

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

IMPACT DE L'IMPLANTATION DE PRINCIPE ET D'OUTIL DU 4.0 ET DE
L'AGILITÉ DANS UNE PME QUÉBÉCOISE – ÉTUDE PAR SIMULATION

MÉMOIRE PRÉSENTÉ
COMME EXIGENCE PARTIELLE DE LA
MAÎTRISE EN GÉNIE INDUSTRIEL

PAR
SAMIR ABDULNOUR

MAI 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 :

Chantal Baril, codirectrice de recherche, Ph.D.

UQTR

Georges Abdul-Nour, codirecteur de recherche, Ph.D.

UQTR

Jury d'évaluation du mémoire :

Chantal Baril, Ph.D.

UQTR

Sébastien Gamache, Ph.D.

UQTR

Abdessamad Kobi

Polytec-Angers

REMERCIEMENTS

Avant toute chose, il est nécessaire de remercier les différents acteurs qui ont contribué à la complétion de ce mémoire. Dans un premier temps, j'aimerais remercier du plus profond de mon cœur celui qui m'a le plus encouragé à effectuer ce travail colossal, le Dr Georges Abdul-Nour, codirecteur de recherche et père de famille incroyable. Je te remercie de m'avoir inculqué les valeurs fondamentales de l'éducation et l'importance de la recherche scientifique. Merci de m'avoir supporté à travers cette aventure malgré les sautes d'humeur et les moments difficiles. Finalement, merci de m'avoir soutenu et aidé à passer à travers toutes ces épreuves.

Dans un second temps, j'aimerais remercier ma deuxième codirectrice, Dre Chantal Baril. Sans ton aide et ta passion pour la simulation, il m'aurait été difficile d'effectuer ce travail de recherche. Tes conseils judicieux m'ont permis d'améliorer mes compétences en simulation et de développer des outils pour répondre à mes interrogations. Que ce soit pendant la semaine, la fin de semaine, le matin ou le soir, tu étais toujours disponible pour répondre à mes questions. Pour cela, sachant mon côté impatient et ma soif de réponse, je te remercie du plus profond de mon cœur. Aussi, un remerciement particulier à Hélène Milette qui, malgré sa retraite, a accepté de répondre à certaines de mes questions un peu plus techniques. Ton écoute et ta grande expérience auront contribué au succès de ce travail.

Également, j'aimerais remercier ma famille et mes amis qui m'ont supporté moralement tout au long de cette aventure. Bien sûr, un énorme remerciement à l'entreprise qui m'a permis d'effectuer cette recherche dans un milieu stimulant et manufacturier. Pour terminer, je remercie Catherine Hayes-Châteauneuf, ma femme et meilleure amie, pour son soutien incommensurable. Pour tout ce que vous avez pu m'apporter, que ce soit directement ou indirectement, merci à vous tous.

SOMMAIRE

La transition d'une production de masse vers une production de masse personnalisée entraîne son lot de défis pour les entreprises. Pour répondre à ces changements, la quatrième révolution industrielle, appelée 4.0, apporte aux PME de nouveaux outils et de nouveaux principes pour conserver et augmenter leurs avantages concurrentiels. L'industrie 4.0 étant encore récente dans le monde des industries, ce sont davantage les grandes entreprises qui en bénéficient pour le moment. Mais qu'en est-il des petites et moyennes entreprises, cœur de l'industrie mondiale? Cette étude vise à approfondir les connaissances portant sur l'industrie 4.0 et les PME. Plus précisément, l'objectif de cette recherche porte sur l'impact de l'implantation de l'agilité, des outils et des principes du 4.0 sur une ligne de production de structure de cubes d'ambulance. Une étude de cas dans une PME québécoise est utilisée pour valider les résultats de la simulation. Le logiciel Arena de Rockwell est utilisé pour simuler différents scénarios permettant d'analyser les impacts des variables à l'étude.

Pour déterminer la méthodologie (la simulation), les variables et les mesures de performance, une revue de la littérature a été effectuée. De cette revue, sept variables ont été retenues : l'aménagement, la conception modulaire, la robotisation, l'équilibrage de ligne, l'automatisation modulaire, le *lean* et les systèmes de communication. Les deux dernières variables mentionnées sont déjà implantées dans l'entreprise et leurs résultats ont été utilisés dans le modèle de simulation. C'est avec l'aide de la revue de littérature et par expérimentation dans l'entreprise que leur impact a été évalué. Les mesures de performance choisies pour comparer les différentes solutions sont le temps de passage et le nombre de structures fabriquées par semaine. Un plan d'expérience Taguchi L16 et des analyses de variance ont été effectués pour déterminer les facteurs significatifs au seuil de α égale à 5 %.

Dans un premier temps, un modèle de simulation de l'état actuel a été construit afin de valider sa précision. Ce modèle représente la ligne de production réelle avec les données historiques fournies par l'entreprise. Une fois le modèle actuel validé, des modèles de simulation, incluant les différentes variables à l'étude, ont été construits pour vérifier leur impact sur la productivité de la ligne. Les résultats démontrent que toutes les variables à l'étude sont significatives à l'exception de l'équilibrage de la ligne. Toutefois, comme l'entreprise utilisait déjà les principes d'équilibrage naturel et de matrice de compétence, cela peut expliquer pourquoi ce facteur est sorti non significatif dans cette étude.

L'expérimentation simulant la ligne avec des plateformes et des modules standards, des cellules dynamiques, l'utilisation de robot et de cobot est la meilleure solution. Elle permet de diminuer le temps de passage de près de 28 heures, soit près de 20 %, et d'augmenter la production d'environ une structure par semaine (de 5,8 à 6,8), soit près de 18 %.

Mots-clés : 4.0, usine intelligente, structure modulaire, conception modulaire, cellule dynamique, cobot, automatisation modulaire, « assemblage d'ambulance », flexibilité, agilité.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	iv
SOMMAIRE	v
TABLE DES MATIÈRES	vii
LISTE DES TABLEAUX.....	x
LISTE DES FIGURES.....	xii
CHAPITRE 1 - INTRODUCTION.....	1
1.1 Nouveau paradigme.....	1
1.2 Problématique.....	2
1.3 Question de recherche	2
1.4 Objectif principal.....	3
1.5 Objectif secondaire.....	4
1.6 Concepts importants	4
1.6.1 Productivité	4
1.6.2 Agilité.....	4
1.6.3 Flexibilité	5
1.7 Mesure de performance	5
1.8 Conclusion.....	5
CHAPITRE 2 - REVUE DE LITTÉRATURE	7
2.1 Historique et origine de l'industrie 4.0.....	8
2.2 Définition de l'industrie 4.0	10
2.3 Principes et outils du 4.0	10

2.3.1 Internet des objets (IOT) – principe de design.....	13
2.3.2 Système cyberphysique (CPS) – outil.....	14
2.3.3 Usine intelligente – principe de design	15
2.3.4 Modularité – principe de design.....	17
2.3.5 Mégadonnées – outil	18
2.3.6 Infonuagique – outil	19
2.3.7 Automatisation et robotisation – outil.....	19
2.3.8 Simulation – outil.....	20
2.3.9 Réalité augmentée – outil.....	21
2.3.10 Virtualisation – principe de design	21
2.4 Les PME et la quatrième révolution industrielle.....	22
2.4.1 Définition et caractéristique de la PME	22
2.4.2 Force et faiblesses des PME.....	23
2.4.3 PME et 4.0 – Standardisation et modularité (produit)	25
2.4.4 PME et 4.0 – Standardisation et modularité (cellule dynamique)	27
2.4.5 PME et 4.0 – Standardisation et modularité (processus)	28
2.4.6 PME et 4.0 – Standardisation et modularité (ligne mixte).....	29
2.4.7 PME et 4.0 – Productivité, flexibilité et agilité.....	31
2.4.8 Stratégie d’implantation du 4.0 dans les PME	34
2.5 Matrice de la revue de littérature.....	38
2.5.1 Tableaux récapitulatifs de la matrice de revue de littérature	38
2.5.2 Analyse de la revue de littérature	40

CHAPITRE 3 - MÉTHODOLOGIE	43
3.1 Interventions <i>lean</i> et 4.0 en PME	43
3.1.1 Description de la ligne d'assemblage et ses améliorations	43
3.1.2 Mise en place d'une stratégie d'implantation du 4.0	48
3.2 Modèle de simulation	49
3.2.1 Données de simulation	53
3.2.2 Hypothèses limitatives	56
3.2.3 Régime permanent	57
3.2.4 Validation du modèle de simulation	58
3.3 Choix des variables et de leur niveau	59
3.4 Modèles mathématiques	61
3.5 Hypothèses statistiques.....	61
3.6 Plan d'expérimentation L16	64
CHAPITRE 4 - RÉSULTAT ET DISCUSSION	70
4.1 Analyse graphique du plan Taguchi L16	70
4.2 Analyse de variance du plan Taguchi L16	71
4.3 Analyse de variance sur le modèle linéaire général	73
4.4 Analyse des résultats	74
CHAPITRE 5 - CONCLUSION	78
RÉFÉRENCES.....	81
ANNEXE I	88
ANNEXE II.....	94
ANNEXE III	103

