pour les aider, le ministère a mis en place un programme d'Audit 4.0 qui sert à faire un diagnostic des entreprises afin de leur offrir

une démarche numérique structurée. Une des conditions préalables à ce programme est la mise en place d'une planification stratégique, mais selon les résultats de ce mémoire, ce ne serait pas la première étape à mettre en place.

Deuxièmement, en complément au premier constat, l'étude présente qu'une stratégie d'affaires seule n'apporte aucun gain. Il est important de ne pas mal interpréter le gain de 5,5 % présenté au Tableau 5.2, parce que la réalité de ce constat s'observe avec les résultats des expériences #31 et #32 où la seule différence est la présence d'une stratégie d'affaires au sein de l'entreprise test. Les résultats de ces deux expériences sont identiques parce que **la présence seule d'une stratégie d'affaires n'augmente pas la performance**. Donc, une stratégie d'affaires seule ne devrait pas être intégrée au début du processus de préparation. Bien sûr, tel que mentionné dans la littérature, une stratégie d'affaires apporte une structure et un soutien aux autres actions, mais pour obtenir le gain de cette structure, l'entreprise doit être prête à introduire d'autres outils, sinon l'effort investi dans la mise en place d'une stratégie est inutile. Une entreprise devrait vouloir aller chercher des gains encourageants et ensuite aller maximiser le potentiel de ses actions en intégrant une stratégie d'affaires pour la suite des étapes. Ainsi, si la stratégie d'affaires est implantée en premier dans la phase de préparation, **celle-ci devrait être rapidement accompagnée d'actions concrètes**.

5.1.4.3 Constat #3 : cibler l'avantage concurrentiel

Une des surprises de l'étude est les résultats associés à l'importance de l'agilité à titre de préalable. Les analyses démontrent une faible influence de l'agilité envers les indicateurs de performance de l'Industrie 4.0. Ces résultats peuvent s'expliquer grâce à la réalité de production de l'entreprise test, ce qui permet un constat important par rapport à la préparation au numérique.

Dans une situation où il y a peu de perturbations, l'implantation d'outils d'agilité n'est pas aussi importante. Par exemple, l'entreprise test de cette étude possède un long temps de cycle, des produits plutôt standards et une faible quantité de perturbations. L'étude réduit de moitié les arrêts de quelques minutes par jour sur un temps de cycle de plusieurs jours. Dans ce contexte, une réduction de peu de perturbations sur un long temps de cycle n'est pas significative puisque l'impact généré est minime sur le système. Ce préalable augmenterait en importance dans une situation où la production contiendrait un haut niveau de variabilité et un temps de cycle court parce que dans une situation où les produits sont déjà standards et prennent un temps de fabrication similaire, il n'y a pas beaucoup de gains à aller chercher avec ce préalable.

Tel que mentionné précédemment, être agile permet de répondre à la demande de personnalisation de masse des clients. Toutefois, il ne s'agit pas toujours du préalable le plus important. Dans un objectif de préparation au numérique, il est important d'avoir une approche holistique au niveau des préalables de l'Industrie 4.0. Sachant que l'Industrie 4.0 offre des avantages concurrentiels, **il est important que l'entreprise en transformation cible l'avantage concurrentiel sur lequel elle veut miser à titre d'organisation**. En fonction de cet objectif, le classement de priorité des préalables peut varier. Tel que démontré dans la comparaison des gains (Section 5.1.3), **l'ordre d'implantation varie en fonction des priorités des gains recherchés par l'entreprise**. Ainsi, dans la situation étudiée, l'agilité ne fait pas partie des avantages visés. Il n'est donc pas nécessaire de la mettre en place à court terme. Il est possible de conclure qu'il ne s'agit pas du levier le plus compatible au besoin de l'entreprise à un moment précis. Cependant, puisque la littérature mentionne l'agilité à titre de préalable, ce levier prendra probablement de l'importance dans le futur de la préparation pour l'entreprise test.

5.1.4.4 Constat #4 : priorité structure, technologies ensuite

Les conclusions liées à l'accès aux données ne semblent pas concluantes selon les résultats de cette étude. Souvent, ce préalable n'est pas significatif et apporte très peu de gains sur le système. Toutefois, les technologies de l'Industrie 4.0 apportent beaucoup de données et les PME doivent être en mesure de les traiter. Cela confirme que sous un angle 4.0, le préalable de l'accès aux données est essentiel. Cependant, sans structure de base dans l'entreprise, il n'est pas nécessaire de tenter d'avoir accès à toutes ses données tout de suite. Si l'entreprise n'est pas prête à utiliser ses données pour faciliter ses prises de décisions, cela ne sert à rien d'y avoir accès. Dans l'étude réalisée, l'entreprise test ne démontre pas avoir mis en place une structure et c'est pourquoi les principes du *Lean* sont importants et que l'accès aux données a peu d'influence.

Ce résultat permet donc de séparer en deux phases la période de préparation au numérique. Il y a la phase préliminaire où les grands gains et l'intégration d'une structure entrent en ligne de compte et la phase plus secondaire qui fait le parallèle avec les besoins des technologies. Tel que mentionné par les auteurs plus axés vers la technologie, il y a des préalables nécessaires à la préparation de l'arrivée des technologies (Pacchini et al., 2019; Samaranayake et al., 2017). L'accès aux données entre en action sous cette deuxième phase. De plus, il est important pour les entreprises que l'intégration d'une telle gestion des données soit supportée et accomplie de la bonne façon. Beaucoup de PME tentent d'introduire des systèmes ERP afin de centraliser et comptabiliser les données de l'entreprise mais l'introduction d'un ERP ne devrait pas être considérée prioritaire quand il est question de l'accessibilité des données et de performance numérique (Goldratt, 2017). Il y a des risques d'échec associés à l'implantation d'un ERP (Poba-Nzaou, 2008) et les gains ne sont pas

instantanés. Une entreprise qui n'est pas prête à intégrer un aspect technologique lié à ses données peut être lourdement affectée par ces risques et même vivre un échec.

Pour résumer ce constat, **il est important pour les entreprises d'accomplir les étapes de préparation en phase et de bien stabiliser la structure avant se de lancer dans le projet de la gestion et de l'analyse de données.**

5.2 Discussions

Cette section propose une interprétation plus globale des résultats obtenus par la recherche tout en validant les hypothèses de recherche posées. Lors de cette discussion, un survol avec les informations mentionnées dans la littérature est effectué, tout en ciblant les limites rencontrées lors de la recherche. Cette section présente finalement une liste de nouvelles idées et de suggestions pour ouvrir l'horizon vers des recherches futures potentielles en lien avec ce sujet.

À la section précédente (Section 5.1), les résultats ont été présentés d'un point de vue statistique et ceux-ci ont permis d'établir des constats. Dans cette section, les causes expliquant les comportements des données sont analysées afin d'établir des liens entre l'expérience théorique et la réalité d'implantation.

5.2.1 Choix des variables dépendantes à l'étude

En effectuant les analyses de variances, les préalables ne réagissent pas tous au même degré selon la variable dépendante traitée. Les quatre variables dépendantes ont été sélectionnées à titre d'indicateurs pour la performance de l'entreprise et étant donné leur disparité de réaction aux analyses, il était juste de sélectionner plusieurs indicateurs

durant cette recherche. Cela a permis de bien interpréter les différents impacts des préalables sur le niveau du *readiness*.

Toutefois, il est possible de se questionner sur les choix des indicateurs. Les quatre indicateurs ciblés sont très axés sur la production tandis que certains préalables, tels que l'accès aux données, jouent davantage un rôle au niveau de la gestion. Ayant sélectionné des variables dépendantes orientées production, il est possible de soulever l'hypothèse que les préalables plus généraux comme l'accès aux données et l'agilité ne sont pas considérés à leur juste valeur. L'ajout de certains indicateurs de performance pourrait être considéré dans une recherche future afin d'aller observer sous un autre angle les résultats. Une entreprise qui se prépare à l'ère numérique doit considérer l'ensemble des secteurs de performance de son entreprise. Il aurait pu y avoir un indicateur plus représentatif de la gestion administrative, tel que le délai de traitement d'une commande, par exemple.

5.2.2 Retour sur l'objectif et les hypothèses de recherche

L'objectif principal de ce projet de recherche était de simuler les préalables de l'Industrie 4.0 dans un contexte de PMEM et de mesurer leur impact sur la performance de l'entreprise. Pour y arriver, plusieurs objectifs secondaires étaient nécessaires. Avec l'aide de la littérature, il a été possible d'accomplir l'identification des préalables de l'Industrie 4.0 (objectif #2). Les préalables ciblés ont pu être regroupés sous sept catégories distinctes, présentés au Tableau 3.1. En fonction des préalables populaires de la littérature, il a été possible d'accomplir l'objectif principal, soit simuler les préalables et analyser les résultats pour mieux comprendre l'impact et l'importance des préalables sur la performance d'une entreprise en préparation vers sa transformation vers l'Industrie 4.0. Cinq des sept préalables ont été testés et analysés dans ce mémoire.

Le Tableau 5.9 indique la réalisation des quatre objectifs secondaires et des deux phases de l'objectif principal en indiquant où dans ce rapport l'objectif en question a été réalisé.

Tableau 5.9 Résumé de l'atteinte des objectifs

#	Descriptions	FAIT	Sections	Pages
1	Établir la frontière entre la préparation et le début de la transformation vers l'Industrie 4.0	X	2.6.1	44-45
2	Identifier les préalables essentiels à l'Industrie 4.0, au niveau technique, technologique et humain	X	2.6.2	45 à 51
3	Tester le niveau d'importance des préalables et leurs combinaisons sur le niveau de performance d'une PME manufacturière	X	4.1	86 à 92
4	Valider les résultats de l'effet des préalables sur le <i>readiness</i> numérique dans une entreprise manufacturière québécoise	X	6.2	126 à 131
Principal 1/2	Simuler les préalables de l'Industrie 4.0	X	3.5	71 à 85
Principal 2/2	Mesurer l'impact des préalables sur la performance des PMEM	X	Ch. 5	94 à 123

Grâce à la méthodologie utilisée et les différentes analyses, il est possible d'affirmer ou infirmer les hypothèses de recherche. Premièrement, les résultats de l'étude permettent de conclure que les préalables ont un impact positif sur la performance de l'entreprise, ce qui permet de valider l'hypothèse de recherche principale que d'être prêtes permet aux entreprises d'être plus performantes pour entamer leur transformation vers l'Industrie 4.0.

Deuxièmement, pour ce qui est des sous-hypothèses de recherche, il est possible de dire que quatre des cinq préalables étudiés sont significatifs pour la majorité des indicateurs de performance, soit dans 50 % et plus des cas. Il y a seulement l'accès aux données qui semble infirmer l'hypothèse que ce préalable permet aux PME d'améliorer leur

performance. Cela provient du fait que ce préalable est seulement significatif pour le volume de production et bien que cet indicateur soit significatif, il offre un gain de 0,8 %.

Cette recherche a aussi permis de répondre à un sous-objectif de l'étude, soit établir la frontière entre le *readiness* et la maturité (#2). En établissant cette séparation claire entre les deux termes, l'importance des préalables numériques prend tout son sens dans le processus de préparation à la transformation numérique. La Figure 5.2 présente la composition des préalables à introduire pour atteindre le point zéro lors de la phase de préparation selon l'échelle entre le *readiness* et la maturité établie à la Figure 2.2. Selon l'indicateur du volume de production, les cinq préalables testés sont significatifs lors de la phase de préparation. De plus, les deux préalables exclus de l'étude sont intégrés à cette échelle augmentée afin de signifier leur présence populaire dans la littérature.

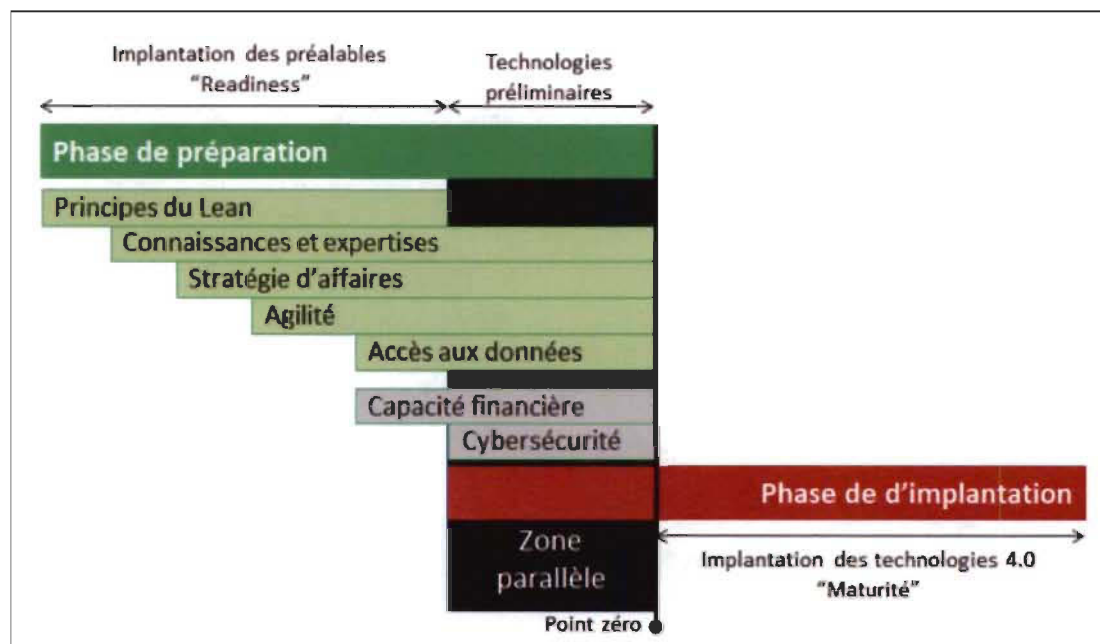


Figure 5.2 Échelle augmentée de la phase de préparation au numérique

En résumé, cette recherche a permis d'atteindre les objectifs ciblés et de porter des conclusions sur le niveau de pertinence des préalables par rapport au niveau de *readiness* à avoir avant de se lancer dans une transformation numérique.

5.2.3 Comparaison avec la littérature

En général, les résultats démontrent une bonne concordance avec les articles cités dans la littérature. Les préalables ciblés comme populaires et mis à l'étude permettent d'observer un impact positif sur la performance d'une entreprise en vue de sa préparation numérique. Toutefois, l'étude des résultats démontre une certaine différence des niveaux de priorité d'implantation présentées dans la littérature.