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1	Concept et mesure de performance.....	5
Tableau 2.1	Fréquence de citation des principes de design dans la littérature (Ghobakhloo, 2018)	12
Tableau 2.2	Fréquence de citation des outils dans la littérature (Ghobakhloo, 2018).....	12
Tableau 2.3	Forces et faiblesses de la PME	24
Tableau 2.4	Catégorie et définition des types de flexibilité (Abdul-Nour, 2014) ...	32
Tableau 2.5	Définition des cinq facettes de l'agilité (Matthiae & Richter, 2018) ...	34
Tableau 2.6	Traduction de la figure 10.....	37
Tableau 2.7	Exemple de matrice de la revue de littérature.....	38
Tableau 2.8	Variable indépendante en ordre décroissant de fréquence d'utilisation dans la revue de littérature.....	41
Tableau 2.9	Méthodologie en ordre décroissant de fréquence d'utilisation dans la revue de littérature	42
Tableau 3.1	Résultat de l'analyse Pareto des commandes des différents modèles de structure	51
Tableau 3.2	Résultat de l'analyse Pareto après élimination des modèles considérés négligeables	52
Tableau 3.3	Facteur et niveaux.....	60
Tableau 3.4	Changements apportés aux facteurs dans le modèle de simulation selon leur niveau	63
Tableau 3.5	Plan Taguchi L16, variables et niveaux (1,2)	65
Tableau 3.6	Tableau Taguchi L16, signification des niveaux	67
Tableau 3.7	Réponse et « <i>half width</i> » en fonction du nombre de réplications.....	68
Tableau 4.1	Analyse de variance, avec interactions, des facteurs A à E.....	71
Tableau 4.2	Analyse de variance, sans interactions, des facteurs A à E	72
Tableau 4.3	ANOVA sur le modèle linéaire général.....	73
Tableau 4.4	Tableau récapitulatif de l'analyse des résultats	75

Tableau AII.1	Matrice de la revue de littérature (Tableau 2.2).....	95
Tableau AII.2	Matrice de la revue de littérature (Tableau 2.3).....	96
Tableau AII.3	Matrice de la revue de littérature (Tableau 2.4).....	97
Tableau AII.4	Matrice de la revue de littérature (Tableau 2.5).....	98
Tableau AII.5	Matrice de la revue de littérature (Tableau 2.6).....	99
Tableau AII.6	Matrice de la revue de littérature (Tableau 2.7).....	100
Tableau AII.7	Matrice de la revue de littérature (Tableau 2.8).....	101
Tableau AII.8	Matrice de la revue de littérature (Tableau 2.9).....	102

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1	Structure de la revue de littérature	8
Figure 2.2	Les quatre révolutions industrielles (MESI, 2016)	9
Figure 2.3	Outils relatifs au 4.0 (Kaggerman, & al., 2013)	11
Figure 2.4	Représentation d'une usine intelligente (Boisvert, 2017)	15
Figure 2.5	Quatre niveaux de capacité du 4.0 (Beaudoin, et al., 2016)	16
Figure 2.6	Estimé des ventes annuelles de robots 2009-2017 et prévision des ventes 2018*-2021* (International Federation of Robotics, 2018)	20
Figure 2.7	Exemple de produit modularisé (Commons Transition, 2014)	26
Figure 2.8	Représentation d'une ligne d'assemblage mixte en fonction du temps (MMAL)	30
Figure 2.9	Échelle adaptée par Gamache du modèle originale retrouvé dans Beaudoin et al. (Gamache, 2019)	35
Figure 2.10	Cadre analytique des auteurs (Moeuf, & al., 2018)	36
Figure 2.11	Diagramme d'Ishikawa des variables affectant la productivité d'une ligne d'assemblage	40
Figure 3.1	Processus de la ligne de production	44
Figure 3.2	Modèle de simulation	50
Figure 3.3	Exemple de tableau de vérification de données	54
Figure 3.4	Exemple de distribution tiré de l' <i>input analyzer</i> d'Arena	55
Figure 3.5	Régime permanent - graphique obtenu de l' <i>output analyzer</i> d'Arena	57
Figure 3.6	Attribution des interactions aux colonnes du plan Taguchi L16	66
Figure 4.1	Effets principaux des facteurs sur le temps de passage	70
Figure AIII.1	Schéma détaillée d'une usine 4.0 (Frazzon, & al., 2018)	104

CHAPITRE 1 - INTRODUCTION

1.1 Nouveau paradigme

En 2011, le gouvernement allemand a pris l'initiative de regrouper un « ensemble de technologies et de concepts liés à la réorganisation de la chaîne de valeur » dans le but de lancer une nouvelle révolution industrielle. Un nouveau paradigme permettant aux entreprises d'augmenter leur productivité et leur compétitivité. C'est le début de la « quatrième révolution industrielle » connue sous l'appellation « Industrie 4.0 ». Ce mouvement de modernisation des entreprises « s'appuie sur la communication en temps réel pour surveiller et agir sur les systèmes physiques » de l'entreprise. Pour ce faire, le gouvernement allemand, aidé d'universitaires, a misé sur la montée de l'internet pour connecter ses différents systèmes via ce qu'on appelle l'internet des objets. (Danjou, Pellerin, & Rivest, 2017).

Une fois cette connexion établie, les différents systèmes de l'entreprise peuvent communiquer entre eux de façon instantanée. En effet, tel que défini par le CEFRIIO et selon la norme « ISO/IEC 30141 », l'internet des objets consiste en une « infrastructure d'interconnexion d'entités physiques, de systèmes, de sources d'information et de service intelligents, capables de traiter des informations du monde physique et du monde virtuel et d'influer sur les activités du monde physique » (Danjou, Pellerin, & Rivest, 2017).

L'impact du 4.0 sur les industries sont majeurs. L'obtention de nombreuses données et leur traitement rapide permettent aux entreprises d'être plus réactives face au changement. En outre, ce nouveau paradigme tentera de répondre plus efficacement à la demande client. Effectivement, les dernières années sont marquées par une transition d'une production de masse vers une production de masse personnalisée. Cela entraîne plusieurs problèmes au niveau de la productivité et de la rentabilité des entreprises qui doivent notamment gérer une augmentation des coûts de mise en course. L'agilité est donc de

mise. Dans cette étude, une ligne d'assemblage de cubes d'ambulance dans une PME québécoise est étudiée.

1.2 Problématique

Le marché aujourd'hui est caractérisé par une demande croissante et variée forçant la transition d'une production de masse vers une production de masse personnalisée, entraînant ainsi des problèmes de flexibilité et de productivité dans les entreprises. Le fait de passer vers des produits personnalisés entraîne une augmentation des temps de mises en courses, une inefficacité des aménagements, une augmentation de la manutention, etc. Il faut donc trouver des solutions pour répondre à ce nouveau type de demande. De plus une pénurie de main-d'œuvre se fait présentement ressentir, surtout pour les PME. Il faudra donc tenter de trouver des solutions afin d'augmenter la productivité. L'étude sera validée par la simulation d'une ligne d'assemblage de cubes d'ambulance qui vit présentement les contrecoups d'une demande aussi croissante que variée pour des produits faits sur mesure.

1.3 Question de recherche

La production de masse personnalisée fait en sorte que les PME peinent à répondre au marché par manque d'agilité. En effet, en plus de connaître une croissance de ses ventes, l'entreprise fait face à une demande de produits toujours plus uniques les uns par rapport aux autres. De là découlent certaines questions de recherche telles que :

- Est-ce qu'un aménagement cellulaire dynamique pourrait répondre au manque d'agilité d'une ligne d'assemblage d'une PME?

L'implantation d'un système de production dynamique et reconfigurable pour répondre aux demandes des clients. Transformer la ligne de production en une ligne

à trois sections : la production des composantes qui alimentent la section 2, la production des modules (en cellules dynamiques reconfigurables) qui alimente la section 3, une ligne d'assemblage mixte pour l'assemblage des modules selon la demande et les options des clients.

- La standardisation des pièces, des quincailleries et des gabarits facilite la conception de produit à structure modulaire. Cela permettrait-il une diminution du temps de passage des produits sur une ligne d'assemblage?