Premièrement, dans la littérature, le point le plus central et le plus partagé par les auteurs est l'importance du niveau de connaissances et d'expertise des employés au sein d'une entreprise. Cependant, les gains obtenus dans les analyses sont plutôt faibles, soit 4,8 % pour le temps de fabrication, 1,7 % pour le temps de passage et délai de création et 5,5 % pour le volume de production. Si ce préalable est jumelé à une stratégie d'affaires, les résultats démontrent que les gains peuvent être doublés, pour un maximum de 11,2 % d'augmentation du volume de production. Ce gain de 11,2 % est le deuxième plus important des quatre préalables combinés à la stratégie d'affaires, ce qui peut démontrer que ce préalable est important au succès de la performance. Malgré tout, la recherche avait estimé que dû au haut taux de popularité de ce préalable, les gains obtenus allaient mettre la connaissance sur un pilier prioritaire au niveau des recommandations à implanter. En réalité, la conclusion liée à ce préalable est qu'une entreprise doit mettre en place un programme de formation et de partage des connaissances pour assurer le suivi des compétences de ses employés en vue de l'ère numérique. L'importance de l'humain dans le processus de transformation est un aspect à ne pas négliger car il a un grand impact sur la structure globale de l'entreprise. De plus,

il est possible que le gain quantifié avec l'entreprise Poka ne soit pas représentatif à sa juste valeur pour quantifier les gains associés aux connaissances. Avoir des employés formés et qualifiés est recommandé par les auteurs et a été prouvé dans le passé comme un facteur important (PWC, 2016), même si aucune étude n'a encore quantifié les gains possibles d'obtenir avec l'utilisation d'un programme de formation.

Deuxièmement, pour ce qui est de l'accessibilité des données, les résultats de ce préalable sortent très rarement significatifs pour la performance. Ce préalable était juste en dessous de la connaissance et la stratégie d'affaires à titre de préalable le plus souvent nommé par les auteurs. Les auteurs présentaient les bienfaits d'avoir accès à ses données afin de prendre de meilleures décisions plus rapidement. Toutefois, les expériences réalisées à l'aide du modèle de simulation n'ont pas su démontrer ces bienfaits. Cette discordance peut s'expliquer par le fait que l'accessibilité aux données est primordiale en vue de l'ère numérique mais une entreprise telle l'entreprise test démontrait un besoin plus important au niveau de sa production. Les problèmes principaux ne provenaient donc pas des perturbations et de la perte de temps dues au traitement des informations importantes en vue de prendre des décisions. Dans un futur rapproché, cette lacune pourrait prendre de l'importance lorsque les autres problématiques ne prendront plus autant de place. Pour tendre vers l'implantation de l'Industrie 4.0 dans une entreprise, il est important d'avoir accès à ses données pour prendre les décisions les plus éclairées et avoir en place des systèmes de traitement de données pour accueillir les données supplémentaires amenées par une transformation numérique.

Pour ce qui est du *Lean*, de la stratégie d'affaires et de l'agilité, les résultats concordent davantage à la littérature. Le *Lean* est une méthode déjà éprouvée et qui met en place une culture d'amélioration continue au sein des organisations. Cette méthode est applicable préalablement afin d'améliorer au maximum ses capacités avant de tenter de

les améliorer davantage avec des technologies de haut niveau. La stratégie d'affaires, quant à elle, apporte, tel que mentionné dans la littérature, le soutien aux actions et aux phases de préparation de l'entreprise. Il s'agit d'apporter une structure au succès de l'implantation, autant a priori qu'en simultané. Pour ce qui est de l'agilité, ce préalable était le moins fréquent des préalables étudiés, ce qui permet de croire qu'une minorité des auteurs s'entend qu'il est important d'introduire un niveau d'agilité de production en vue de la transformation. Toutefois, l'Industrie 4.0 est une façon d'augmenter son agilité pour mieux répondre au besoin de personnalisation de masse des clients. De plus, en vue d'introduire les technologies et/ou commencer sa transformation, il est recommandé de mettre en place des processus plus agiles (Abdul-Nour, 2021), par exemple, en standardisant ses produits. Donc, les méthodes classiques, éprouvées et peu coûteuses ne devraient pas être négligées au préalable parce qu'un système déjà optimisé est plus facile à optimiser davantage avec des technologies.

CHAPITRE 6 - ÉTUDE DE CAS

Ce chapitre présente les observations et les résultats obtenus grâce à l'étude de cas de cette recherche. Cette étude de cas a permis de faire un parallèle avec les faits soulevés dans la littérature et une situation terrain bien réelle dans une PMEM québécoise. Ce chapitre présente l'entreprise test et le mandat associé, la méthodologie utilisée reliée aux projets d'implantation et une conclusion sur les points forts et les faiblesses de l'étude de cas.

6.1 Présentation de l'entreprise

Équifab inc. est une entreprise québécoise située à Drummondville qui œuvre principalement dans la production et l'assemblage de produits en aluminium. L'entreprise se spécialise dans deux secteurs distincts, soit les épandeurs industriels et les bennes pour camion. En parallèle, l'entreprise fabrique aussi des produits d'aluminium à plus petite échelle, tels que des coffres et des bennes d'insertion. Équifab se démarque sur le marché par leur unicité envers leurs clients et la qualité de leurs produits.

6.1.1 Historique de l'entreprise

L'entreprise est devenue une compagnie incorporée en 2003. Le tout a commencé par la conception et la mise en marché d'épandeurs industriels électriques. À la suite du succès de ce produit saisonnier, l'entreprise s'est lancée dans un deuxième domaine d'expertise, soit les bennes en aluminium pour camions moyens. À ce jour, l'entreprise fabrique trois grands types de produits d'aluminium, soit les bennes d'insertion, les plateformes et les bennes basculantes.

Depuis les dernières années, l'entreprise a connu une croissance rapide. Grâce à la grande flexibilité et la qualité de leurs produits, Équifab réussit à répondre aux exigences de ses clients. Cette expertise permet à l'entreprise de gagner de plus en plus de place sur le marché nord-américain. Cette augmentation de commandes demande à l'entreprise de revoir sa productivité pour rester concurrentielle dans ses délais de livraison.

L'entreprise compte actuellement 22 employés, soit 14 employés sur le plancher de production et huit employés de bureau. La croissance actuelle cause une surcharge de travail pour la production des produits d'aluminium. Pour ce qui est des épandeurs, leur cycle saisonnier permet de bien répartir les commandes et répondre à la demande. La croissance vient donc causer des problématiques au niveau de la capacité de production et l'efficacité dans le secteur des produits d'aluminium.

6.1.2 Mandat

Afin de répondre à ces problématiques, l'entreprise a fait appel au programme Mitacs Accélération en parallèle avec l'Université du Québec à Trois-Rivières. Le jumelage d'une étudiante au deuxième cycle avec la PME manufacturière a comme objectif d'orienter l'entreprise vers des solutions concrètes et d'actualité pour répondre à sa problématique de performance. De plus, l'entreprise désire mettre à jour ses méthodes afin de tendre vers l'ère de l'Industrie 4.0.

Pour la recherche, Équifab est une entreprise parfaite pour accomplir une étude de cas avec les résultats des préalables ciblés. La PME vit quotidiennement un manque de performance et n'a mis en place aucun outil d'amélioration continue, de structure de procédures ou de stratégie d'affaires. La réalité de l'entreprise permet de statuer qu'elle n'est pas prête à accomplir son virage numérique et ce, même si elle en entend parler

et est influencée par les subventions. L'entreprise se retrouve dans un marché en pleine croissance qui lui demande de plus en plus de personnalisation, ce qui l'oblige à devoir s'adapter.

6.2 Méthodologie sur le terrain

Au début du stage en janvier 2020, la première étape a été de se familiariser avec l'entreprise, son équipe et ses produits. Cette étape a permis d'établir une liste des préalables manquants dans l'entreprise en s'assurant de bien faire l'inventaire des outils à implanter dans chaque catégorie de préalable à l'étude.

Avec cette vue d'ensemble, il a été possible d'établir un plan de match des actions à mettre en place pour la durée du mandat. Ces actions ont été triées en sous-groupes et classées par niveau de priorité. Avant de commencer les transformations pour améliorer la performance de l'entreprise, le plan de match a été présenté à la direction. Il était important dans le processus d'inclure les membres de l'entreprise et de leur expliquer les raisons de ces changements. En intégrant les membres de l'équipe, il est possible d'entendre leurs idées et ainsi, mobiliser le personnel vers un objectif commun.

La première lacune observée durant ces quelques mois d'apprentissage est qu'il y a un certain manque de structure au sein de l'entreprise et qu'il y a un certain nombre de tâches à non-valeur ajoutée, autant au niveau de la production qu'au niveau administratif. La priorité du plan de match s'aligne donc avec le besoin de l'entreprise et les résultats de l'étude, soit la mise en place des principes du *Lean*. Le *Lean* a été choisi comme point de départ afin d'instaurer au sein de la production une certaine structure. De plus, les premiers principes introduits permettaient de sensibiliser les employés de plancher aux changements à venir et à l'importance de la valeur ajoutée dans les processus.

6.2.1 Projets d'amélioration implantés

Au début du projet Mitacs, un échéancier des tâches reliées à l'étude de cas avait été réalisé et présenté au programme. Toutefois, l'objectif du projet de recherche a évolué avec le temps. La problématique qui a été présentée de façon préliminaire était principalement axée sur l'importance de l'agilité en vue de la transformation numérique. Rapidement, l'objectif de recherche s'est concentré sur une problématique plus globale, soit que les PME manufacturières tardent à accomplir leur virage numérique dû au fait qu'elles ne sont pas prêtes. Le manque d'agilité a effectivement été ciblé dans la littérature, mais cette lacune s'est ajoutée à plusieurs autres préalables manquants.

Cette nouvelle orientation a modifié les tâches à accomplir durant la période du stage. Il est possible de voir le Gantt des échéanciers réalisés chez l'entreprise à la Figure 6.1, pour comparer le Gantt présenté initialement (Annexe VII). Dans le Gantt, un code de couleur a été utilisé : les tâches en vert ont été réalisées, les tâches en noir ont été mises sur pause et les flèches indiquent qu'il reste des tâches à effectuer dans ce secteur. Les quatre tâches surlignées en gris dans le bas du Gantt représentent les tâches réalisées pour la réalisation du mémoire.

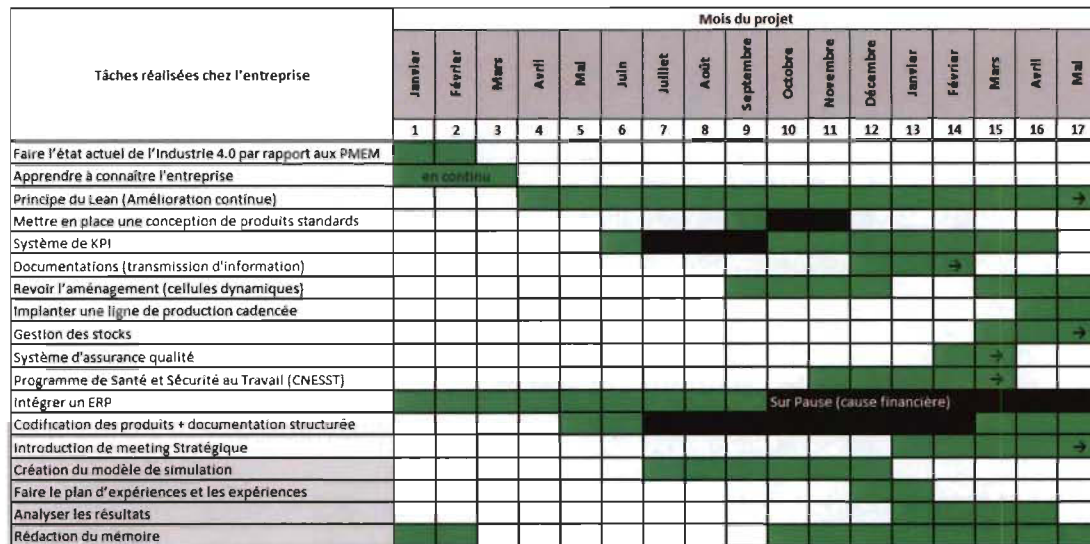


Figure 6.1 Gantt de réalisation chez Équifab

Il est possible de remarquer une disparité entre les tâches présentées dans le Gantt préliminaire, principalement au niveau de l'absence des tâches liées à l'agilité. Les choix d'implantation ont été gérés en fonction des besoins les plus urgents de l'entreprise. Certains projets, tels que le système de qualité, ont été introduits mais n'ont pas été terminés. À la fin du stage, toutes les informations nécessaires selon le secteur d'activité des améliorations à apporter ont été transmises à l'entreprise. Cette transition est un aspect important pour assurer la continuité des implantations d'amélioration chez l'entreprise.

Ce stage a servi à étudier un milieu manufacturier qui rencontre des problèmes dans leur transformation numérique. Il était nécessaire de comptabiliser l'impact des améliorations mises en place afin de valider les résultats théoriques obtenus. Pour y arriver, il était important de mettre en place des indicateurs de performance en lien avec les implantations chez l'entreprise. De plus, à la suite d'une implantation, il est important d'assurer des suivis et des contrôles sur les implantations afin que ceux-ci soient bien utilisés et améliorés au besoin (PYX4, 2021). En intégrant des indicateurs de

performance tels que le taux de non-conformité, il a été possible d'assurer un suivi et de comptabiliser les gains associés aux implantations. Ces indicateurs ont permis deux choses : ceux-ci ont permis à la direction de valider les investissements en temps et monétaires et pour cette recherche, ils ont permis de comparer les gains pratiques à ceux théoriques.

Malgré l'implantation d'indicateurs de performance et de suivis serrés des implantations mises en place, il a été impossible de réellement calculer les gains obtenus dans l'entreprise lors du mandat, principalement dû au manque de structure de l'entreprise ce qui a demandé plusieurs mois d'adaptation et d'ajustement de l'échéancier. Une méthode alternative a été utilisée pour présenter l'état initial et l'état amélioré de l'entreprise.

6.2.2 Comparaison des résultats

Avec le modèle de simulation représentant le processus de production de l'entreprise, il a été possible d'exécuter une expérience supplémentaire. Cette expérience représente la situation améliorée de l'entreprise. Il s'agit bien sûr d'une comparaison théorique, mais celle-ci a permis de démontrer que l'entreprise est sur le bon chemin pour être prête. Elle a encore beaucoup de gain de performance à aller chercher avant d'être prête à sa transformation numérique, mais du moins, le processus est démarré.

Dû à plusieurs causes, telles que le manque de structure, le manque de compréhension, le manque de ressources et la pandémie, l'implantation des préalables a été plus lente qu'espéré. Il n'a donc pas été possible d'implanter tous les préalables et ainsi aller chercher les gains maximaux offerts par les préalables implantés. Premièrement, les principes du *Lean* sont les premiers à avoir fait leur entrée dans l'entreprise. Toutefois, ayant que peu de ressources et aucune culture d'amélioration continue intégrée, peu

de principes ont été implantés. Dû au faible niveau d'implantation du *Lean*, il a été impossible d'aller chercher les gains théoriques de productivité et de qualité. Toutefois, l'intégration de 5S, de gestion d'inventaire min/max, de documentation standard d'instruction de travail et d'inspection de qualité, l'entreprise est allée chercher un gain de 5 % en productivité (versus 25 %) et de 5 % sur son taux de conformité (versus 26 %). Les gains principaux proviennent de la réduction du temps de recherche pour les outils, de la qualité de l'information fournie et des inspections préliminaires. Deuxièmement, l'entreprise a maintenant une stratégie d'affaires pour orienter les actions à prendre à moyen terme. Troisièmement, l'entreprise a commencé à cumuler l'information de leur plancher pour y avoir accès plus rapidement et se préparer à l'intégration d'un système ERP, ce qui permet de faciliter leur prise de décisions. Pour finir, l'entreprise a débuté l'introduction des principes de standardisation de produit, mais aucun gain n'a été cumulé pour ce début de démarche d'agilité et elle n'a introduit aucun programme de formation. Le Tableau 6.1 indique les préalables implantés dans l'entreprise au cours du mandat et le Tableau 6.2 présente l'augmentation du volume de production annuel de l'entreprise.