L'idée est d'augmenter l'indice de similarité entre les produits, par plateforme, en standardisant les pièces et les modules dans le but de rendre les produits reconfigurables par plateforme.

- Une automatisation modulaire et reconfigurable de la ligne d'assemblage serait-elle une solution efficace pour la pénurie de main-d'œuvre?
- Est-ce que la transition vers le 4.0 peut régler les problèmes de productivité et de flexibilité de la ligne?

1.4 Objectif principal

L'objectif principal de la recherche est d'augmenter la productivité d'une ligne d'assemblage dans un contexte de croissance de produits de plus en plus personnalisés.

Les résultats de cette recherche sont validés par une étude de cas et par simulation dans une PME québécoise qui fabrique des cubes d'ambulance à une cadence de cinq par semaine. Toutefois, une augmentation de capacité à au moins sept cubes est souhaitée. De plus, il y a le problème de pénurie de main-d'œuvre qui frappe actuellement le Québec où le taux de chômage est à son plus bas. Malgré un recrutement intensif, allant même jusqu'à l'étranger (Mexique, France, Tunisie), il n'est pas facile de combler ce manque. Pour tenter de résoudre cette problématique et atteindre l'objectif de sept cubes par semaine, cette recherche mise sur l'agilité et l'14.0.

1.5 Objectif secondaire

Les objectifs secondaires de l'étude sont de trouver des solutions à la pénurie de main-d'œuvre, de voir l'impact de l'implantation de certains principes du 4.0 sur la ligne d'assemblage et de valider la stratégie d'implantation de l'I4.0 utilisée dans une PME québécoise.

1.6 Concepts importants

Dans le but de comprendre l'étendue de la recherche, voici les définitions des concepts les plus importants. Ces définitions sont sommaires et de plus amples informations seront fournies au fil du texte.

1.6.1 Productivité

La productivité est souvent désignée par la mise en relation de ce qui entre (intrant ou *input*) et ce qui sort (extrant ou *output*) d'un système. Pour augmenter la productivité, il faut donc augmenter le nombre d'extrants tout en conservant ou diminuant le nombre d'intrants. Pour une entreprise, la productivité est l'un des « facteurs les plus vitaux », car elle permet de conserver ou d'augmenter son avantage concurrentiel (Tangen, 2002).

1.6.2 Agilité

L'agilité est la capacité d'une entreprise à réagir rapidement à divers changements externes et internes et ce, même s'ils ne sont pas prévisibles. L'agilité permet donc aux entreprises d'augmenter leur capacité de résilience et de rester compétitives lorsqu'il y a, par exemple, de grandes variations dans le marché (Matthiae & Richter, 2018).

1.6.3 Flexibilité

La flexibilité est la capacité d'adaptation d'une entreprise au changement de circonstances et d'exigences du marché, de ses clients ou autres (Gilchrist, 2016). Il est possible d'être flexible et non agile, mais le contraire n'est pas vrai. Pour être agile, une entreprise doit automatiquement être flexible. La flexibilité permet de s'adapter à des changements de production, mais demande à ce que la production soit faite en lots. Par contre, l'agilité permet de rester productif et rentable en misant sur la rapidité d'adaptation aux changements.

1.7 Mesure de performance

Pour mesurer l'impact des variables qui sont étudiées dans cette recherche, il faut définir des mesures de performance pour chacun des concepts. Le tableau 1.1 présente les mesures de performance utilisées en fonction du concept étudié.

Tableau 1.1 Concept et mesure de performance

Concept	Mesures de performance
Productivité	Temps de passage Nombre d'ambulances fabriqués par semaine

1.8 Conclusion

Plusieurs recherches portent sur l'industrie 4.0, surtout dans les PME, mais la plupart se concentrent sur la grande entreprise et sont encore au stade de la théorie. Maintenant, la littérature a besoin d'études pratiques, d'études de cas, pour valider ou infirmer certaines théories par rapport à l'industrie 4.0. Dans cette recherche, la stratégie d'implantation et l'impact du 4.0 sur une PME québécoise est explorée. Les résultats obtenus permettront d'alimenter la littérature quant à la faisabilité, l'impact et les difficultés rencontrées

lorsque l'on veut implanter les principes du 4.0 dans une petite ou moyenne entreprise. La première étape, présentée dans la prochaine section, constitue la revue de la littérature afin de déterminer la procédure, les variables, etc. à utiliser pour effectuer une telle étude.

CHAPITRE 2 - REVUE DE LITTÉRATURE

L'entreprise à l'étude, tel que mentionné précédemment, a pour problématique un manque de productivité sur sa ligne d'assemblage dû à une croissance rapide d'une demande de produits personnalisés. Pour répondre à cette problématique, des actions doivent être prises afin de diminuer le temps de passage et ainsi augmenter la productivité. Dans le but de définir les concepts en lien avec l'étude et de trouver des actions et des moyens d'augmenter l'efficacité de la ligne de façon rapide et efficiente, une revue de littérature a été effectuée. Cela permet de jeter un coup d'œil sur ce qui a été fait précédemment dans le monde scientifique.

Ces moyens et ces actions sont considérés comme des variables pour cette recherche. En comparant la fréquence à laquelle elles reviennent dans la littérature et si elles sont applicables aux PME, elles sont alors testées pour voir comment elles agissent sur le système actuel de l'entreprise. En outre, les méthodologies utilisées par les différents auteurs ont permis de choisir la méthode appropriée pour cette étude. Finalement, la revue de littérature a permis de définir les concepts clés en lien avec la recherche, par exemple, « qu'est-ce que l'industrie 4.0? » ou encore « qu'est-ce que l'agilité? ». D'ailleurs, c'est avec cette revue de littérature qu'il a été possible de choisir des indicateurs de performance en cohérence avec les concepts clés de la recherche. La Figure 2.1 à la page suivante présente la structure utilisée pour réaliser la revue de littérature de ce mémoire.

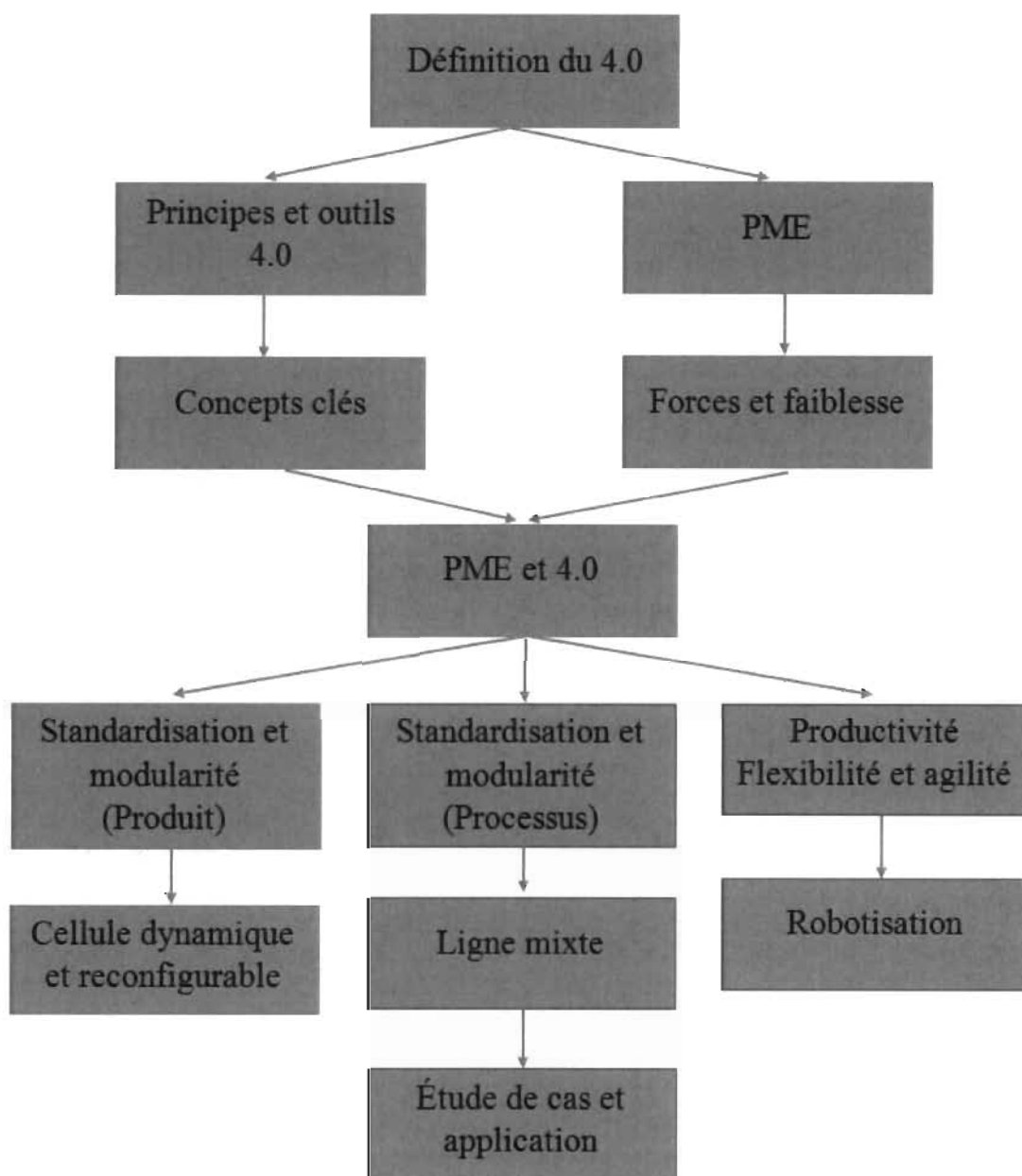


Figure 2.1 Structure de la revue de littérature

2.1 Historique et origine de l'industrie 4.0

L'industrie 4.0 est le début d'une nouvelle ère industrielle. Ce concept est initialement apparu en 2011 à la suite d'une réflexion menée par le gouvernement allemand et sa

communauté scientifique. Le but de cette réflexion, défini par certains comme étant « ambitieuse », est de « positionner le secteur manufacturier allemand comme étant le plus performant en matière de productivité et de flexibilité » (Ministère de l'Économie et de l'Innovation, 2016).

La Figure 2.2 montre l'évolution au fil du temps des révolutions industrielles. La première est apparue au 18^e siècle à la suite du passage d'une fabrication manuelle vers une fabrication mécanisée. Ensuite, c'est l'électrification qui a engendré la deuxième révolution industrielle, puis l'automatisation des machineries dans les années 1970 a apporté la troisième. Finalement, c'est l'ère de la connectivité et des cyber systèmes qui ont initié l'I4.0 (Danjou, Pellerin, & Rivest, 2017).

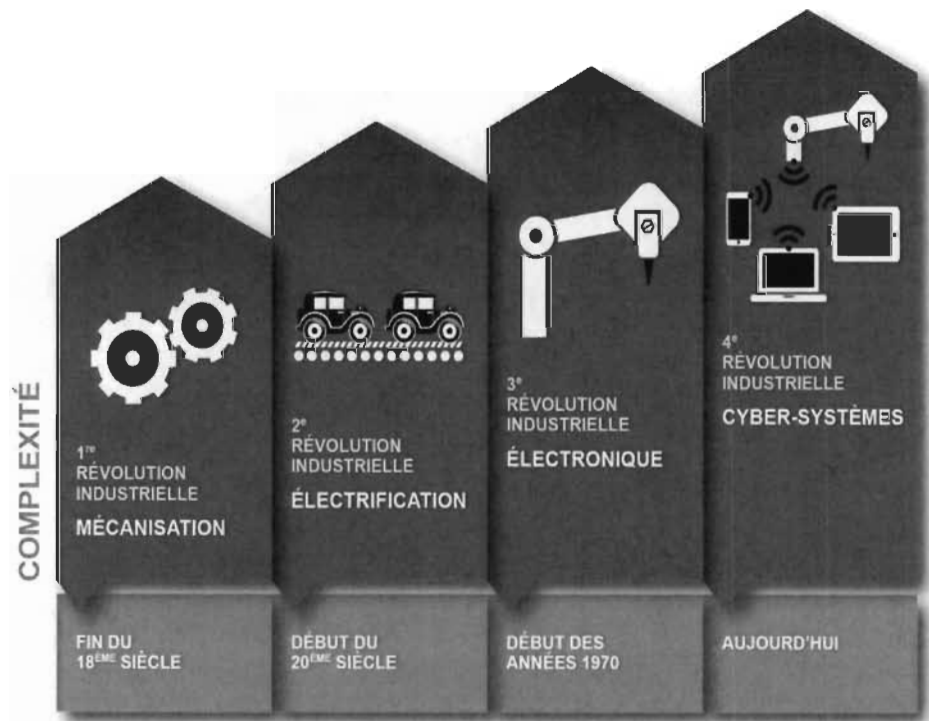


Figure 2.2 Les quatre révolutions industrielles (MESI, 2016)

2.2 Définition de l'industrie 4.0

L'industrie 4.0 est définie de façon générale. Il n'existe pas de définition universelle. Toutefois, l'idée générale est expliquée à travers plusieurs articles. Le 4.0, tel qu'expliqué par Hermann, Pentek et Otto (2016), est un changement de paradigme d'une production contrôlée de façon centralisée vers des processus de production autonomes et décentralisés.

La progression rapide des technologies et principalement des technologies de l'information permettent maintenant une communication en temps réel entre les différents composants d'un système. Dans un document publié par plusieurs professeurs allemands, en collaboration avec leur académie nationale de science et d'ingénierie, Acatech, trois facteurs clés à l'industrie 4.0 ont été ciblés : l'internet des objets (IOT), les systèmes cyberphysiques (CPS) et les usines intelligentes (Kagermann, Wahlster, & Helbig, 2013). Ces facteurs seront abordés plus loin dans la revue de littérature.

2.3 Principes et outils du 4.0

Les avancements de plus en plus rapides dans le monde des technologies permettent aux entreprises d'avoir accès à un amalgame de solutions et d'outils et ce, pour des prix de plus en plus abordables et donc, de plus en plus accessibles. De ce fait, il n'est pas surprenant que le 4.0 repose sur plusieurs principes de design de produits ou de processus et tendances technologiques pour modifier les principes de gestion et de fabrication des entreprises (Ghobakhloo, 2018). La Figure 2.3 montre les différents principes de design et les outils. Le Tableau 2.1 montre les principes de design et le Tableau 2.2 les outils selon leur fréquence de citation. Ici, on voit que les concepts clés énumérés par Kagermann, Wahlster, & Helbig (2013) se retrouvent dans le haut du Tableau 2.1 et du Tableau 2.2.