Tableau 6.1 État des préalables présents dans l'entreprise

Présence Préalables		Gains
(A) Connaissance	non	-
(B) Stratégie d'affaires	OUI	100%
(C) Principes du Lean	OUI	5%
(D) Agilité de production	non	-
(E) Accès aux données	OUI	85%

Tableau 6.2 Comparaison de l'état initial et l'état amélioré de l'entreprise test

Volume de production (Bennes)		
État initial	État amélioré	État optimal
191	204	283
% d'amélioration atteint		6,9%
% d'amélioration possible		48,4%

Pour cette comparaison, les pourcentages proviennent de l'indicateur du volume de production. Les préalables du *Lean*, de la stratégie d'affaires et de l'accès aux données sont présents. Toutefois, le *Lean* obtient des gains limités, autant au niveau de la productivité que de la qualité. L'entreprise a encore beaucoup à gagner de l'implantation des principes du *Lean*, mais tout de même celle-ci est sur la bonne voie. Ces pourcentages sont de très bons arguments pour encourager l'entreprise à continuer sa phase d'amélioration pour se préparer à sa transformation numérique.

6.3 Conclusion du projet Mitacs

L'opportunité de réaliser une étude de cas en entreprise en parallèle à ce projet a permis de ressortir plusieurs apprentissages. Cette étude de cas a permis de mettre en application plusieurs aspects théoriques de la recherche et de vivre en temps réel les défis d'une PME qui désire se rapprocher de l'Industrie 4.0.

Les problématiques ciblées dans la littérature étaient visibles au sein de l'entreprise, ce qui a permis d'ajouter du poids à l'étude et aux résultats. De plus, les résultats et les constats obtenus par la recherche peuvent être directement utilisés par la PME. Donc, pour l'entreprise aussi ce partenariat aura été favorable.

6.3.1 Difficultés et limites rencontrées

Pour réaliser un projet de la sorte, il était nécessaire d'avoir une méthode rigoureuse. Cela débute par l'engagement et la volonté, autant de l'étudiant que de l'entreprise. La présence limitée de l'étudiant doit être optimisée et pour y arriver, il est important de libérer du temps et des ressources pour supporter les projets proposés.

La première difficulté rencontrée a été que l'entreprise partenaire n'offrait pas le meilleur accompagnement face à l'avancement des implantations. L'entreprise test semblait être débordée par ses tâches quotidiennes et ainsi, elle n'était pas en mesure de libérer beaucoup de temps pour faire avancer le projet. Ce manque de temps semblait provenir du manque de structure de l'entreprise et l'absence de priorisation entre les projets. Pour commencer, il a été nécessaire de mettre en place des actions de base, telles que questionner la direction sur ses objectifs de croissance, sur sa vision et sur ses valeurs profondes. Sans ces discussions préalables, il était difficile de faire comprendre les choix proposés par le projet à l'entreprise.

Équifab est une entreprise qui a de grandes ambitions mais qui n'est pas encore en mesure de se situer face à ses projets. Cela a pour effet que l'entreprise n'est pas encore prête à introduire de tels changements. N'ayant pas de structure établie ni de culture d'amélioration, elle ne semblait pas être en mesure d'orienter et prioriser ses actions pour augmenter sa performance. Il y avait une faible compréhension sur les sacrifices à faire pour réaliser un tel projet. L'entreprise était partenaire sans vraiment savoir en quoi une telle entente l'engageait. Bien sûr, l'entreprise a comme objectif de s'améliorer pour rester compétitive mais le projet présenté n'était pas jugé prioritaire. Donc, la deuxième difficulté rencontrée a été le manque d'intérêt de l'entreprise envers le succès de ce projet d'envergure.

La réticence aux changements a été la troisième difficulté rencontrée. Il a été nécessaire d'investir beaucoup de temps pour éduquer l'entreprise face aux bienfaits d'une structure et de l'amélioration continue. Plusieurs propositions étaient freinées par une résistance aux changements liée à l'absence de compréhension face aux gains potentiels. Ce manque de compréhension ralentissait toutes les actions parce que l'entreprise ne voulait pas investir du temps à introduire des changements.

Ces difficultés ont toutefois permis de confirmer la problématique ciblée dans les PMEM et ainsi valider la pertinence de cette recherche. Tel qu'établi par la littérature, certaines PMEM ne sont pas encore prêtes ni outillées pour accomplir ce virage numérique (Rauch et al., 2019). Les PMEM doivent comprendre leurs lacunes et doivent se concentrer sur l'intégration des piliers de base offerts par les préalables proposés.

Outre les difficultés rencontrées, la limite principale rencontrée lors de ce projet était une limite de temps. Sachant la réalité de l'entreprise, il est sans surprise qu'un stage de 16 mois représentait un court délai d'implantation. Il s'agissait d'un gros projet rempli de changements importants. En fonction des trois difficultés rencontrées, il n'a pas été possible de faire la réalisation complète du projet. L'entreprise partenaire est en possession des prochaines étapes à accomplir afin de continuer dans sa phase de préparation au numérique.

6.3.2 Facteurs de succès

Tel que mentionné dans la section des difficultés rencontrées, un projet de cette envergure demande plusieurs implications afin de favoriser le succès d'un projet de la

sorte. Les facteurs de succès ciblés lors de ce projet sont directement reliés aux difficultés rencontrées :

- engagement et volonté de l'entreprise;
- intérêt de l'entreprise envers les projets;
- avoir un désir de changement au sein de l'entreprise;
- avoir un échéancier clair et des suivis serrés;
- libérer des ressources pour accélérer les implantations.

Cette étude de cas en entreprise fut très enrichissante pour compléter les résultats théoriques du mémoire. En fait, les difficultés rencontrées ont permis des apprentissages humains importants, tels que l'importance de la motivation et de la culture face aux changements. Cette étude de cas aura aussi permis de cibler qu'au sein de l'entreprise, il manquait probablement plus que seulement les préalables étudiés dans ce mémoire. Il pourrait être intéressant de se questionner s'il s'agit vraiment d'un retard technologique ou bien d'un manque de motivation de la part des PMEM à s'engager dans une transformation de cette envergure. Cette observation permettrait de porter davantage d'importance sur le manque de culture du changement des PMEM afin d'ajouter une phase de préparation non négligeable en vue de leur transformation vers l'Industrie 4.0.

CHAPITRE 7 - CONCLUSION

En conclusion, cette recherche a permis de répondre à une problématique réelle dans le milieu manufacturier, soit que les PME ne semblent pas prêtes à accomplir leur transformation numérique. L'Industrie 4.0 permet aux entreprises d'être de plus en plus efficaces, productives et agiles (Leurent et Boer, 2019) et ces améliorations permettent aux entreprises d'être mieux outillées pour répondre aux demandes de personnalisation de masse de leurs clients (Hassani, 2020). Avec l'évolution constante et rapide du milieu manufacturier à la suite de l'arrivée des technologies numériques, il était important de présenter une solution pour aider les PMEM à commencer leur transformation vers l'Industrie 4.0 afin qu'elles réussissent à rester performantes et compétitives sur les marchés.

La littérature indique que la majorité des PME manufacturières ne semblent pas prêtes ni équipées pour accomplir une telle transformation numérique (Rauch et al., 2019). Sachant que l'Industrie 4.0 offre un grand potentiel pour les PME (Moeuf et al., 2018), cette recherche avait comme objectif de simuler les préalables ciblés dans la littérature et mesurer leur impact sur la performance des PMEM en vue de se préparer à l'Industrie 4.0. Les résultats avaient comme objectif d'orienter les PME dans leur transformation.

Pour y arriver, une revue de littérature détaillée a été accomplie. Avec la revue de littérature, il a été possible de cibler les préalables de l'Industrie 4.0 les plus populaires chez les auteurs. Les préalables ont pu être regroupés sous sept catégories, soit l'accessibilité des données, la connaissance et expertise des employés, les principes du *Lean*, la stratégie d'affaires, l'agilité de production, la capacité financière et la cybersécurité. En utilisant un plan d'expériences complet et un modèle de simulation, les cinq catégories de préalables axés sur la performance de production ont été testées en fonction des données d'une entreprise test par rapport à différents indicateurs de

performance tels que le volume de production et le temps de passage. Cette étape a par ailleurs permis de confirmer les sous-hypothèses du *Lean*, de l'agilité, de la connaissance et de la stratégie d'affaires. Ces préalables ont en effet un impact positif sur la performance des entreprises. Les résultats montrent cependant que l'accès aux données demeure discutable.

Au niveau terrain, les constats présentés dans cette recherche montrent que peu importe l'objectif de l'entreprise, celle-ci devrait implanter en premier les principes du *Lean* afin d'aller optimiser ses processus et mettre en place une culture d'amélioration continue qui lui permet d'obtenir des gains d'amélioration importants. Ensuite, l'ordre des préalables à implanter varie en fonction des besoins et des objectifs de l'entreprise. De plus, malgré la popularité liée à l'importance de la mise en place d'une stratégie d'affaires dans la littérature, celle-ci ne semble pas aussi importante lorsqu'elle est implantée seule. Enfin, il est toujours prioritaire de stabiliser la structure avant de se perdre dans les technologies ou les besoins technologiques.

Les résultats de cette recherche permettront d'orienter les PME manufacturières pour accomplir la phase de préparation à l'Industrie 4.0. L'objectif est de mettre en place les piliers de base afin d'être prêt à l'implantation des technologies numériques. Ensuite, en fonction de son niveau de préparation et de la technologie choisie, l'entreprise doit s'assurer d'avoir mis en place les préalables axés davantage sur les technologies, tels que l'accès aux données et la cybersécurité.

7.1 Contributions apportées

Dans la littérature, il est souvent question de l'implantation de technologies et de modèles de maturité pour tendre vers l'Industrie 4.0, mais beaucoup plus rarement il est question de *readiness* numérique. Cette recherche a permis d'établir une distinction

claire entre les termes maturité et *readiness*. Cette distinction permet de mettre l'accent sur l'importance des deux phases, soit la préparation et l'implantation, en vue d'être une entreprise qui adhère aux concepts et technologies de l'Industrie 4.0. Cela est probablement la contribution principale de cette recherche, parce que même s'il y avait certains auteurs qui faisaient la distinction entre *readiness* et maturité numérique (Pacchini et al., 2019), cette distinction était peu présente dans la littérature et était souvent orientée vers les technologies de l'Industrie 4.0.

Ensuite, malgré qu'il y ait de nombreuses études quantitatives dans la littérature par rapport aux valeurs numériques liées à l'Industrie 4.0, il n'y a aucune étude présentant des valeurs chiffrées permettant de connaître l'effet des préalables sur la performance d'une entreprise. La méthode de réalisation de cette étude a permis d'opérationnaliser les préalables et de simuler leur influence entre eux sur le niveau de performance nécessaire pour être prêt à une transformation numérique, ce qui n'avait jamais été réalisé auparavant. Cette recherche présente un aspect de l'Industrie 4.0 négligé, soit comment se préparer au virage numérique, en plus d'offrir des résultats approximatifs sur une manière pour les PME d'augmenter leur *readiness* numérique. Ces résultats permettent d'orienter la transformation numérique des PME et ce, sans se concentrer sur les technologies existantes. De plus, cette recherche permet une ouverture par rapport à l'effet des préalables sur la performance de l'entreprise en vue d'accomplir sa transformation numérique, ce qui apporte un nouveau détail pour ce secteur de recherche.

7.2 Limites de la recherche

Dans la situation actuelle, la première limite rencontrée est liée à la littérature. Dès le début de ce projet, il a été possible de cibler une lacune dans la littérature. Il y avait très peu d'études passées concernant le sujet choisi. De plus, la confusion entre le terme

maturité et *readiness* a réduit le nombre de sources fiables. En combinant ces deux problèmes de la littérature, peu d'articles ont pu être utilisés pour monter la revue de littérature de l'état initial des préalables à l'Industrie 4.0.

Ensuite, dans le bassin d'auteurs ciblés lors de la revue de littérature, aucun ne quantifiait les préalables. Cette nouvelle approche a demandé de poser plusieurs hypothèses, autant pour opérationnaliser quantitativement les variables indépendantes que pour calculer les résultats de la performance. Ces hypothèses entraînent donc une autre limite de l'étude. Une réflexion a été nécessaire pour les indicateurs de performance puisque jamais une telle quantification n'a été réalisée. Tandis que pour quantifier les gains des préalables, une approche terrain a été réalisée afin d'obtenir des valeurs provenant de spécialistes. Le retour des experts du terrain ayant déjà implanté de tels préalables a fourni des données quantifiables et convergentes et pouvant ainsi être testées dans un modèle de simulation. Il s'agit d'une lacune de la littérature de ne présenter aucune recherche avec des pourcentages d'amélioration des techniques déjà éprouvées avec le temps.

7.3 Sources de biais

Les principales sources d'erreur de cette étude sont liées aux hypothèses posées. Toutefois, l'impact sur les résultats provient de l'entreprise test qui elle aussi est potentiellement une source d'erreur.

L'entreprise test ciblée est une PME manufacturière qui démontre ne pas être encore prête à l'implantation de l'Industrie 4.0, principalement dû à son manque de structure. Cependant, toutes les données terrain utilisées pour cette recherche proviennent de cette entreprise. Leurs données entraînent une source d'erreur potentielle dès le début de la recherche. Par son manque de structure, il est juste de penser que les données

fournies par l'entreprise ne sont pas particulièrement fiables. Il pourrait être intéressant de faire un parallèle avec d'autres entreprises qui sont dans un secteur d'activité différent et qui ont des situations de production diverses. En approfondissant cette étude grâce à une plus grande étendue d'entreprises tests, cela permettrait de compléter les résultats et mieux comprendre l'impact concret des préalables sur la performance en vue de la transformation numérique.

7.4 Perspectives futures

Sachant qu'il y a deux sources principales qui ont eu un impact sur les limites de la recherche, soit la littérature et les données de l'entreprise, il est possible de proposer des recommandations pour améliorer ces lacunes dans le futur.

Dans l'objectif d'offrir des suggestions pour diminuer l'impact des problématiques rencontrées, une ouverture vers des perspectives de recherches futures est présentée. Ces recherches potentielles permettront d'augmenter les sources et les données par rapport aux préalables, leur impact et le *readiness* numérique en général.

7.4.1 Perspective future #1 : augmenter l'échantillon

Il serait intéressant de compléter cette recherche en faisant **une étude similaire des préalables de l'Industrie 4.0 sur une plus grande étendue d'entreprises**. En effectuant cette recherche sur un échantillon de PME dans des secteurs d'activité et des situations de production différentes, il serait possible d'approfondir les constats de l'étude en fonction des problèmes rencontrés dans les entreprises. De plus, cette recherche potentielle permettrait de mieux comprendre l'impact concret de préalables sur la performance en vue de la transformation numérique.

7.4.2 Perspective future #2 : quantifier les préalables

Le manque de données quantifiées pour les préalables dans la littérature a été un des défis principaux de cette étude. Ce défi a demandé de contacter des entreprises ayant implanté les préalables dans le passé afin d'obtenir des sources par rapport aux préalables. Les informations obtenues ont permis de poser des hypothèses pour quantifier les gains des préalables sur un système de production. Tel que mentionné par l'entreprise Poka, il est difficile de connaître les gains quantifiés réels des outils proposés. Il serait donc intéressant de faire **des études pour tous les préalables ciblés afin de connaître leur véritable impact sur un système de production**. De cette façon, il serait possible d'avoir des sources dans la littérature qui confirme que, par exemple, la connaissance a un impact de 5 % sur la productivité des employés de production. Ces études permettraient de répondre au manque de données quantifiées dans la littérature et par le fait même, favoriser la compréhension des techniques éprouvées auprès des entreprises et ainsi encourager leur implantation dans les milieux industriels.

7.4.3 Perspective future #3 : détailler la zone de transition entre le *readiness* et la maturité numérique

Avec cette recherche, il a été possible d'établir la frontière entre le *readiness* et la maturité. L'échelle présentée à la Figure 2.2 permet de distinguer la phase de préparation de la phase d'implantation de l'Industrie 4.0. Toutefois, il est aussi possible d'observer une zone parallèle entre les deux phases. Cette zone correspond à l'introduction préliminaire de technologies, qui peut être considérée par les deux phases. Cette zone parallèle permet de démontrer la disparité de pensée de certains auteurs (Pacchini et al., 2019; Samaranayake et al., 2017) et d'introduire l'importance a priori des technologies dans un processus de transformation numérique. Il serait intéressant de **réaliser une recherche pour déterminer les préalables technologiques à**

introduire dans cette zone parallèle, par exemple l'intégration d'infrastructure informatique, des capteurs en temps réel ou encore d'un système de protection de données (Cybersécurité). Une recherche de la sorte permettrait d'élargir l'horizon de la recherche axée sur les préalables de l'Industrie 4.0 en testant les préalables technologiques en vue d'une transformation numérique.

7.4.4 Perspective future #4 : première technologie

Les conclusions présentées durant cette recherche permettent aux PME de s'orienter dans leur transformation numérique. Les PME possèdent maintenant un guide d'implantation des préalables afin de se préparer adéquatement à l'ère numérique et ainsi assurer leur succès lors de leur transformation. Maintenant que les PME ont accès à ces informations, il est intéressant de se questionner sur la suite des choses. Il serait possible de **faire une recherche pour identifier les premières technologies à introduire dans une PME afin d'optimiser sa transformation numérique**. La recherche présentée dans ce mémoire a permis de présenter les préalables essentiels afin d'être prêt à l'Industrie 4.0 tandis que cette perspective de recherche future permettrait d'assurer que les PME prennent la bonne direction lors de leur transformation.

Ces quatre perspectives permettent d'ouvrir de nouveaux horizons de recherches potentielles. Ces suggestions permettraient d'augmenter les références dans la littérature par rapport au *readiness* et aux préalables. De plus, ces perspectives répondent à des lacunes réelles et permettent d'offrir des informations supplémentaires aux PME pour les encourager et les aider dans leur transformation numérique.

LISTE DES RÉFÉRENCES

- Abdul-Nour, G. (2021). Du LEAN à la Révolution 4.0, les défis de la PME. 88e Congrès de l'ACFAS - École d'été 4.0.
- Abdul-Nour, G., Drolet, J., & Lambert, S. (1999). Mixed production, flexibility and SME. *Computers & Industrial Engineering*, 37(1-2), 429-432.
- Acosta-Vargas, P., Chicaiza-Salgado, E., Acosta-Vargas, I., Salvador-Ullauri, L., & Gonzalez, M. (2021). Towards industry improvement in manufacturing with DMAIC. *Advances in Intelligent Systems and Computing - AISC*, 1273, 341-3525.
- Amjad, M., Rafique, M., & Khan, M. (2021). Leveraging optimized and cleaner production through industry 4.0. *Sustainable Production and Consumption*, 26, 859-871.
- Andrews, L. (2019, février 15). *Top 12 Manufacturing KPIs To Track Operational Excellence*. Récupéré sur SensrTrx : <https://www.sensrtrx.com/top-manufacturing-kpis>.
- Anggrahini, D., Kurniati, N., Karningsih, P., Parenreng, S., & Syahroni, N. (2018). Readiness assessment towards smart manufacturing system for tuna processing industry in Indonesia. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.
- Ashton, K. (2009). That "Internet of things" thing. *RFID Journal*, 22(7), 97-114.
- Baron, M. (2005). *Mise en oeuvre de l'agilité dans les organisations québécoises: étude de cas dans le secteur du meuble*. Trois-Rivières: Mémoire de maîtrise, UQTR.
- Bernier, A. (2014). Les effets possibles de la formation sur la productivité: l'apport de données longitudinales. *Relations industrielles/Industrial Relations*, 69(2), 366-387.
- Bhadani, K., Asbjörnsson, G., Hulthén, E., & Evertsson, M. (2020). Development and implementation of key performance indicators for aggregate production using dynamic simulation. *Minerals Engineering*, 145.
- Brettel, M., Friederichsen, N., Keller, M., & Rosenberg, M. (2014). How virtualization, decentralization and network building change the manufacturing landscape: An

- Industry 4.0 perspective. *International Journal of Mechanical, Industrial Science and Engineering*, 8(1), 37-44.
- Castelo-Branco, I., Cruz-Jesus, F., & Oliveira, T. (2019). Assessing Industry 4.0 readiness in manufacturing: Evidence for the European Union. *Computers in Industry*, 107, 22-32.
- CEE-UQAC (2018). *La gestion stratégique, un concept négligé par le dirigeant de PME*. Récupéré sur CEE-UQAC : <https://www.uqac.ca/ceeuqac/la-gestion-strategique-un-concept-neglige-par-le-dirigeant-de-pme>.
- Chamberland, S. (2020). *Changement au programme Audit 4.0 du MEI*. Récupéré sur Brome Conseil : https://bromeconseil.com/changements-programme-audit-industrie-4-0-janvier-2020/?fbclid=IwAR1Gbyuw16eKDbe_d8B8zVx8__kySgt9-7Utxzolerb5hQcQOyHmadeEIXg.
- Charbonneau Genest, M., & Gamache, S. (2020). Prerequisites for the implementation of Industry 4.0 in manufacturing SMEs. *Procedia Manufacturing*, 51, 1215-1220.
- Chonsawat, N., & Sopadang, A. (2020). Defining SMEs' 4.0 readiness indicators. *Applied Sciences (Switzerland)*, 1-30.
- Čiarnienė, R., & Vienažindienė, M. (2012). Lean manufacturing: Theory and practice. *Economics and Management*, 17(2), 726-732.
- Danjou, C., Pellerin, R., & Rivest, L. (2017). *Industrie 4.0: des pistes pour aborder l'ère du numérique et de la connectivité*. Québec : CEFRIO.
- Dassisti, M., Giovannini, A., Merla, P., Chimienti, M., & Panetto, H. (2019). An approach to support Industry 4.0 adoption in SMEs using a core-metamodel. *Annual Reviews in Control*, 47, 266-274.
- De Carolis, A., Macchi, M., Negri, E., & Terzi, S. (2017). A maturity model for assessing the digital readiness of manufacturing companies. *IFIP Advances in Information and Communication Technology*, 513, 13-20.
- Dilberoglu, U., Gharehpapagh, B., Yaman, U., & Dolen, M. (2017). The role of additive manufacturing in the era of Industry 4.0. *Procedia Manufacturing*, 11, 545-554.

- Direction générale des entreprises et de l'UE (2008). Un "small business act" pour l'Europe. Dans a. C. Commission au Parlement européen (Éd.), *"Think small first : priorité aux PME"*. Luxembourg: Office des publications officielle des communautés européennes.
- Duguay, C., Landry, S., & Pasin, F. (1997). From mass production to flexible/agile production. *International Journal of Operations & Production Management*, 17(12), 1182-1195.
- Dumont, M. (2019, août 14). *Améliorer la productivité de vos employés par la formation en ligne*. Récupéré sur Didacte : <https://www.didacte.com/fr/articles/ameliorer-la-productivite-de-vos-employes-par-la-formation-en-ligne>.
- Earley, T. (2011, juin 14). *Benefits of lean manufacturing/Why implement lean?* Récupéré sur Lean Manufacturing Tools.
- Elwardi, B., Meddaoui, A., Mouchtachi, A., & Nissoul, H. (2021). New maturity model of industrial performance for SME - Creation and case study. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, pp. 292-304.
- Fabi, B., Raymond, L., Lacoursière, R., & Arcand, M. (2004). Les PME les plus performantes se distinguent-elles par leurs pratiques de GRH? *VIIe Congrès international francophone en entrepreneuriat et PME*, (pp. 1-16). Montpellier.
- Faller, C., & Feldmüller, D. (2015). Industry 4.0 learning factory for regional SMEs. *Procedia Cirp*, 32, 88-91.
- Forth, P., Reichert, T., de Laubier, R., & Chakraborty, S. (2020, octobre 29). *Flipping the odds of digital transformation success*. Récupéré sur Boston Consulting Group : <https://www.bcg.com/publications/2020/increasing-odds-of-success-in-digital-transformation>.
- Gamache, S. (2016). *Effet des cellules dynamiques sur la performance des réseaux d'entreprises*. Trois-Rivières : Mémoire de maîtrise, UQTR.
- Gamache, S., Abdul-Nour, G., & Baril, C. (2017). Toward industry 4.0: Studies and practices in Québec SMEs. *How Digital Platforms and Industrial Engineering are*

- Transforming Industry and Services*. Lisbonne, Portugal : International Conference on Computers and Industrial Engineering.
- Gamache, S., Abdul-Nour, G., & Baril, C. (2019). Stratégie d'implantation de l'Industrie 4.0 dans la PME manufacturière québécoise. *CIGI Qualita 2019*.
- Ganzarain, J., & Errasti, N. (2016). Three stage maturity model in SMEs towards Industry 4.0. *Journal of Industrial Engineering and Management*, 9(5).
- Gaumont, M. (1999). *La résistance au changement : un phénomène incontournable et non négligeable*. Montréal : Mémoire de maîtrise, HEC Montréal.
- Geissbauer, R., Vedso, J., & Schrauf, S. (2016). *Industry 4.0: Building the digital enterprise*. Récupéré sur PWC : <https://www.pwc.com/gx/en/industries/industries-4.0/landing-page/industry-4.0-building-your-digital-enterprise-april-2016.pdf>.
- Ghobakhloo, M. (2019). Determinants of information and digital technology implementation for smart manufacturing. *International Journal of Production Research*, 58(8), 2384-2405.
- Ghobakhloo, M., & Ching, N. (2019). Adoption of digital technologies of smart manufacturing in SMEs. *Journal of Industrial Information Integration*, 16.
- Ghobakhloo, M., & Fathi, M. (2019). Corporate survival in industry 4.0 era: The enabling role of lean-digitized manufacturing. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 31(1), 1-30.
- Goldratt, E. (2017). *Necessary but not sufficient: A theory of constraints business novel*. Routledge.
- Harris, G., Yarbrough, A., Abernathy, D., & Peters, C. (2019). Manufacturing readiness for digital manufacturing. *Manufacturing Letters*, 22, 16-18.
- Hassani, A. (2020). *L'industrie 4.0 et les facteurs clés de succès de projet*. Trois-Rivières : Mémoire de maîtrise, UQTR.
- Hess, T., Matt, C., Benlian, A., & Wiesböck, F. (2016). Options for formulating a digital transformation strategy. *MIS Quarterly Executive*, 15(2).

- Hofmann, E., & Rüsch, M. (2017). Industry 4.0 and the current status as well as future prospects on logistics. *Computers in Industry*, 89, 23-34.
- Indrawan, H., Cahyo, N., Simaremare, A., Aisyah, S., & Tauviqirrahman, M. (2019). Readiness index for Indonesian power plant toward industry 4.0. 2019 International Conference on Technologies and Policies in Electric Power & Energy.
- Investissement Québec (2020). *Audit industrie 4.0 : réussir la transformation de votre entreprise*. (M. d. l'Innovation, Éd.) Consulté le 5 juin 2021, sur Investissement Québec : <https://www.economie.gouv.qc.ca/fr/bibliotheques/programmes/aide-financiere/programme-audit-industrie-40/>.
- Jacquet, S. (2011). *Management de la performance: des concepts aux outils*. Récupéré sur Centre de ressources en économie gestion (CREG) : https://creg.ac-versailles.fr/IMG/pdf/Management_de_la_performance_-_des_concepts_aux_outils.pdf.
- Kagermann, H., Wahlster, W., & Helbig, J. (2013). Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0. *Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie*, 4(5).
- Kelton, W., Sadowski, R., & Sturrock, D. (2007). *Simulation with Arena* (éd. 4e édition). McGraw Hill.
- Kiraz, A., Canpolat, O., Özkurt, C., & Taskin, H. (2020). Analysis of the factors affecting the Industry 4.0 tendency with the structural equation model and an application. *Computers & Industrial Engineering*, 150.
- Kohler, D., & Weisz, J.-D. (2016). *Industrie 4.0 : les défis de la transformation numérique du modèle industriel allemand*. Paris : La Documentation française.
- Lambert, S., & Abdul-Nour, G. (2011). *Impact de la formation sur la productivité de 13 PME québécoises*.
- Larman, C., & Vodde, B. (2009). Lean primer. *Version*, 1, 1-46.
- Larousse (2017). Définition "performance". *Dictionnaire Larousse*.
- Lasi, H., Fettke, P., Kemper, H.-G., Feld, T., & Hoffmann, M. (2014). Industry 4.0. *Business & Information Systems Engineering*, 6(4), 239-242.

- Leblanc, G. (2020). Comment aider les entreprises québécoises dans leur virage numérique? *Forum Productivité innovation*.
- Lefebvre, G. (2021). Perspectives d'avenir sur la transformation numérique. *88e Congrès de l'ACFAS*.
- Leurent, H., & Boer, E. (2019). Fourth industrial revolution beacons of technology and innovation in manufacturing. *White Paper*, 10.
- Li, D., Fast-Berglund, A., & 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.
- Li, G., Hou, Y., & Wu, A. (2017). Fourth industrial revolution: Technological drivers, impacts and coping methods. *Chinese Geographical Science*, 27(4), 626-637.
- Lichtblau, K., Stich, V., Bertenrath, R., Blum, M., Bleider, M., Millack, A., . . . Schröter, M. (2015). *IMPULS. Industrie 4.0 Readiness*. Cologne : VDMA's IMPULS Stiftung.
- Lihra, T. (2009). *La personnalisation de masse pour l'industrie du meuble en bois*. Québec : Thèse de doctorat, Université Laval.
- Machado, C., Winroth, M., Carlsson, D., Almstrom, P., Centerholt, V., & Hallin, M. (2019). Industry 4.0 readiness in manufacturing companies; Challenges and enablers towards increased digitalization. *Procedia Cirp*.
- Marr, B. (2020). *Pour passer des données aux décisions, les 5 étapes du processus décisionnel fondé sur des données*. Comptables professionnels agréés Canada.
- Matt, D., Orzes, G., Rauch, E., & Dallasega, P. (2018). Urban production - A socially sustainable factory concept to overcome shortcomings of qualified workers in smart SMEs. *Computers & Industrial Engineering*, 139.
- Mayr, A., Weigelt, M., Kühl, A., Grimm, S., Erll, A., Potzel, M., & Franke, J. (2018). Lean 4.0 - A conceptual conjunction of lean management and Industry 4.0. *Procedia Cirp*, 72, 622-628.