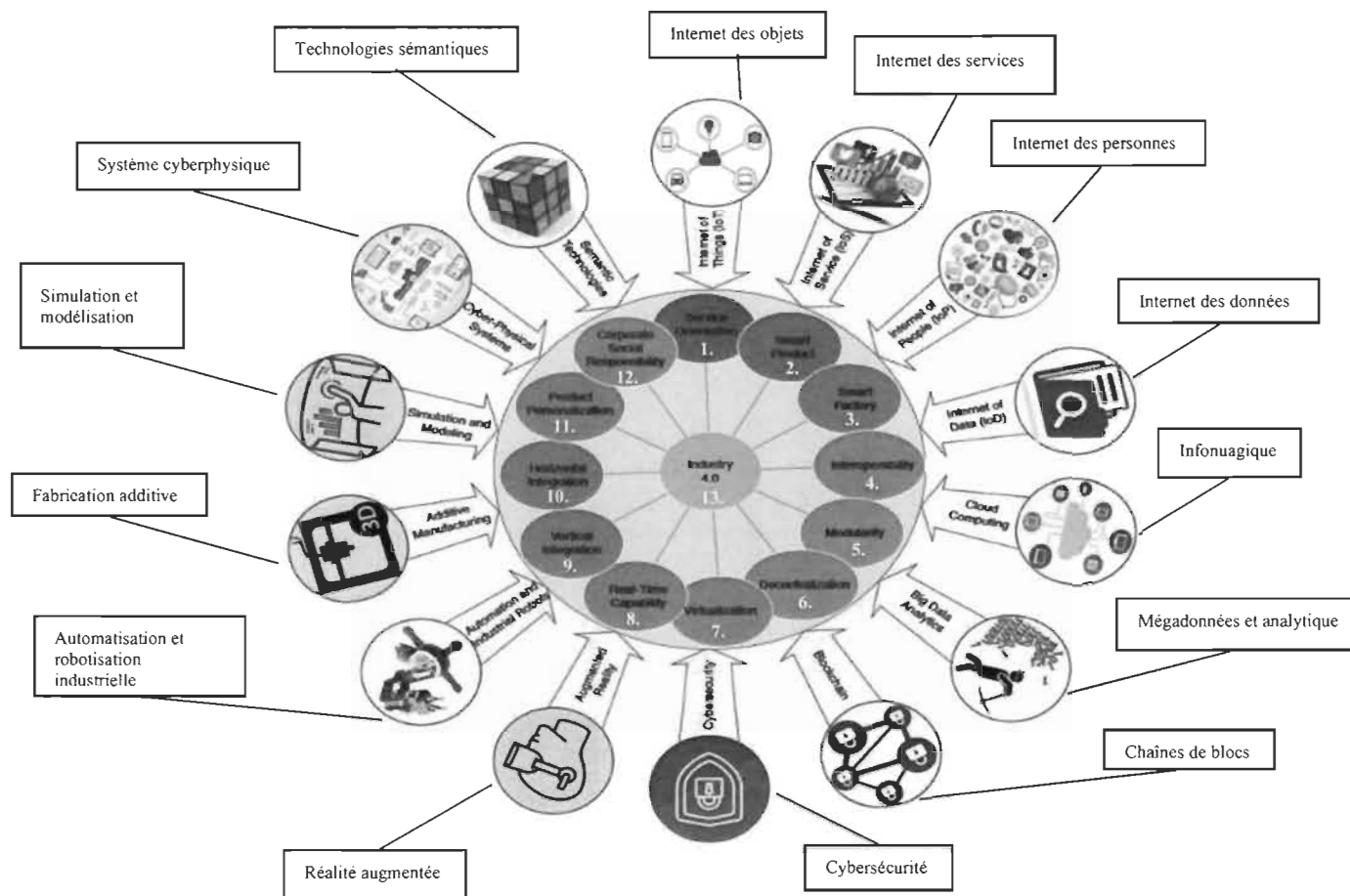


Figure 2.3 Outils relatifs au 4.0 (Kaggerman, & al., 2013)

Légende : 1. Service d'orientation; 2. Produit intelligent; 3. Usine intelligente; 4. Interopérabilité; 5. Modularité; 6. Décentralisation; 7. Virtualisation; 8. Capacité en temps réel; 9. Intégration verticale; 10. Intégration horizontale; 11. Personnalisation de produit; 12. Responsabilité sociale des entreprises; 13. Industrie 4.0.

Tableau 2.1 Fréquence de citation des principes de design dans la littérature
(Ghobakhloo, 2018)

Principe de design	Fréquence / 28	Pourcentage
Usine intelligente	10	36
Produit intelligent	10	36
Virtualisation	9	32
Intégration horizontale	9	32
Orientation des services	8	29
Intégration verticale	7	25
Internet des services	7	25
Capabilité en temps réel	6	21
Décentralisation	6	21
Interopérabilité	5	18
Modularité	5	18
Responsabilité sociale de l'entreprise	10	36

Tableau 2.2 Fréquence de citation des outils dans la littérature (Ghobakhloo, 2018)

Outils	Fréquence / 28	Pourcentage
Internet des objets	25	89
Système cyberphysique	19	68
Mégadonnées	18	64
Infonuagique	15	54
Automatisation et robotisation	13	46
Cyber sécurité	11	39
Fabrication additive	8	29
Simulation	8	29
Réalité augmentée	7	25
Technologie sémantique	3	11
Internet des personnes	3	11
Blockchain	2	7
Internet des données	1	4

Les tableaux 2.1 et 2.2 montrent les principes de design et les outils du 4.0 les plus souvent cités dans la littérature. Par exemple, on note que les concepts clés établis par Kagermann,

Wahlster, & Helbig (2013) sont souvent cités par les auteurs de documents scientifiques. En effet, si l'on prend l'internet des objets, on constate que ce principe de design se retrouve dans près de 90 % des articles consultés par Ghobakhloo (2018) dans sa revue de littérature. Cela donne un aperçu des principes et des outils qui suscitent l'attention parmi la communauté scientifique. Pour continuer, définissons les concepts clés de l'industrie 4.0 ainsi que quelques-uns des concepts les plus discutés ou considérés intéressants pour cette étude. Par exemple, la modularité est intéressante puisque la recherche porte sur une ligne de fabrication de produits modulaires. Les autres définitions sont disponibles à l'Annexe I dans le but d'alléger le texte.

2.3.1 Internet des objets (IOT) – principe de design

L'internet des objets est défini par l'Office québécois de la langue française comme étant « [l']ensemble des objets connectés à internet capables de communiquer avec des humains, mais aussi entre eux, grâce à des systèmes d'identification électronique, pour collecter, transmettre et traiter des données avec ou sans intervention humaine » (Office québécois de la langue française, 2015). Cette nouvelle « révolution technologique » est considérée comme le futur de la « connectivité » et de « l'accessibilité ». L'IOT permet de relier le monde physique au monde virtuel et permet d'obtenir des informations sur des objets, produits, machines, etc. en temps réel (Khodkari, Maghrebi, & Branch, 2016) (Lee & Lee, 2015). De ce fait, on augmente la réactivité des entreprises en leur permettant de prendre des décisions à l'aide d'information obtenue en temps réel. En outre, à l'aide de capteurs, une entreprise peut identifier des « relations et des modèles » pour obtenir des informations sur l'état des machines, la maintenance, la performance de la production en temps réel, etc. (Breivold, 2017).

Pour une implantation réussie de l'IOT, cinq technologies sont considérées comme essentielles (Lee & Lee, 2015).

1. Identification par radio fréquence (RFID) : permet d'identifier des objets et de collecter des informations par radiofréquence.
2. Réseau de capteurs sans fils (*wireless sensor connector*) : capteurs situés à travers l'entreprise dans le but de collecter des informations sur l'environnement des objets. Par exemple, leur température, mouvement, etc. Les capteurs peuvent opérer avec les puces RFID pour une utilisation optimale.
3. Intergiciel (*middleware*) : permet la communication entre différentes applications informatiques (compatibilité des logiciels IOT, machine, etc. pour recevoir, traiter et envoyer des informations d'un appareil à l'autre).
4. Infonuagique (*cloud computing*) : permet le stockage et l'accès aux données sur demande. Ce point sera traité plus en profondeur plus loin dans le texte.
5. Logiciel d'application pour l'IOT : permet la communication entre plusieurs objets, humains ou encore entre des objets et des humains.

2.3.2 Système cyberphysique (CPS) – outil

Les systèmes cyberphysiques sont des systèmes « intégrant de l'électronique et du logiciel, des capteurs et des actionneurs et dotés de capacité de communication ». Ils permettent de collecter des données en temps réel sur un produit, un processus et leur environnement. À l'aide de leur capacité de communication, les CPS peuvent « agir en collaboration avec d'autres systèmes et/ou échanger des données avec d'autres systèmes distants » (Hohmann, 2017). Les systèmes cyberphysiques permettent d'apporter des capacités de contrôle autonome, de prise de conscience et d'autogestion des machines industrielles. Les données tirées des CPS permettent de prendre des décisions sur le ou les systèmes d'une entreprise (Bagheri, Yang, Kao, & Lee, 2015).

2.3.3 Usine intelligente – principe de design

Le terme « usine intelligente » désigne les entreprises qui ont entrepris le virage technologique entraîné par l'industrie 4.0. Ce sont des entreprises connectées via internet ou encore via l'internet des objets. Ce sont des usines qui prennent « appui sur la communication en temps réel pour surveiller et agir sur les activités de l'entreprise ». La connectivité est donc l'aspect le plus important de l'usine intelligente. « Les systèmes communiquent et coopèrent entre eux, mais également avec les humains, les produits et les machines ». La Figure 2.4 illustre la connectivité des différents systèmes d'une entreprise 4.0 de façon générale. Une figure détaillée est présentée à l'Annexe III (Beaudoin, et al., 2016).

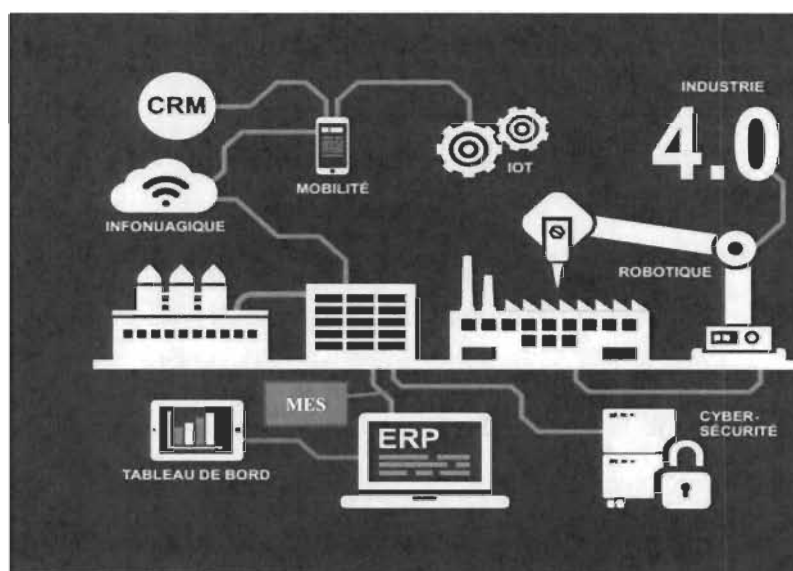


Figure 2.4 Représentation d'une usine intelligente (Boisvert, 2017)

Le CEFRIO a mené une réflexion dans le but de déterminer les critères pour évaluer la maturité des usines par rapport au 4.0 : Comment savoir qu'une usine est mature ou non. Cette réflexion a été amorcée puisque la grande majorité des entreprises à travers le monde sont des petites et moyennes entreprises (PME) et qu'elles n'ont pas nécessairement les

moyens d'entreprendre des investissements majeurs en technologie, logiciels, etc. Voilà pourquoi le CEFRIO insiste sur le fait que l'industrie 4.0 ou les usines intelligentes « ne visent pas nécessairement l'introduction massive de technologie dans le but d'atteindre l'autonomie complète d'un processus ou même d'une usine ». De ce fait, il a établi quatre niveaux de capacité du 4.0 ou encore de l'usine intelligente. Ces quatre niveaux sont présentés dans la Figure 2.5 (Beaudoin, et al., 2016).



Figure 2.5 Quatre niveaux de capacité du 4.0 (Beaudoin, et al., 2016)

Le premier niveau, la surveillance, consiste à surveiller les processus de l'entreprise et leur environnement à l'aide de capteurs, caméras, logiciels, etc. Le deuxième niveau, le contrôle, est fondé sur un historique de données et permet de détecter des « comportements types ». Ensuite, des algorithmes, par exemple, permettent de repérer des situations où des décisions sont requises. Le troisième niveau, l'optimisation, consiste

à utiliser le « riche flux de données disponibles à partir de la surveillance » pour replanifier en temps réel diverses fonctions de l'entreprise. Finalement, le quatrième niveau, l'autonomie, est la combinaison des trois niveaux précédents dans le but d'obtenir un système capable « d'apprendre de leur environnement, d'autodiagnostiquer leurs propres besoins et de s'adapter aux préférences de l'utilisateur » (Beaudoin, et al., 2016).

2.3.4 Modularité – principe de design

La modularité consiste à se baser sur le principe de standardisation pour concevoir le produit sous forme de plateformes et de modules standards sur lesquels on ajoute des options pour répondre de façon efficace aux demandes personnalisées des clients. Cela permet de standardiser en partie des produits qui étaient autrefois entièrement personnalisés. Maintenant, on part d'une structure standard et on personnalise le produit à l'aide de modules. Les modules sont des sous-assemblages que l'on vient attacher à la structure modulaire (structure standard) pour ajouter des fonctions aux produits. Pour mettre en application ce principe de design, une équipe de conception doit analyser les produits ou une famille de produits pour la convertir en structure modulaire. Cela permet donc de former des lignes d'assemblage mixtes et d'augmenter la flexibilité et la productivité des entreprises (Abdul-Nour, Raymond, Jacob, & Julien, 2003).

Dans son livre, Gilchrist (2016) décrit la flexibilité comme un autre principe de design de l'industrie 4.0. Selon l'auteur, le fait d'être flexible signifie qu'une entreprise peut « s'adapter facilement au changement de circonstances et d'exigences » du marché, de ses clients ou autres. De surcroît, l'auteur explique que la modularité permet de « remplacer, agrandir ou d'améliorer une gamme de produits avec un minimum de perturbation sur les autres produits ou procédés ». Finalement, dans leur article Åkerman, Fast-Berglund, Halvordsson, & Stahre (2018) parlent plutôt de ligne d'assemblage modulaire que de produit modulaire. Toutefois, c'est le même principe que pour les produits. Les auteurs partent d'une structure modulaire qu'ils appellent « *backbone* » ou encore la « colonne »

de la ligne d'assemblage sur laquelle s'ajoutent des modules pour former ou reformer rapidement des lignes d'assemblage. Cela permet d'augmenter la flexibilité et l'agilité des entreprises.

2.3.5 Mégadonnées – outil

L'avancement rapide et le « développement continu » des technologies a fait en sorte que les entreprises ont une multitude de données à leur disposition. Ces données sont une vraie mine d'or car leur analyse permet d'optimiser tous les aspects de la production d'une entreprise (la qualité, la maintenance, la productivité, etc.). En fait, les technologies et « l'explosion de données » qu'elles ont emmenées avec elles nous ont menés vers « l'ère des mégadonnées » ou des « *big data* » en anglais. Dans leur article, Fan, Li, & Zhou (2019) tirent leur définition des mégadonnées sur Wikipédia et la définition va comme suit :

« [le « *big data* »] désigne des ensembles de données devenus si volumineux qu'ils dépassent l'intuition et les capacités humaines d'analyse et même celles des outils informatiques classiques de gestion de base de données ou de l'information » (Wikipedia, 2019).

Les mégadonnées sont donc des données « massives et complexes qui ne peuvent être centralisées et qui sont difficiles à comprendre et à analyser dans des temps impartis [...] ». En outre, l'analyse partielle des données pour diminuer les temps d'analyse n'est pas une solution intéressante puisque selon la littérature, les mégadonnées ont « peu de valeur » si elles sont analysées partiellement et « beaucoup de valeur » si elles sont analysées dans leur entièreté (Fan, Li, & Zhou, 2019).

2.3.6 Infonuagique – outil

Les tonnes de données générées par les technologies du 4.0 donnent de nouveaux défis aux entreprises. Par exemple, les entreprises doivent stocker ces données et les rendre accessibles en tout temps afin de permettre une utilisation complète et optimale de celles-ci (Gilchrist, 2016). Pour répondre à ces problématiques, l'industrie 4.0 utilise l'infonuagique pour stocker et rendre disponibles les grandes quantités d'informations générées par les usines intelligentes. Selon l'Office québécois de la langue française, l'infonuagique est « un modèle informatique qui, par l'entremise de serveurs distants interconnectés par internet, permet un accès à un réseau [...] » (Office québécois de la langue française, 2017). Cela permet donc aux entreprises de pouvoir stocker de grandes quantités d'informations à distance et d'y avoir accès en tout temps à l'aide d'internet.

2.3.7 Automatisation et robotisation – outil

Depuis que l'Allemagne a développé l'idée des usines intelligentes en 2011, mis à part l'année 2012 où le 4.0 commençait tranquillement à se faire connaître à l'international, la vente de robots industriels n'a cessé d'augmenter. En effet, selon la Fédération internationale de robotique (IFR), les ventes de robots industriels ont plus que doublées entre 2013 et 2017. La Figure 2.6 présente une estimation des ventes de robots industriels à travers le monde selon le rapport de robot industriel publié par l'IFR en 2018 (International Federation of Robotics, 2018).

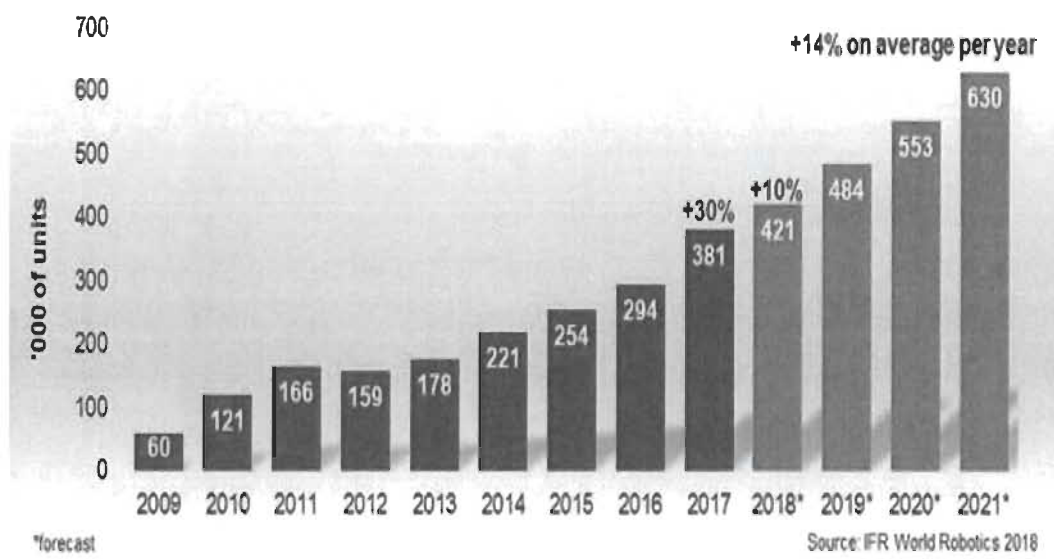


Figure 2.6 Estimé des ventes annuelles de robots 2009-2017 et prévision des ventes 2018*-2021* (International Federation of Robotics, 2018)

En plus d'une croissance des ventes en robotique industrielle, cette industrie ne cesse d'évoluer. Aujourd'hui, « les créateurs de [robots industriels] les développent pour être autosuffisant, autonome et interactif [...] ». Ils ne sont plus que de « simples outils utilisés par l'homme », mais plutôt des « unités de travail intégrales qui travaillent en coopération avec l'homme » (Gilchrist, 2016). Cette nouvelle génération de robots coopératifs, aussi appelés cobots, marque les débuts de la « cobotique industrielle ».