- Miragliotta, G., Sianesi, A., Convertini, E., & Distante, R. (2018). Data driven management in Industry 4.0: A method to measure data productivity. *IFAC-PapersOnLine*, 51(11), 19-24.
- Mittal, S., Khan, M., Purohit, J., Menon, K., Romero, D., & Wuest, T. (2019). A smart manufacturing adoption framework for SMEs. *International Journal of Production Research*, 58(5), 1555-1573.
- Mittal, S., Khan, M., Romero, D., & Wuest, T. (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.
- Moeuf, A., Lamouri, S., Pellerin, R., Tamayo-Giraldo, S., Tobon-Valencia, E., & Eburdy, R. (2020). Identification of critical success factors, risks and opportunities of Industry 4.0 in SMEs. *International Journal of Production Research*, 58(5), 1384-1400.
- 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.
- Moreira, E. (2021, 5 novembre). *5 raisons de travailler pour une PME plutôt qu'une grosse entreprise*. Récupéré sur Génie-inc : <https://www.genie-inc.com/5-raisons-de-travailler-pme-plutot-grosse-entreprise/>.
- Mosterman, P., & Zander, J. (2016). Industry 4.0 as a cyber-physical system study. *Software and Systems Modeling*, 15(1), 17-29.
- OCDE (2004). Les statistiques sur les PME : vers une mesure statistique plus systématique du comportement des PME. *2e Conférence de l'OCDE des ministres en charge des PME*. Istanbul, Turquie : OCDE.
- Pacchini, A. (2019). *The level of readiness of industrial companies for implementation of industry 4.0: A study in the Brazilian automotive sector*. Sao Paulo, Brésil : Ninth of July University.
- Pacchini, A., Lucato, W., Facchini, F., & Mummolo, G. (2019). The degree of readiness for the implementation of industry 4.0. *Computers in industry*, 113.

- Poba-Nzaou, P. (2008). *Processus d'adoption et réduction du risque d'implantation des PGI dans les PME : une étude de cas multiples*. Trois-Rivières : Thèse de doctorat, UQTR.
- Porter, M., & Heppelmann, J. (2014). How smart, connected products are transforming competition. *Harvard Business Review*, 92(11), 64-88.
- Prause, M. (2019). Challenges of Industry 4.0 technology adoption for SMEs: The case of Japan. *Sustainability (Switzerland)*, 11(20).
- Press, C., & Walter, E. (2015). *Cambridge advanced learner's dictionary* (éd. 4th). Cambridge, New York : Cambridge University Press.
- PWC (2016). *L'industrie 4.0 : l'occasion de briller pour le secteur manufacturier canadien*. Récupéré sur PWC : <https://www.pwc.com/ca/fr/industries/industry-4-0/canadian-pov.html>.
- PYX4 (2021, 7 septembre). *Le guide complet de mise en place d'une démarche d'amélioration continue*. Récupéré sur PYX4 : <https://pyx4.com/blog/guide-complet-de-mise-place-dune-demarche-damelioration-continue/>.
- Qin, J., Liu, Y., & Grosvenor, R. (2016). A categorical framework of manufacturing for industry 4.0 and beyond. *Procedia Cirp*.
- Rauch, E., Dallasega, P., & Unterhofer, M. (2019). Requirements and barriers for introducing smart manufacturing in small and medium-sized enterprises. *IEEE Engineering Management Review*, 47(3), 87-94.
- Riding, A., & Orser, B. (2007, septembre). *Financing Profiles*. Récupéré sur Gouvernement du Canada : [https://www.ic.gc.ca/eic/site/061.nsf/vwapj/ATProfile_Eng.pdf/\\$file/ATProfile_Eng.pdf](https://www.ic.gc.ca/eic/site/061.nsf/vwapj/ATProfile_Eng.pdf/$file/ATProfile_Eng.pdf).
- Rioux, M. (2021). Processus d'accompagnement en transformation numérique. *Mardi 4.0*.
- Röglinger, M., Pöppelbub, J., & Becker, J. (2012). Maturity models in business process management. *Business Process Management Journal*, 18(2), 328-346.

- Romelaer, P., & Mintzber, H. (1982). *Structure & dynamique des organisations*. Paris : Les Éditions d'organisation.
- Rosin, F., Forget, P., Lamouri, S., & Pellerin, R. (2020). Impacts of industry 4.0 technologies on lean principles. *International Journal of Production Research*, 58(6), 1644-1661.
- Samaranayake, P., Ramanathan, K., & Laosirihongthong, T. (2017). Implementing industry 4.0 - A technological readiness perspective. *2017 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*.
- Schiraldi, M., & Varisco, M. (2020). Overall equipment effectiveness: Consistency of ISO standard with literature. *Computers and Industrial Engineering*, 145.
- Schumacher, A., Erol, S., & Sihn, W. (2016). A maturity model for assessing industry 4.0 readiness and maturity of manufacturing enterprises. *Procedia CIRP*, 52, 161-166.
- Singh, R., & Bhanot, N. (2019). An integrated DEMATEL-MMDE-ISM based approach for analysing the barriers of IoT implementation in the manufacturing industry. *International Journal of Production Research*, 58(8), 2454-2476.
- Smit, J., Kreutzer, S., Moeller, C., & Carlberg, M. (2016). *Industry 4.0 a study for the European Parliament*. Bruxelles, Belgique.
- Stevenson, A. (2010). *Oxford Dictionary of English*. Oxford, Royaume-Uni.
- STIQ (2020). *Baromètre industriel québécois. Un portrait unique du secteur manufacturier*. Récupéré sur STIQ : <https://www.stiq.com/wp-content/uploads/2016/03/STIQ-Barom%C3%A8tre-11e-%C3%A9dition-web.pdf>.
- Torrès, O. (1999). *Les PME*. Paris : Flammarion.
- Torrès, O. (2016). Les risques psychosociaux du dirigeant de PME : typologie et échelle de mesure des stressseurs professionnels. *Revue internationale PME*, 29(3-4), 135-159.
- Tortorella, G., & Fettermann, D. (2018). Implementation of industry 4.0 and lean production in brazilian manufacturing companies. *International Journal of Production Research*, 56(8), 2975-2987.

- Trappey, A., Trappey, C., Hareesh Govindarajan, U., Chuang, A., & Sun, J. (2017). A review of essential standards and patent landscapes for the Internet of Things: A key enabler for industry 4.0. *Advanced Engineering Informatics*, 33, 208-229.
- Türkcs, M., Oncioiu, I., Aslam, H., Marin-Pantelescu, A., Topor, D., & Capusneanu, S. (2019). Drivers and barriers in using industry 4.0: A perspective of SMEs in Romania. *Processes*, 7(3).
- Uxpertise (2020, 1^{er} avril). *Comment améliorer la productivité des manufacturiers avec un LMG*. Récupéré sur Uxpertise.
- Von Haartman, R., Bengtsson, L., & Niss, C. (2016). Lean practices as requisites for the use of digital technology in production. *EurOMA2016 - Interactions*. Trondheim, Norvège.
- Vrchota, J., Volek, T., & Novotna, M. (2019). Factors introducing industry 4.0 to SMEs. *Social Sciences*, 8(5).
- Zhang, C., Chen, Y., Chen, H., & Chong, D. (2021). Industry 4.0 and its implementation: A review. *Information Systems Frontiers*, 1-11.
- Zhang, Y., Deng, Y., Wang, Y., Chen, P., Yan, B., Zou, X., & Zhu, H. (2019). Functionnal structure modeling and assembly practice of ditching fertilizer based on standardized module design. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*.

ANNEXE I

Gains des préalables – Plan d'expériences complet

Tableau A1.1 Plan d'expériences augmenté par les gains/niveaux

Plan Complet					
Expériences	Amélioration par Réduction			Gains augmentés	
	Lean	Agilité	Connaissance	Accès	Stratégies
1	75%	5%	95%	85%	77,9%
2	75%	5%	95%	85%	100%
3	75%	5%	95%	70%	77,9%
4	75%	5%	95%	70%	100%
5	75%	5%	100%	85%	77,9%
6	75%	5%	100%	85%	100%
7	75%	5%	100%	70%	77,9%
8	75%	5%	100%	70%	100%
9	75%	TRIA()	95%	85%	77,9%
10	75%	TRIA()	95%	85%	100%
11	75%	TRIA()	95%	70%	77,9%
12	75%	TRIA()	95%	70%	100%
13	75%	TRIA()	100%	85%	77,9%
14	75%	TRIA()	100%	85%	100%
15	75%	TRIA()	100%	70%	77,9%
16	75%	TRIA()	100%	70%	100%
17	100%	5%	95%	85%	77,9%
18	100%	5%	95%	85%	100%
19	100%	5%	95%	70%	77,9%
20	100%	5%	95%	70%	100%
21	100%	5%	100%	85%	77,9%
22	100%	5%	100%	85%	100%
23	100%	5%	100%	70%	77,9%
24	100%	5%	100%	70%	100%
25	100%	TRIA()	95%	85%	77,9%
26	100%	TRIA()	95%	85%	100%
27	100%	TRIA()	95%	70%	77,9%
28	100%	TRIA()	95%	70%	100%
29	100%	TRIA()	100%	85%	77,9%
30	100%	TRIA()	100%	85%	100%
31	100%	TRIA()	100%	70%	77,9%
32	100%	TRIA()	100%	70%	100%

*Où TRIA() correspond à la durée des perturbations générées par une distribution triangulaire (2, 5, 120) minutes.

Tableau A1.2 Calculs des gains par préalable

Facteurs	Impacts / gains	Niveau 1 (Inactif)	Niveau 2 (Actif)
Connaissances et expertises	Ratio du temps de production (Productivité)	100%	95%
Stratégie d'affaires	Niveau de gains des préalables appliqués	77,9%	100%
Principes du Lean	Ratio du temps de production (Productivité)	100%	75%
	Taux de conformité des produits finis (Qualité)	10%	33%
Agilité de production	Standardisation des produits	T1: 40%, T2: 20%, T3: 10%, T4: 15%, T5: 10%, T6: 5%	T1: 50%, T2: 25%, T3: 15%, T4: 5%, T5: 4%, T6: 1%
	Taux du temps de conception	100%	20%
	Fréquence entre les perturbations	2h15	4h30
	Taux de la durée de réaction à la perturbation	100%	5%
Accès aux données	Taux bonne décision (1er coup)	70%	85%
	Taux de la durée de réaction à la perturbation	100%	45%

Connaissance et expertise

$$100 \% - 5 \% = 95 \%$$

Stratégie d'affaires

$$100 \% - 22,1 \% = 77,1 \%$$

Principes du *Lean*

$$\text{Productivité : } 100 \% - 25 \% = 75 \%$$

$$\text{Qualité : } 10 (0,26 * 90) = 33,4 \%$$

Agilité de production

$$\text{Conception : } 100 \% - 80 \% = 20 \%$$

$$\text{Durée perturbation : } 100 \% - 95 \% = 5 \%$$

Temps entre les perturbations :

$$\text{Temps entre les perturbations : } 2h15 * 2 = 4h30 \text{ entre les perturbations}$$

Accès aux données

*Taux de bonnes décisions : $70 + (30 * 0,5) = 85 \%$*

Durée de perturbation : $100 \% - 55 \% = 45 \%$

ANNEXE II

Modèle de simulation

Liste des hypothèses supplémentaires pour le modèle

1. Le modèle ne considère pas le délai d'approvisionnement, il est sous-entendu que le temps d'approvisionnement a été fait préalablement.
2. Le modèle ne considère pas le temps d'entreposage des camions dans la cour arrière mais s'assure que le camion est disponible pour lancer la commande en production.
3. Le délai de sous-traitance pour l'hydraulique n'est pas considéré parce qu'il est fait préalablement au début de production du camion.
4. La contrainte contrôlant l'entrée des commandes est basée sur l'espace disponible en pièce en-cours au poste de découpe.
5. Le traitement des pièces aux postes de préassemblage suit la séquence d'arrivée des pièces.
6. Les pièces pour les options sont fabriquées au besoin dans le modèle, tandis qu'en réalité, elles sont produites en lot.
7. Le modèle considère que les pièces nécessaires à l'installation sont disponibles à partir de la station 3.
8. Les bennes sont livrées directement au client lorsqu'elles sont prêtes.
9. Le modèle ne considère pas que les employés peuvent s'entraider entre les postes.
10. Le modèle ne considère pas le temps supplémentaire que les employés ont la possibilité de faire.

Tableau A2.1 Liste des attributs, variables et expressions

Listes attributs	
Nom	Description
aQTE	Assignation du nombre de benne vendu à un client
aTypeBenne	Style de benne offerte (temps de production reliés)
aNcommande	Assignation d'un numéro de commande pour regrouper le camion à la benne
aTypeCamion	Style de camion offert (temps de production reliés)
aNumeroPiece	Assignation d'un numéro de pièce pour gérer les envois de pièces pré-assembler au différentes stations
Tcreation	Tracker le délai de réaction jusqu'au marché (RECORD)
Tpassage	Tracker le temps de passage des entités (RECORD)
Tfabrication	Tracker le temps de fabrication des entités (RECORD)
aTempsDebutPanne	Valider les pannes du modèle
aTempsFinPanne	Valider les pannes du modèle

Listes variables	
Nom	Description
vQTE	Tableau pour identifier le nombre de benne vendu en fonction de aQTEvendu
vNcommande	Assignation d'un numéro de commande par entrée des bennes
vNbPiece	Tableau avec le nombre de pièces à produire au pré-assemblage selon le type de benne
vNumeroPiece	Assignation d'un numéro de pièce en fonction du nb. De pièce par type de benne
vTempsCellule	Tableau pour les temps de prod des pièces/ numéro de pièce (temps fixes)
vUpTime	Temps sans perturbation dans le système (affectant tous les postes)
vLean	Valeur ON/OFF du préalable
vStrategie	Valeur ON/OFF du préalable
vAgilite	Valeur ON/OFF du préalable
vAccesDonnees	Valeur ON/OFF du préalable
vConnaissance	Valeur ON/OFF du préalable
vConceptionAgilite	Variable de réduction du temps de conception en %
vUptimeAgilite	Variable d'augmentation du temps entre les pannes en %
vDowntimeAgilite	Variable de réduction de la durée des pannes en %
vQualiteLean	Variable de réduction du taux de non qualité %
vProductiviteLean	Variable de réduction du temps de production en %
vProductiviteConnaissance	Variable de réduction du temps de production en %
vAmeliorationDecision	Variable d'amélioration du ratio de bonnes décisions prises
vDecision	Variable incrémentée aléatoirement pour savoir Bonne/mauvaise décision
vDowntimeAccesDonnees	Variable de réduction de la durée des pannes en %
vReductionStrategie	Variable affectant le maximum gain d'amélioration (par réduction %)

Listes expressions	
Nom	Description
eDiscrete	Choix de distribution discrète pour le pourcentage de aTypeBenne
eTempsProd	Tableau pour les temps de prod des bennes/ type de benne (distributions)
eTempsProdcamion	Tableau pour les temps de prod des camion/ type de camion (distributions)

ANNEXE III

Vérification et validation simulation

Le tableau suivant présente les données utilisées pour valider le modèle de simulation.