2.3.8 Simulation – outil

La simulation de systèmes industriels fait référence à la « capacité de simuler l'intégralité des opérations du plancher de production. Ces simulations sont le miroir virtuel du monde physique, soit les machines, les produits et les humains » (Beaudoin, et al., 2016). Pour ce faire, il faut modéliser le système désiré à l'aide d'outils informatiques ou d'un « cadre

numérique ». Cela permet ensuite de tester différents scénarios sur le système et « d’obtenir des valeurs numériques » concernant, par exemple, le taux d’utilisation des ressources, « le taux d’utilisation de cellules de travail et du goulot », etc. (Caggiano, Caiazzo, & Teti, 2015).

2.3.9 Réalité augmentée – outil

Tzimas, Vosniakos, & Matsas (2019) décrivent la réalité augmentée (AR) comme une représentation du monde réel, en temps réel, augmentée par des représentations créées par ordinateur. Cela permet à l’opérateur de recevoir instantanément des informations supplémentaires pour effectuer son travail. Finalement, contrairement à la réalité virtuelle (VR), la AR ajoute des éléments à l’environnement réel. La VR, quant à elle, remplace entièrement l’environnement réel par un environnement virtuel (Tzimas, Vosniakos, & Matsas, 2019).

2.3.10 Virtualisation – principe de design

La virtualisation utilise la simulation, les logiciels de modélisation 3-D, etc. pour représenter la réalité virtuellement à l’aide d’ordinateurs. Cela permet de former un « jumeau digital » de la réalité. C’est-à-dire que l’environnement virtuel créé agira pratiquement de la même façon que celui dans la réalité. Pour obtenir des résultats précis, il est possible de joindre les données recueillies par les capteurs de données du monde réel (CPS) au modèle de simulation utilisé dans l’environnement virtuel. Ainsi, il est possible de tester et d’optimiser des machines, des processus, procédés, etc., et ce, sans utiliser de ressources physiques. En effet, cela permet de programmer, tester ou optimiser des éléments de sa chaîne de valeur de façon hors ligne ou encore « *offline* » (Ghobakhloo, 2018) (Moreno, et al., 2017).

2.4 Les PME et la quatrième révolution industrielle

2.4.1 Définition et caractéristique de la PME

Les petites et moyennes entreprises sont difficilement comparables avec les grandes entreprises. Faute de ressources, elles ne disposent pas des mêmes moyens que les grandes entreprises. Que ce soit en termes de personnel, d'expertise, d'espace, de financement, etc., les PME n'ont pas les mêmes contraintes que les grandes entreprises (Moeuf, Pellerin, Lamouri, Tamayo-Giraldo, & Barbaray, 2018).

Dépendamment de la région où l'on se trouve, la définition d'une petite, moyenne ou grande entreprise change. Par exemple, en Europe, une entreprise est considérée petite ou moyenne si elle est composée de moins de 250 employés et qu'elle génère moins de 50 millions d'euros par années (Moeuf, Pellerin, Lamouri, Tamayo-Giraldo, & Barbaray, 2018).

D'un autre côté, au Canada, le gouvernement canadien a quant à lui définit les PME comme étant des entreprises de moins de 500 employés. De 1 à 99 pour une petite entreprise, de 100 à 499 pour une moyenne et plus de 500 pour une grande entreprise. En 2017, Statistique Canada a établi que près de 97,9 % des entreprises canadiennes sont de petites entreprises. En considérant le 1,9 % de moyennes entreprises, Statistique Canada estime à 99,8 % le nombre de PME au Canada (Gouvernement du Canada, 2019).

Dans leur revue de littérature, Moeuf, & al. (2018) notent que la PME a une structure organisationnelle basée sur la proximité de ses gestionnaires. Résultat, les dirigeants sont très engagés dans toutes les décisions des différentes sphères de l'entreprise. Selon ces mêmes auteurs, la plupart des PME misent sur des stratégies à court terme afin de limiter les investissements majeurs rentabilisés sur du long terme. Cela s'explique par le nombre de ressources limitées dans les petites et moyennes entreprises.

2.4.2 Force et faiblesses des PME

La PME comporte son lot de points forts et de points faibles. Pour mieux les comprendre, pour travailler sur leurs faiblesses et pour renforcer leurs forces, il est intéressant d'effectuer quelques recherches sur ce sujet. Dans leur article, Moeuf, & al. (2018) soulèvent que la PME a souvent des lacunes et un manque d'expertise ou de support dans les domaines de la gestion de la chaîne d'approvisionnement, des technologies ou encore de la gestion financière. Ils soulèvent que « contrairement aux grandes entreprises, les PME ont une productivité plus faible, des coûts plus élevés et des performances de livraison à temps moins élevées ». Le modèle d'affaires des PME est souvent basé sur la « flexibilité », la « réactivité » et la « proximité des clients ».

Dans un autre article, Horváth & Szabó (2019) décrivent les forces et les barrières des PME pour accéder aux 4.0. Plus particulièrement, les auteurs s'intéressent à savoir si les PME et les grandes entreprises ont les mêmes opportunités d'adhérer à ce nouveau paradigme. Lors de leurs recherches, les auteurs notent notamment que les petites et moyennes entreprises manquent de ressources financières et technologiques. De plus, les PME sont souvent faibles en planification de production et ont peu de fournisseurs, ce qui les rend dépendants de ceux qu'ils ont. Dans une autre étude effectuée sur près de 150 PME, Gamache, & al. (2017) ont ciblé la planification de la production ainsi que les aménagements d'usines comme des faiblesses des PME. Toutefois, Horváth & Szabó (2019) ont aussi ciblé des forces pour la PME. Leur grande flexibilité, leur capacité organisationnelle élevée et le fait que les employés sont habitués aux changements sont des forces non négligeables pour ce type d'entreprise.

L'article de Mittal, & al. (2018) porte sur la maturité des petites et moyennes entreprises face à l'industrie 4.0. Dans cet article, les auteurs relèvent les forces et les faiblesses des PME par rapport aux grandes entreprises. Du côté des faiblesses, on retrouve les points suivants : de faibles ressources financières, peu d'utilisation et de connaissance dans les

technologies avancées, peu de coopération avec les universités ou les institutions de recherche, dépendance au réseau de fournisseurs et aux clients, peu de flexibilité en leadership et peu de recherche et développement. Finalement, du côté des points forts, Mittal, & al. (2018) ont identifié les points suivants : flexibilité organisationnelle élevée et peu complexe, engagement des ressources humaines diversifiées, des connaissances élevées dans leur champ d'expertise et de fortes relations avec leurs clients. Force est de constater que les PME ont leur lot de forces et de faiblesses. Ce sont des entreprises spécialisées dans leur domaine, avec de fortes relations clients et fournisseurs et des ressources souvent limitées. Le Tableau 2.3 présente un récapitulatif des forces et des faiblesses des petites et moyennes entreprises.

Tableau 2.3 Forces et faiblesses de la PME

Forces	Faiblesses
Flexibilité (Moeuf, & al., 2018; Horváth & Szabó, 2019).	Productivité faible (Moeuf, & al., 2018).
Réactivité (Moeuf, & al., 2018).	Coût de fabrication élevé (Moeuf, & al., 2018).
Proximité avec les clients (Moeuf, & al., 2018; Mittal, & al., 2018).	Performance de livraison à temps moins élevé (Moeuf, & al., 2018).
Engagement et impact de la direction (Moeuf, & al., 2018).	Manque de connaissance technologique (Moeuf, & al., 2018; Horváth & Szabó, 2019; Mittal, & al., 2018).
Capacité opérationnelle élevée (Horváth & Szabó, 2019).	Manque de ressources financières (Horváth & Szabó, 2019; Mittal, & al., 2018).
Résistance aux changements faible (Horváth & Szabó, 2019).	Manque de compétence en planification (Horváth & Szabó, 2019; Gamache, & al., 2017). Aménagement d'usine (Gamache, & al., 2017).
Flexibilité organisationnelle (Mittal, & al., 2018).	Dépendance aux fournisseurs élevée (Horváth & Szabó, 2019; Mittal, & al., 2018).
Engagement des ressources humaines diversifiées (Mittal, & al., 2018).	Peu de coopération avec les universités ou des institutions de recherche (Mittal, & al., 2018).
Connaissance élevée dans leur champ d'expertise diversifié (Mittal, & al., 2018).	Peu de recherche et développement (Mittal, & al., 2018).
Rapidité d'exécution des changements (structure organisationnelle peu complexe).	Flexibilité de leadership faible (Mittal, & al., 2018).
Compétence diversifiée des employés.	Vulnérabilité au marché (Mittal, & al., 2018).