A3.1 Création d'entités

$$Nb \text{ entité entrants} = \frac{(\text{heures dispo/semaine}) * (\text{Nb de semaine/année})}{\text{Fréquence d'entrée des commandes}}$$

$$Nb \text{ entité entrants} = \frac{(37,5h) * (48 \text{ sem})}{15h} = 120 \text{ entités de commandes}$$

Dans la simulation, un compteur a été ajouté à la suite du module CREATE permettant de compter le nombre d'entités de commande créé dans un an.

Counter				
Count	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average
Counter 1	120.70	6,73	105.00	132.00

Figure A3.1 Compteur d'entités

En comparant :

THÉORIQUE	SIMUL	% d'écart
120	120,7	0,58%

A3.2 Temps de passage à valeur ajoutée

Pour commencer, il faut connaître le nombre moyen de bennes dans une commande, le tableau suivant représente le pourcentage associé à quantités vendues.

QTÉ Benne	% théorique
3	50%
1	30%
20	20%

$$Nb\ de\ benne\ moyen = \sum_{i=1}^3 QTÉ_i * \%_i$$

$$Nb\ de\ benne\ moyen = (3 * 0,5) + (1 * 0,3) + (20 * 0,2) = 5,8\ benne/commande$$

	Design	1		2		3		4		5		6		7		8		9		10		11		12		13	
Type 1	7,7	0	1	0,75	1	0,75	0	0	1	0,2	1,5	0,25	2	0,25	2	0,17	0,17	0,25	0,17	0,25	0	0,33	0				
Type 2	7,7	0	1	0,75	1	0,75	0	0	1	0,2	1,5	0,25	2	0,25	2	0,17	0,17	0,25	0,17	0,25	0						
Type 3	6,3	0	1	0,75	1	0,75	0	0	1	0,2	1,5	0,25	2	0,25	2												
Type 4	11,0	0	1	0,75	1	0,75	0	0	1	0,2	1,5	0,25	2	0,25	2	0,17	0,17	0,25	0,17	0,25	0	0,33	0	0	0	0,42	0,33
Type 5	9,0	0	1	0,75	1	0,75	0	0	1	0,2	1,5	0,25	2	0,25	2	0,17	0,17	0,25	0,17	0,25	0	0,33	0	0	0	0,42	0,33
Type 6	14,0	0	1	0,75	1	0,75	0	0	1	0,2	1,5	0,25	2	0,25	2	0,17	0,17	0,25	0,17	0,25	0	0,33	0	0	0	0,42	0,33
	14	15		16		17		18		19		20		21		22		S1	S2	S3	Inst 1	Inst 2	Rép.	TOTAL (h)			
Type 1																		9	8	6	8,2	8	4,2	56,76183908			
Type 2																		8,5	8	6	8,2	8	4,2	55,93183908			
Type 3																		9	8	6	8,2	8	4,2	55,19195402			
Type 4	1	0	0	0	0,17	0,17	4	0										9	8	8	8,2	8	4,2	65,42655172			
Type 5	1	0	0	0														9	8	8	8,2	8	4,2	60,74172414			
Type 6	1	0	0	0	0,17	0,17	4	0	0	0,25	0	0	0	0	0,25	0,25	0	0	9	8	8	8,2	8	4,2	66,6937931		

En utilisant les temps de production de tous les types de pièces et des stations de la ligne d'assemblage, il est possible de calculer théoriquement le temps de passage à valeur ajouté du système. Pour y arriver, il faut considérer le nombre de pièces nécessaires par type de benne fabriqué.

Les temps totaux représentent le temps moyen que chaque type de benne prend à être fabriqué en incluant le ratio du temps de conception associée à la commande.

$$Temps\ total\ /\ benne = \sum Temps + \frac{Temps\ de\ conception}{Nombre\ moyen\ de\ benne\ /\ commande}$$

Par la suite, il suffit de faire un « Somme.Produit » en fonction du pourcentage de chaque type de benne et le temps total calculé.

aTypebenne	% théorique
1	40%
2	20%
3	10%
4	15%
5	10%
6	5%

$$\begin{aligned} \text{Temps VA} &= (56,76 * 0,4) + (55,93 * 0,2) + (55,19 * 0,1) + (65,43 * 0,15) \\ &\quad + (60,74 * 0,1) + (66,69 * 0,05) \end{aligned}$$

$$\text{Temps VA} = 58,6331 \text{ heures}$$

La simulation sort automatiquement le temps moyen à valeur ajoutée.

Time						
VA Time	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average	Minimum Value	Maximum Value
Camion	58.3871	0.55	57.2944	59.3019	47.4539	86.1602
Entity 1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Figure A3.2. Valeur simulée du temps à valeur ajoutée

En comparant :

THÉORIQUE	SIMUL	% d'écart
58,6331	58,3871	0,42%

A3.3 Pourcentage d'utilisation des ressources

Pour calculer le taux d'utilisation de chaque ressource, il faut connaître le temps investi par chaque employé par benne.

	Nb. employé	Temps de prod/benne	Capacité /poste	Volume prod. annuel	Temps prod. Annuel
Opérateur	1	4,3065	1800	190 u.	818,235
Opérateur soudeur	2	8,964	3600		1703,16
Soudeur	3	23,5	5400		4465
Installateur	3	20,4	5400		3876

Ensuite, il suffit de calculer le taux d'utilisation :

$$\text{Taux d'utilisation} = \frac{\text{Temps prod. annuel}}{\text{capacité du poste}}$$

$$\text{Taux d'utilisation opérateur} = \frac{818,235}{1800} = 0,455$$

La simulation sort les taux d'utilisations instantanées des ressources.

Usage						
Instantaneous Utilization	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average	Minimum Value	Maximum Value
Installateur	0.7211	0.01	0.7021	0.7324	0.00	1.0000
Operateur	0.4591	0.04	0.3837	0.5457	0.00	1.0000
Operateur Soudure	0.5015	0.00	0.4873	0.5075	0.00	1.0000
Soudeur	0.8382	0.01	0.8101	0.8515	0.00	1.0000

Figure A3.3 Taux d'utilisation des ressources simulés

En comparant :

	%Théo	SIMUL %	% écart
Opérateur	0,455	0,4591	1,00%
Opérateur soudeur	0,4731	0,5015	6,00%
Soudeur	0,8269	0,8382	1,37%
Installateur	0,718	0,7211	0,46%

A3.4 Validations préalables, par formule

Variables de calculs pour les préalables	
vlean	Binaire (0 ou 1)
vConnaissance	Binaire (0 ou 1)
vAgilité	Binaire (0 ou 1)
vAccès	Binaire (0 ou 1)
vStratégie	Binaire (0 ou 1)
vProductivitéLean	25%
vQualitéLean	26%
vProductivitéConnaissance	5%
vAméliorationDécision	50%
vDowntimeAccesDonnees	45%
vConceptionAgilité	80%
vUptimeAgilité	100%
vDowntimeAgilité	5%
vRéductionStratégie	77%

Où les valeurs binaires sont :

Valeurs Binaires	Présente	Absente
Lean	1	0
Agilité	1	0
Connaissance	1	0
Accès aux données	1	0
Stratégie d'affaires	0	1

Productivité : (Lean et connaissance)

$$\begin{aligned} & \text{Temps de production} * (1 - ((vLean * vProductivitéLean) \\ & \quad + (vConnaissance * vProductivitéConnaissance))) \end{aligned}$$

Taux de qualité : (Lean)

$$\text{Taux de qualité initial} + ((90 * vLean * vQualitéLean)$$

Taux de bonne décision : (Accès aux données)

$$\text{Taux de bonne décision initial} + (vAccès * vAméliorationDécision * 30)$$

Temps de conception : (Agilité)

$$\text{Temps conception} * (1 - (vAgilité * vConception))$$

Fréquence des perturbations : (Agilité)

$$\begin{aligned} & \text{Fréquence initiale entre les pannes} * (1 + (vAgilité * vUptimeAgilité \\ & \quad * (\text{formule Stratégie}))) \end{aligned}$$

Durée des perturbations : (Agilité et Accès aux données)

$$\begin{aligned} & \text{Tempsmoyendespannes} \\ & \quad * (1 - (vAgilité * vDowntimeAgilité) * (\text{formuleStratégie})) \\ & \quad * (1 - (vAccès * vDowntimeAccès * vDécision) \\ & \quad * (\text{formulestratégie})) \end{aligned}$$

Stratégie d'affaires

$$[\text{Équation Préalable } Y * (1 - (vStratégie * (1 - vRéductionStratégie)))]$$

Préalables et facteurs d'influence	Stratégie d'affaires absente			Stratégie d'affaires présente		
	Valeurs simulées	Valeurs théoriques	% écart	Valeurs simulées	Valeurs théoriques	% écart
1. Lean						
Productivité (T. prod VA)	18,90%	19,28%	1,95%	24,43%	25,00%	2,29%
Qualité (bon)	27,80%	28,04%	0,85%	33,87%	33,40%	1,40%
2. Connaissance						
Productivité (T. prod VA)	4,06%	3,86%	5,20%	4,90%	5,00%	2,01%
Interaction Productivité (1-2)	22,54%	23,13%	2,56%	29,28%	30,00%	2,40%
3. Agilité						
Fréquence des pannes	45,6	46,48	1,89%	54,2	52,5	3,24%
Durées des pannes	0,205	0,202	1,49%	0,038	0,0377	0,80%
4. Accès aux données						
Taux de bonne décision	81,73%	81,57%	0,20%	84,70%	85,00%	0,35%
Durée des pannes	0,4993	0,435	14,78%	0,4089	0,3399	20,30%
Interaction Durée pannes (3-4)	0,1378	0,1164	18,38%	0,0194	0,016998	14,13%

ANNEXE IV

Tableau des résultats par réplication

Exp. #	Réplication #	Temps en valeur ajoutée (h)	Temps de fabrication (h)	Temps de passage (h)	Délai de création (h)	Volume de production (Benues)
1	1	43,49	95,58	590,74	593,41	256
	2	43,07	98,50	648,98	651,98	256
	3	42,72	94,76	693,16	695,96	261
	4	42,98	95,61	651,35	653,84	259
	5	43,00	95,04	529,33	532,11	258
	6	43,53	91,31	480,25	483,07	256
	7	43,96	91,67	456,18	459,42	255
	8	43,38	94,73	526,63	529,59	260
	9	43,40	89,54	500,30	503,12	260
	10	43,76	94,89	661,16	664,36	256
2	1	39,38	85,76	436,61	438,20	282
	2	39,83	86,14	615,69	617,44	284
	3	39,16	86,15	719,53	721,25	284
	4	39,38	87,60	638,31	639,79	285
	5	39,71	87,12	436,41	438,03	284
	6	40,60	84,23	468,21	470,09	282
	7	39,33	83,85	466,53	468,10	279
	8	39,60	86,46	600,12	601,61	283
	9	39,90	84,44	432,67	434,17	286
	10	39,16	84,78	635,89	637,45	285
3	1	44,06	94,10	554,39	557,37	253
	2	43,39	95,47	491,69	494,51	257
	3	43,27	94,58	642,85	645,94	256
	4	43,11	94,74	709,51	712,54	258
	5	43,88	94,73	561,59	564,41	257
	6	43,16	91,22	555,73	558,91	252
	7	43,64	89,08	458,97	461,97	253
	8	42,83	95,74	654,89	657,51	259
	9	43,25	91,82	535,83	538,79	257
	10	43,11	94,86	702,78	705,82	259

Exp. #	Réplication #	Temps en valeur ajoutée (h)	Temps de fabrication (h)	Temps de passage (h)	Délai de création (h)	Volume de production (Benches)
4	1	39,21	84,16	411,47	412,97	281
	2	38,80	86,83	639,76	641,37	286
	3	39,03	86,29	729,07	730,71	283
	4	38,98	88,66	596,51	597,77	282
	5	39,41	86,32	610,60	612,04	284
	6	39,03	85,50	538,43	539,87	279
	7	39,50	84,31	600,14	601,81	280
	8	39,40	86,92	686,91	688,24	284
	9	39,11	86,14	524,38	525,93	283
	10	39,35	85,47	525,97	527,39	286
5	1	45,83	99,05	587,53	590,42	244
	2	44,97	101,06	623,38	626,69	244
	3	44,78	99,41	547,27	549,97	246
	4	44,56	100,30	556,36	558,64	246
	5	45,52	98,11	540,58	543,89	247
	6	46,00	92,49	584,65	587,94	240
	7	46,32	97,76	671,56	674,60	245
	8	46,16	98,12	685,07	688,06	246
	9	44,90	99,12	572,88	576,02	246
	10	45,25	98,75	714,88	717,95	246
6	1	41,87	88,24	448,77	450,15	263
	2	42,05	91,74	431,08	432,73	265
	3	41,59	91,91	769,48	771,11	264
	4	41,98	91,65	574,09	575,27	266
	5	42,09	91,33	419,60	421,15	266
	6	42,31	89,24	562,92	564,44	263
	7	41,77	89,31	548,06	549,71	255
	8	41,78	93,03	644,18	645,63	267
	9	41,52	91,76	495,70	497,24	266
	10	41,85	91,10	537,27	538,53	264

Exp. #	Réplication #	Temps en valeur ajoutée (h)	Temps de fabrication (h)	Temps de passage (h)	Délai de création (h)	Volume de production (Benches)
7	1	45,81	99,12	438,83	487,01	244
	2	45,51	98,61	537,73	541,02	244
	3	46,28	99,71	450,32	453,27	244
	4	45,24	98,70	687,21	690,24	246
	5	45,60	99,87	592,66	595,04	244
	6	44,77	96,14	604,80	607,71	244
	7	45,63	98,64	595,93	599,06	245
	8	45,44	100,49	606,76	610,13	247
	9	44,80	99,14	745,04	747,83	245
	10	45,31	98,96	649,24	652,83	246
8	1	41,66	86,90	563,52	565,12	266
	2	42,35	92,97	470,67	472,21	263
	3	41,98	92,47	718,62	720,26	264
	4	41,56	94,72	686,34	687,77	265
	5	41,72	90,39	476,69	478,38	267
	6	41,88	88,98	547,56	548,95	263
	7	42,10	87,73	362,14	363,68	256
	8	41,99	92,59	591,01	592,59	267
	9	42,11	92,54	462,31	463,93	262
	10	42,18	90,81	585,55	587,15	265
9	1	46,39	95,58	582,25	592,61	253
	2	45,25	95,83	607,68	616,12	253
	3	45,18	97,34	595,29	604,14	252
	4	45,70	96,74	491,33	498,77	253
	5	46,17	90,24	557,45	566,32	255
	6	45,33	90,67	689,71	697,97	250
	7	45,34	94,46	489,10	497,10	250
	8	44,72	90,27	656,29	664,38	255
	9	46,64	90,80	471,57	481,47	255
	10	45,17	93,98	603,13	610,80	254
10	1	42,53	86,07	674,07	682,65	277
	2	42,05	86,69	633,89	643,66	277
	3	40,53	88,63	577,60	585,11	279
	4	40,20	89,32	717,86	724,79	276
	5	40,96	86,67	576,57	584,63	279
	6	42,74	83,31	705,73	714,82	275
	7	42,65	84,82	494,39	503,20	275
	8	40,31	83,93	671,52	678,89	283
	9	41,35	86,31	460,62	468,26	280
	10	41,68	85,94	567,42	575,83	278

Exp. #	Réplication #	Temps en valeur ajoutée (h)	Temps de fabrication (h)	Temps de passage (h)	Délai de création (h)	Volume de production (Benues)
11	1	45,35	94,18	570,79	579,69	250
	2	45,52	95,19	635,01	643,67	250
	3	43,75	98,75	592,16	598,60	249
	4	47,01	94,46	555,45	564,02	252
	5	45,07	91,84	436,28	444,55	250
	6	45,82	91,50	594,15	602,03	252
	7	45,77	92,97	575,37	584,23	242
	8	47,47	91,19	565,22	574,74	251
	9	45,19	90,07	536,46	544,07	243
	10	46,30	93,64	478,44	486,96	252
12	1	41,62	84,88	513,98	521,91	267
	2	40,86	87,58	631,23	639,82	274
	3	42,47	88,12	525,63	534,27	275
	4	41,14	88,29	660,06	667,55	273
	5	41,27	87,36	586,32	593,82	277
	6	42,57	83,92	522,57	531,14	268
	7	41,19	79,79	596,92	604,85	261
	8	41,98	83,00	648,89	657,06	276
	9	41,75	85,30	446,28	454,05	271
	10	42,23	86,92	573,68	582,45	278
13	1	46,76	99,93	814,46	824,24	241
	2	47,44	100,35	679,37	689,24	238
	3	47,42	101,05	512,17	519,51	241
	4	47,04	99,68	690,61	698,13	243
	5	48,97	93,38	647,84	657,52	240
	6	48,38	93,98	565,61	573,98	238
	7	47,74	96,59	579,98	589,28	242
	8	47,35	95,62	702,26	710,20	240
	9	48,80	95,29	635,63	645,43	241
	10	46,33	90,70	621,66	631,34	238
14	1	43,64	91,77	596,12	604,41	261
	2	44,71	93,84	589,12	598,95	256
	3	43,65	94,47	698,53	706,11	258
	4	42,62	94,54	666,29	673,23	261
	5	44,08	91,03	639,45	647,83	260
	6	43,99	91,00	629,09	636,87	258
	7	43,58	89,72	607,12	615,53	256
	8	44,83	88,84	557,48	565,28	260
	9	44,22	85,90	490,70	497,85	264
	10	44,79	91,18	642,37	651,74	258

Exp. #	Réplication #	Temps en valeur ajoutée (h)	Temps de fabrication (h)	Temps de passage (h)	Délai de création (h)	Volume de production (Bennes)
15	1	47,01	98,11	546,57	554,18	236
	2	48,10	101,30	636,67	645,03	235
	3	48,55	100,76	556,79	565,48	239
	4	49,25	99,94	704,52	713,05	236
	5	48,03	99,19	540,40	549,18	239
	6	46,82	99,03	728,94	737,71	241
	7	47,43	99,55	632,56	639,90	234
	8	47,94	96,84	635,93	643,99	238
	9	46,23	96,43	740,10	748,01	239
	10	48,31	98,60	554,09	562,33	238
16	1	43,86	90,12	522,84	531,96	258
	2	44,12	93,48	584,70	592,60	256
	3	44,73	93,98	637,96	646,04	259
	4	44,64	96,14	603,46	610,08	255
	5	45,06	91,53	706,27	715,89	258
	6	45,04	89,12	561,13	569,08	256
	7	44,50	91,99	395,95	403,80	246
	8	45,98	88,78	674,51	683,89	255
	9	44,38	92,64	500,91	508,51	257
	10	44,23	90,19	466,72	476,35	253
17	1	55,18	114,30	650,36	653,99	204
	2	53,68	120,55	621,67	624,90	203
	3	53,69	118,96	683,11	686,20	203
	4	54,20	117,72	659,96	662,59	204
	5	53,46	121,34	693,96	696,51	203
	6	54,09	116,17	528,65	531,68	205
	7	55,33	113,73	590,10	593,30	205
	8	54,61	120,07	727,02	729,70	205
	9	55,08	117,66	721,00	724,32	204
	10	53,63	113,38	468,79	471,71	206
18	1	53,12	116,86	678,95	680,55	208
	2	53,15	116,10	637,55	639,21	208
	3	52,41	118,57	673,51	674,78	209
	4	53,84	115,36	725,53	727,25	209
	5	52,96	116,53	751,30	753,04	208
	6	53,04	113,33	531,96	533,52	212
	7	53,35	113,59	486,35	487,61	209
	8	52,80	116,62	526,83	528,26	209
	9	53,19	112,97	742,34	744,16	210
	10	53,82	115,30	700,70	702,10	208

Exp. #	Réplication #	Temps en valeur ajoutée (h)	Temps de fabrication (h)	Temps de passage (h)	Délai de création (h)	Volume de production (Benues)
19	1	54,79	114,99	641,77	644,56	203
	2	53,69	118,16	686,10	689,61	205
	3	54,73	119,14	791,32	794,26	204
	4	54,29	117,88	745,77	748,32	207
	5	54,46	118,36	635,19	638,16	204
	6	53,59	118,20	718,60	721,26	205
	7	54,01	112,32	475,82	478,83	202
	8	53,63	119,68	601,73	604,58	206
	9	54,62	117,01	647,71	650,79	206
	10	55,50	118,11	354,86	357,81	203
20	1	52,76	115,35	722,41	723,72	209
	2	53,91	116,16	603,47	604,99	205
	3	52,64	115,59	738,26	784,69	209
	4	53,30	115,48	756,53	757,95	210
	5	52,80	115,85	702,06	703,71	209
	6	53,71	112,93	567,40	569,01	209
	7	53,04	115,10	603,62	604,91	207
	8	53,54	116,10	715,91	717,53	208
	9	52,83	114,28	548,53	549,80	208
	10	53,52	115,20	568,24	569,92	208
21	1	56,49	117,96	592,05	594,73	193
	2	55,98	124,36	679,31	682,56	196
	3	56,00	123,26	667,52	670,39	197
	4	57,13	121,42	575,39	578,41	197
	5	56,00	122,01	607,66	610,49	196
	6	57,52	116,59	629,59	632,81	196
	7	55,89	117,62	563,58	566,66	196
	8	55,63	124,43	656,76	659,21	196
	9	57,50	118,28	559,76	563,20	196
	10	56,96	121,90	577,60	580,84	195
22	1	55,45	125,77	670,10	671,10	197
	2	55,98	121,79	752,42	754,20	195
	3	55,23	122,01	663,19	664,54	199
	4	55,68	122,09	613,17	614,46	199
	5	56,16	121,73	690,24	691,86	197
	6	55,39	117,78	650,81	652,48	201
	7	55,31	118,82	621,67	623,15	195
	8	55,85	121,90	659,94	661,43	198
	9	56,41	118,89	664,24	665,81	199
	10	55,94	119,96	564,24	565,77	198

Exp. #	Réplication #	Temps en valeur ajoutée (h)	Temps de fabrication (h)	Temps de passage (h)	Délai de création (h)	Volume de production (Bennes)
23	1	56,68	118,83	635,39	638,49	193
	2	56,43	123,72	730,97	734,07	194
	3	55,67	124,80	624,42	627,17	196
	4	56,34	122,19	668,12	670,96	196
	5	55,71	121,92	658,75	661,48	197
	6	55,74	119,10	710,70	713,51	199
	7	55,75	115,11	501,45	504,13	196
	8	56,04	121,93	713,20	715,86	197
	9	56,22	120,91	619,09	621,71	199
	10	55,64	122,86	633,30	636,08	198
24	1	55,10	124,18	717,17	718,70	199
	2	55,18	122,99	819,11	820,72	197
	3	56,22	120,22	680,09	681,73	198
	4	55,41	121,13	674,72	676,10	201
	5	55,95	121,51	659,52	660,98	198
	6	55,46	120,36	716,84	718,23	196
	7	55,25	117,11	677,61	678,85	194
	8	55,57	123,95	729,02	730,65	199
	9	56,32	119,64	643,76	645,19	199
	10	55,46	120,10	656,81	658,35	198
25	1	55,48	119,34	816,17	825,11	201
	2	57,15	118,68	757,00	766,25	199
	3	57,42	119,42	668,23	676,68	201
	4	56,94	120,67	729,24	737,00	198
	5	57,70	108,08	539,96	548,48	199
	6	55,64	116,13	646,80	653,42	204
	7	56,22	116,45	625,99	632,82	202
	8	59,61	103,53	687,84	697,77	199
	9	57,55	96,94	550,45	558,81	193
	10	56,91	117,77	541,07	549,00	201
26	1	55,31	116,76	768,96	779,98	202
	2	56,15	115,84	680,01	689,18	204
	3	55,24	118,23	686,54	694,22	203
	4	55,99	117,21	682,95	689,90	204
	5	55,31	115,47	610,67	619,67	207
	6	55,19	114,87	638,10	647,15	206
	7	56,36	112,44	557,86	566,53	203
	8	57,02	109,53	645,41	653,81	205
	9	55,57	112,10	509,81	518,51	205
	10	56,04	115,09	483,78	491,88	206

Exp. #	Réplication #	Temps en valeur ajoutée (h)	Temps de fabrication (h)	Temps de passage (h)	Délai de création (h)	Volume de production (Benues)
27	1	57,07	117,62	685,84	693,01	200
	2	57,09	117,72	737,17	746,61	199
	3	55,07	123,21	607,68	613,92	199
	4	56,42	119,72	722,61	729,61	200
	5	58,27	116,77	604,40	613,11	199
	6	56,66	111,41	667,37	675,40	198
	7	56,72	116,13	587,71	596,69	200
	8	57,42	107,92	755,76	763,57	198
	9	56,44	115,13	539,91	548,60	199
	10	55,55	118,76	778,42	787,51	199
28	1	55,53	116,33	617,85	627,39	197
	2	55,67	116,75	755,85	765,79	201
	3	53,80	119,21	692,26	699,33	207
	4	56,31	117,28	744,16	752,03	202
	5	57,14	114,79	615,12	623,65	203
	6	56,09	110,35	570,93	578,60	202
	7	56,61	111,24	676,29	685,45	200
	8	58,72	109,72	741,61	750,59	200
	9	54,86	115,77	659,35	667,86	202
	10	55,00	114,14	641,21	650,09	194
29	1	58,91	123,31	575,30	583,66	191
	2	58,74	124,79	578,78	588,32	191
	3	59,52	122,52	723,46	732,04	193
	4	58,69	123,04	617,02	624,48	193
	5	57,44	119,40	753,58	761,97	197
	6	58,40	119,84	586,70	593,89	191
	7	59,33	121,03	663,65	672,12	193
	8	58,82	115,56	739,99	748,00	194
	9	59,17	116,95	459,35	467,48	194
	10	58,43	122,22	683,14	690,94	192
30	1	58,60	123,68	727,77	736,73	193
	2	57,75	121,43	695,79	704,90	196
	3	58,25	122,93	783,13	790,29	194
	4	58,90	123,02	712,65	720,40	194
	5	56,94	123,12	636,21	643,65	197
	6	58,07	120,36	668,11	675,96	192
	7	57,37	120,13	615,71	623,50	192
	8	60,98	115,47	675,68	684,49	194
	9	58,05	121,14	645,09	653,25	194
	10	58,03	122,95	666,98	674,78	195

Exp. #	Réplication #	Temps en valeur ajoutée (h)	Temps de fabrication (h)	Temps de passage (h)	Délai de création (h)	Volume de production (Benches)
31	1	59,09	121,79	556,57	565,10	189
	2	59,30	122,53	456,99	465,07	191
	3	59,17	123,89	678,99	688,19	191
	4	57,47	124,61	729,18	736,91	193
	5	58,84	122,08	569,33	578,26	192
	6	58,59	118,74	647,18	654,70	189
	7	57,40	120,14	620,83	630,02	186
	8	58,69	116,04	803,77	812,29	191
	9	57,29	117,01	593,44	601,05	191
	10	58,03	122,24	740,36	748,17	192
32	1	59,09	121,79	556,57	565,10	189
	2	59,30	122,53	456,99	465,07	191
	3	59,17	123,89	678,99	688,19	191
	4	57,47	124,61	729,18	736,91	193
	5	58,84	122,08	569,33	578,26	192
	6	58,59	118,74	647,18	654,70	189
	7	57,40	120,14	620,83	630,02	186
	8	58,69	116,04	803,77	812,29	191
	9	57,29	117,01	593,44	601,05	191
	10	58,03	122,24	740,36	748,17	192

ANNEXE V

ANOVA

A5.1 Analyse de variance pour le temps de fabrication

Analyse de variance					
Source	DL	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
Lean	1	54353,2	54353,2	6918,98	0,000
Agilite	1	17,8	17,8	2,27	0,133
Connaissance	1	2155,6	2155,6	274,40	0,000
Acces	1	6,7	6,7	0,86	0,356
Strategies	1	1257,5	1257,5	160,07	0,000
Lean*Agilite	1	6,5	6,5	0,83	0,363
Lean*Connaissance	1	3,8	3,8	0,48	0,489
Lean*Acces	1	0,0	0,0	0,00	0,944
Lean*Strategies	1	957,3	957,3	121,86	0,000
Agilite*Connaissance	1	12,2	12,2	1,55	0,213
Agilite*Acces	1	3,9	3,9	0,50	0,482
Agilite*Strategies	1	15,8	15,8	2,01	0,157
Connaissance*Acces	1	1,5	1,5	0,19	0,664
Connaissance*Strategies	1	25,6	25,6	3,26	0,072
Acces*Strategies	1	10,6	10,6	1,34	0,247
Erreur	304	2388,1	7,9		
Inadéquation de l'ajustement	16	72,2	4,5	0,56	0,911
Erreur pure	288	2315,9	8,0		
Total	319	61216,1			

A5.2 Analyse de variance pour le temps de passage

Analyse de variance					
Source	DL	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
Lean	1	351849	351849	49,58	0,000
Agilite	1	15582	15582	2,20	0,139
Connaissance	1	8763	8763	1,23	0,267
Acces	1	106	106	0,01	0,903
Strategies	1	526	526	0,07	0,786
Lean*Agilite	1	5136	5136	0,72	0,396
Lean*Connaissance	1	3919	3919	0,55	0,458
Lean*Acces	1	10223	10223	1,44	0,231
Lean*Strategies	1	33555	33555	4,73	0,030
Agilite*Connaissance	1	1658	1658	0,23	0,629
Agilite*Acces	1	16403	16403	2,31	0,129
Agilite*Strategies	1	67	67	0,01	0,923
Connaissance*Acces	1	2799	2799	0,39	0,530
Connaissance*Strategies	1	2894	2894	0,41	0,524
Acces*Strategies	1	15	15	0,00	0,963
Erreur	304	2157401	7097		
Inadéquation de l'ajustement	16	109870	6867	0,97	0,494
Erreur pure	288	2047530	7109		
Total	319	2610897			

A5.3 Analyse de variance pour le délai de réaction

Analyse de variance					
Source	DL	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
Lean	1	351409	351409	49,58	0,000
Agilite	1	30421	30421	4,29	0,039
Connaissance	1	8724	8724	1,23	0,268
Acces	1	219	219	0,03	0,861
Strategies	1	876	876	0,12	0,725
Lean*Agilite	1	5144	5144	0,73	0,395
Lean*Connaissance	1	4694	4694	0,66	0,416
Lean*Acces	1	10282	10282	1,45	0,229
Lean*Strategies	1	35836	35836	5,06	0,025
Agilite*Connaissance	1	1644	1644	0,23	0,630
Agilite*Acces	1	17778	17778	2,51	0,114
Agilite*Strategies	1	4	4	0,00	0,982
Connaissance*Acces	1	2764	2764	0,39	0,533
Connaissance*Strategies	1	3547	3547	0,50	0,480
Acces*Strategies	1	22	22	0,00	0,956
Erreur	304	2154588	7087		
Inadéquation de l'ajustement	16	107281	6705	0,94	0,520
Erreur pure	288	2047307	7109		
Total	319	2627953			

A5.4 Analyse de variance pour le volume de production

Analyse de variance					
Source	DL	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
Lean	1	285486	285486	48595,66	0,000
Agilite	1	2832	2832	482,10	0,000
Connaissance	1	12030	12030	2047,68	0,000
Acces	1	259	259	44,12	0,000
Strategies	1	11810	11810	2010,28	0,000
Lean*Agilite	1	42	42	7,16	0,008
Lean*Connaissance	1	726	726	123,58	0,000
Lean*Acces	1	24	24	4,12	0,043
Lean*Strategies	1	7527	7527	1281,29	0,000
Agilite*Connaissance	1	6	6	1,03	0,311
Agilite*Acces	1	189	189	32,19	0,000
Agilite*Strategies	1	30	30	5,11	0,025
Connaissance*Acces	1	7	7	1,23	0,269
Connaissance*Strategies	1	405	405	68,94	0,000
Acces*Strategies	1	21	21	3,58	0,060
Erreur	304	1786	6		
Inadéquation de l'ajustement	16	128	8	1,39	0,147
Erreur pure	288	1658	6		
Total	319	323180			

ANNEXE VI

Résultats tests du Tukey

A6.1 Test de Tukey pour le temps de fabrication

Comparaisons deux à deux de Tukey : réponse = Temps FAB, terme = Lean

Informations de groupement avec la méthode de Tukey et un niveau de confiance de 95 %

Lean	N	Moyenne	Groupement
0	160	118,323	A
1	160	92,257	B

Comparaisons deux à deux de Tukey : réponse = Temps FAB, terme = Agilite

Informations de groupement avec la méthode de Tukey et un niveau de confiance de 95 %

Agilite	N	Moyenne	Groupement
1	160	105,526	A
0	160	105,054	A

Comparaisons deux à deux de Tukey : réponse = Temps FAB, terme = Connaissance

Informations de groupement avec la méthode de Tukey et un niveau de confiance de 95 %

Connaissance	N	Moyenne	Groupement
0	160	107,886	A
1	160	102,695	B

Comparaisons deux à deux de Tukey : réponse = Temps FAB, terme = Acces

Informations de groupement avec la méthode de Tukey et un niveau de confiance de 95 %

Acces	N	Moyenne	Groupement
0	160	105,435	A
1	160	105,145	A

Comparaisons deux à deux de Tukey : réponse = Temps FAB, terme = Strategies

Informations de groupement avec la méthode de Tukey et un niveau de confiance de 95 %

Strategies	N	Moyenne	Groupement
0	160	107,273	A
1	160	103,308	B

Comparaisons deux à deux de Tukey : réponse = Temps FAB, terme = Lean*Strategies

Informations de groupement avec la méthode de Tukey et un niveau de confiance de 95 %

Lean*Strategies	N	Moyenne	Groupement
0 0	80	118,576	A
0 1	80	118,070	A
1 0	80	95,969	B
1 1	80	88,545	C

Comparaisons deux à deux de Tukey : réponse = Temps FAB, terme = Agilite*Strategies

Informations de groupement avec la méthode de Tukey et un niveau de confiance de 95 %

Agilite*Strategies	N	Moyenne	Groupement
1 0	80	107,731	A
0 0	80	106,815	A
1 1	80	103,322	B
0 1	80	103,294	B

Comparaisons deux à deux de Tukey : réponse = Temps FAB, terme = Connaissance*Strategies

Informations de groupement avec la méthode de Tukey et un niveau de confiance de 95 %

Connaissance*Strategies	N	Moyenne	Groupement
0 0	80	109,585	A
0 1	80	106,186	B
1 0	80	104,960	C
1 1	80	100,430	D

Comparaisons deux à deux de Tukey : réponse = Temps FAB, terme = Acces*Strategies

Informations de groupement avec la méthode de Tukey et un niveau de confiance de 95 %

Acces*Strategies	N	Moyenne	Groupement
0 0	80	107,599	A
1 0	80	106,946	A
1 1	80	103,345	B
0 1	80	103,271	B

A6.2 Test de Tukey pour le temps de passage**Comparaisons deux à deux de Tukey : réponse = Temps passage, terme = Lean**

Informations de groupement avec la méthode de Tukey et un niveau de confiance de 95 %

Lean	N	Moyenne	Groupement
0	160	649,900	A
1	160	583,581	B

Comparaisons deux à deux de Tukey : réponse = Temps passage, terme = Agilite

Informations de groupement avec la méthode de Tukey et un niveau de confiance de 95 %

Agilite	N	Moyenne	Groupement
0	160	623,718	A
1	160	609,762	A

Comparaisons deux à deux de Tukey : réponse = Temps passage, terme = Connaissance

Informations de groupement avec la méthode de Tukey et un niveau de confiance de 95 %

Connaissance	N	Moyenne	Groupement
0	160	621,974	A
1	160	611,507	A

Comparaisons deux à deux de Tukey : réponse = Temps passage, terme = Acces

Informations de groupement avec la méthode de Tukey et un niveau de confiance de 95 %

Acces	N	Moyenne	Groupement
0	160	617,315	A
1	160	616,166	A

Comparaisons deux à deux de Tukey : réponse = Temps passage, terme = Strategies

Informations de groupement avec la méthode de Tukey et un niveau de confiance de 95 %

Strategies	N	Moyenne	Groupement
0	160	618,023	A
1	160	615,458	A

Comparaisons deux à deux de Tukey : réponse = Temps passage, terme = Lean*Strategies

Informations de groupement avec la méthode de Tukey et un niveau de confiance de 95 %

Lean*Strategies	N	Moyenne	Groupement
0 1	80	658,857	A
0 0	80	640,942	A
1 0	80	595,103	B
1 1	80	572,059	B

Comparaisons deux à deux de Tukey : réponse = Temps passage, terme = Agilite*Strategies

Informations de groupement avec la méthode de Tukey et un niveau de confiance de 95 %

Agilite*Strategies	N	Moyenne	Groupement
0 0	80	625,456	A
0 1	80	621,980	A
1 0	80	610,589	A
1 1	80	608,936	A

Comparaisons deux à deux de Tukey : réponse = Temps passage, terme = Connaissance*Strategies

Informations de groupement avec la méthode de Tukey et un niveau de confiance de 95 %

Connaissance*Strategies	N	Moyenne	Groupement
0 0	80	626,263	A
0 1	80	617,684	A
1 1	80	613,233	A
1 0	80	609,782	A

Comparaisons deux à deux de Tukey : réponse = Temps passage, terme = Acces*Strategies

Informations de groupement avec la méthode de Tukey et un niveau de confiance de 95 %

Acces*Strategies	N	Moyenne	Groupement
0 0	80	618,380	A
1 0	80	617,665	A
0 1	80	616,250	A
1 1	80	614,666	A

Comparaisons deux à deux de Tukey : réponse = Temps passage, terme = Agilite*Acces

Informations de groupement avec la méthode de Tukey et un niveau de confiance de 95 %

Agilite*Acces	N	Moyenne	Groupement
0 1	80	630,303	A
1 0	80	617,497	A
0 0	80	617,134	A
1 1	80	602,028	A

A6.3 Test de Tukey pour le délai de création
Comparaisons deux à deux de Tukey : réponse = Delai creation, terme = Lean

Informations de groupement avec la méthode de Tukey et un niveau de confiance de 95 %

Lean	N	Moyenne	Groupement
0	160	655,451	A
1	160	589,174	B

Comparaisons deux à deux de Tukey : réponse = Delai creation, terme = Agilite

Informations de groupement avec la méthode de Tukey et un niveau de confiance de 95 %

Agilite	N	Moyenne	Groupement
0	160	632,063	A
1	160	612,563	B

Comparaisons deux à deux de Tukey : réponse = Delai creation, terme = Connaissance

Informations de groupement avec la méthode de Tukey et un niveau de confiance de 95 %

Connaissance	N	Moyenne	Groupement
0	160	627,534	A
1	160	617,091	A

Comparaisons deux à deux de Tukey : réponse = Delai creation, terme = Acces

Informations de groupement avec la méthode de Tukey et un niveau de confiance de 95 %

Acces	N	Moyenne	Groupement
0	160	623,139	A
1	160	621,486	A

Comparaisons deux à deux de Tukey : réponse = Delai creation, terme = Strategies

Informations de groupement avec la méthode de Tukey et un niveau de confiance de 95 %

Strategies	N	Moyenne	Groupement
0	160	623,967	A
1	160	620,658	A

Comparaisons deux à deux de Tukey : réponse = Delai creation, terme = Lean*Strategies

Informations de groupement avec la méthode de Tukey et un niveau de confiance de 95 %

Lean*Strategies	N	Moyenne	Groupement
0 1	80	664,379	A
0 0	80	646,523	A
1 0	80	601,412	B
1 1	80	576,937	B

Comparaisons deux à deux de Tukey : réponse = Delai creation, terme = Agilite*Strategies

Informations de groupement avec la méthode de Tukey et un niveau de confiance de 95 %

Agilite*Strategies	N	Moyenne	Groupement
0 0	80	633,825	A
0 1	80	630,301	A
1 0	80	614,110	A
1 1	80	611,016	A

Comparaisons deux à deux de Tukey : réponse = Delai creation, terme = Connaissance*Strategies

Informations de groupement avec la méthode de Tukey et un niveau de confiance de 95 %

Connaissance*Strategies	N	Moyenne	Groupement
0 0	80	632,518	A
0 1	80	622,550	A
1 1	80	618,766	A
1 0	80	615,417	A

Comparaisons deux à deux de Tukey : réponse = Temps passage, terme = Acces*Strategies

Informations de groupement avec la méthode de Tukey et un niveau de confiance de 95 %

Acces*Strategies	N	Moyenne	Groupement
0 0	80	618,380	A
1 0	80	617,665	A
0 1	80	616,250	A
1 1	80	614,666	A

Comparaisons deux à deux de Tukey : réponse = Delai creation, terme = Agilite*Acces

Informations de groupement avec la méthode de Tukey et un niveau de confiance de 95 %

Agilite*Acces	N	Moyenne	Groupement
0 1	80	638,690	A
0 0	80	625,436	A
1 0	80	620,843	A
1 1	80	604,283	B

A6.4 Test de Tukey pour le volume de production

Comparaisons deux à deux de Tukey : réponse = Volume prod, terme = Lean

Informations de groupement avec la méthode de Tukey et un niveau de confiance de 95 %

Lean	N	Moyenne	Groupement
1	160	258,863	A
0	160	199,125	B

Comparaisons deux à deux de Tukey : réponse = Volume prod, terme = Agilite

Informations de groupement avec la méthode de Tukey et un niveau de confiance de 95 %

Agilite	N	Moyenne	Groupement
1	160	231,969	A
0	160	226,019	B

Comparaisons deux à deux de Tukey : réponse = Volume prod, terme = Connaissance

Informations de groupement avec la méthode de Tukey et un niveau de confiance de 95 %

Connaissance	N	Moyenne	Groupement
1	160	235,125	A
0	160	222,862	B

Comparaisons deux à deux de Tukey : réponse = Volume prod, terme = Acces

Informations de groupement avec la méthode de Tukey et un niveau de confiance de 95 %

Acces	N	Moyenne	Groupement
1	160	229,894	A
0	160	228,094	B

Comparaisons deux à deux de Tukey : réponse = Volume prod, terme = Strategies

Informations de groupement avec la méthode de Tukey et un niveau de confiance de 95 %

Strategies	N	Moyenne	Groupement
1	160	235,069	A
0	160	222,919	B

Comparaisons deux à deux de Tukey : réponse = Volume prod, terme = Lean*Strategies

Informations de groupement avec la méthode de Tukey et un niveau de confiance de 95 %

Lean*Strategies	N	Moyenne	Groupement
1 1	80	269,788	A
1 0	80	247,938	B
0 1	80	200,350	C
0 0	80	197,900	D

Comparaisons deux à deux de Tukey : réponse = Volume prod, terme = Agile*Strategies

Informations de groupement avec la méthode de Tukey et un niveau de confiance de 95 %

Agilite*Strategies	N	Moyenne	Groupement
1 1	80	238,350	A
0 1	80	231,787	B
1 0	80	225,587	C
0 0	80	220,250	D

Comparaisons deux à deux de Tukey : réponse = Volume prod, terme = Connaissance*Strategies

Informations de groupement avec la méthode de Tukey et un niveau de confiance de 95 %

Connaissance*Strategies	N	Moyenne	Groupement
1 1	80	242,325	A
1 0	80	227,925	B
0 1	80	227,813	B
0 0	80	217,912	C

Comparaisons deux à deux de Tukey : réponse = Volume prod, terme = Agile*Strategies

Informations de groupement avec la méthode de Tukey et un niveau de confiance de 95 %

Agilite*Strategies	N	Moyenne	Groupement
1 1	80	238,350	A
0 1	80	231,787	B
1 0	80	225,587	C
0 0	80	220,250	D

Comparaisons deux à deux de Tukey : réponse = Volume prod, terme = Lean*Agilite

Informations de groupement avec la méthode de Tukey et un niveau de confiance de 95 %

Lean*Agilite	N	Moyenne	Groupement
1 1	80	262,200	A
1 0	80	255,525	B
0 1	80	201,737	C
0 0	80	196,512	D

Comparaisons deux à deux de Tukey : réponse = Volume prod, terme = Lean*Connaissance

Informations de groupement avec la méthode de Tukey et un niveau de confiance de 95 %

Lean*Connaissance	N	Moyenne	Groupement
1 1	80	266,500	A
1 0	80	251,225	B
0 1	80	203,750	C
0 0	80	194,500	D

Comparaisons deux à deux de Tukey : réponse = Volume prod, terme = Lean*Acces

Informations de groupement avec la méthode de Tukey et un niveau de confiance de 95 %

Lean*Acces	N	Moyenne	Groupement
1 1	80	260,037	A
1 0	80	257,688	B
0 1	80	199,750	C
0 0	80	198,500	D

Comparaisons deux à deux de Tukey : réponse = Volume prod, terme = Agilite*Acces

Informations de groupement avec la méthode de Tukey et un niveau de confiance de 95 %

Agilite*Acces	N	Moyenne	Groupement
1 1	80	232,100	A
1 0	80	231,837	A
0 1	80	227,688	B
0 0	80	224,350	C

ANNEXE VII

Gantt préliminaire du projet MITACS

[illegible]