2.4.3 PME et 4.0 – Standardisation et modularité (produit)

La transition vers une production de masse personnalisée a fait en sorte que la variabilité des produits a augmenté et que leur cycle de vie a diminué. De ce fait, les lignes de production doivent maintenant produire une grande variété de produits, ayant une durée de vie courte et ce, tout en étant rentables. Pour ce faire, il faut donc que la ligne de production soit efficace, adaptable et que la conception de nouveaux produits soit rapide. C'est-à-dire qu'elle doit être en mesure de produire une grande variété de produits de plus en plus en évolution pour respecter les demandes des clients qui désirent des produits personnalisés. Certaines solutions pour pallier ces nouvelles contraintes sont la standardisation et la modularisation des produits dans le but de former une ligne de production facilement reconfigurable (Weyer, Schmitt, Ohmer, & Gorecky, 2015).

La standardisation et la modularisation ne datent pas d'hier. Déjà en 1995, Rheault, Drolet, & Abdul-Nour (1995) utilisaient ces principes pour rehausser la productivité et l'agilité de la Chaire Bombardier Sea-Doo/Ski-Doo. Pour répondre à un environnement dynamique et turbulent, les auteurs ont utilisé la modularisation afin de réduire les temps de conception, d'augmenter la reconfigurabilité des lignes d'assemblage et d'augmenter leur productivité. Dans l'article, un environnement « turbulent » est caractérisé par les points suivants : « grande variabilité de la demande et des tailles de lots à produire, temps de production et de mise en course variable, demande partiellement ou totalement stochastique (aléatoire), changement fréquent dans les produits, séquence de production variable et compétitivité élevée ».

Aujourd'hui, les PME se retrouvent dans le même genre d'environnement hautement compétitif et parsemé de variabilité. Voilà pourquoi la standardisation et la modularisation des produits redeviennent d'actualité. La modularisation des produits consiste à séparer un produit en une plateforme standard sur laquelle plusieurs sous-assemblages (modules) standards viennent s'intégrer. La personnalisation du produit se fait ensuite par l'ajout

d'options (de modules) sur la plateforme de base du produit en fonction du niveau de complexité désirée. La Figure 2.7 présente un exemple de conception modulaire dans l'industrie automobile.

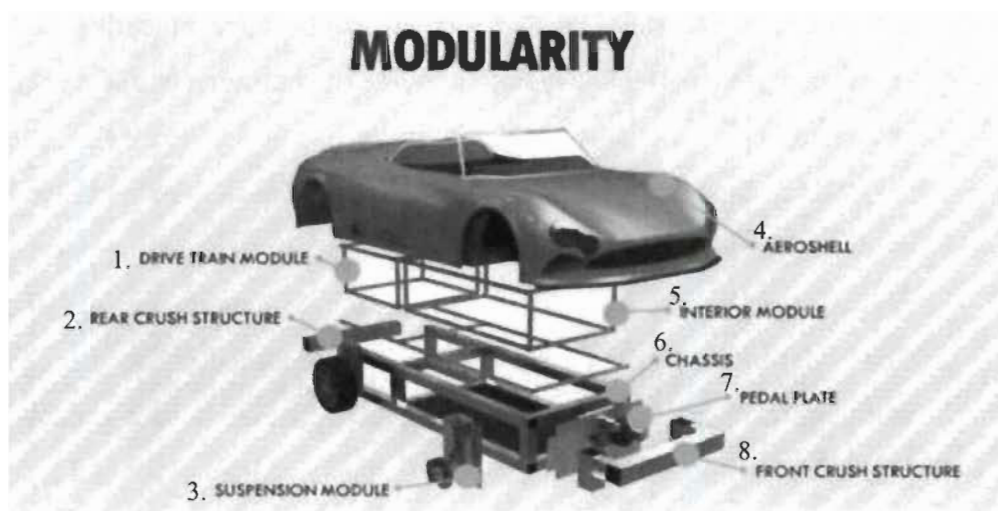


Figure 2.7 Exemple de produit modularisé (Commons Transition, 2014)

Légende : 1. Module de transmission; 2. Pare-choc arrière; 3. Module de suspension; 4. Carrosserie; 5. Module intérieur; 6. Châssis; 7. Plaque de pédale; 8. Pare-chocs avant.

La Figure 2.7 démontre une vue explosée d'un véhicule conçu de façon modulaire. L'assemblage du véhicule est simplifié puisqu'il suffit d'installer les différents modules sur le châssis qui sert de plateforme de base. Puisque plusieurs véhicules peuvent utiliser les mêmes modules, par exemple deux véhicules différents peuvent avoir la même transmission, les mêmes freins, etc., les modules peuvent aussi être standardisés. En offrant quelques modèles de chacun des modules, il est possible de personnaliser son produit et de répondre à une demande de masse personnalisée. De plus, la sous-traitance des modules vient limiter le nombre de pièces à stocker dans l'entreprise puisqu'il est maintenant possible de stocker des modules et non un ensemble de pièces. Cela simplifie la gestion et la logistique des pièces.

2.4.4 PME et 4.0 – Standardisation et modularité (cellule dynamique)

Un des aspects les plus importants pour la productivité d'une entreprise est son aménagement. Un aménagement de qualité permet de réduire les gaspillages, ou encore la non-valeur ajoutée telle que les déplacements, la manutention et la non-qualité. Par conséquent, cela permet de réduire les temps de passage, les encours et donc l'espace total nécessaire, etc. Au Québec, l'Institut de recherche sur les PME (INRPME) a établi que les PME québécoises ont une faiblesse au niveau de leur aménagement, ce qui réduit considérablement leur productivité. En effet, l'étude réalisée sur près de 150 PME québécoises a permis de cibler la planification de la production et l'aménagement d'usine comme les plus grandes faiblesses de cette catégorie d'entreprise. Ceci est d'autant plus vrai pour les entreprises œuvrant dans le domaine de la sous-traitance car celles-ci font face à des environnements turbulents (Gamache, Abdul-Nour, & Baril, 2017).

Pour répondre à des environnements turbulents, Rheault, & al. (1995) ont développé un type d'aménagement reconfigurable et adaptable aux fluctuations du marché. Ce sont les « aménagements cellulaires dynamiques » ou encore les DCMS (*dynamic cellular manufacturing system*). Développés en 1995, ces aménagements en cellule reconfigurable ont pour principe qu'il peut être plus profitable pour une entreprise de déplacer ses machines plutôt que ses produits. Avant de continuer, définissons ce qu'est une cellule de travail. Une cellule de travail est un regroupement de machines permettant de travailler des produits d'une même famille. Cela permet de réduire les déplacements puisque les machines travaillant les mêmes pièces sont rapprochées. Toutefois, la faiblesse des aménagements cellulaires est qu'il est dispendieux de les aménager. De ce fait, les fluctuations du marché et la diminution du cycle de vie des produits affectent grandement leur rentabilité, car elles peuvent devenir rapidement désuètes. Pour pallier ce problème, les aménagements cellulaires dynamiques ont été développés.

Les cellules dynamiques, comme toute cellule de travail, visent à regrouper des machines travaillant sur des pièces d'une même famille de produits, ce qui veut dire que les pièces passent par les mêmes types d'opérations. Cependant, contrairement aux cellules typiques, les cellules dynamiques sont pensées de façon à être facilement reconfigurables. Par facilement, on veut dire que les déplacements des machines sont rapides et peu dispendieux. Dans le cas où il n'est pas possible de bouger des machines ou en cas de bris, on formera alors ce qu'on appelle des cellules virtuelles. Celles-ci consistent à former des cellules de travail en réservant des machines pour une famille de produits, sans toutefois rapprocher les machines physiquement. Cela permet d'augmenter encore davantage la flexibilité de ce type d'aménagement qui regagne de l'intérêt depuis l'arrivée en 2011 de l'industrie 4.0 (Nouri, Abdul-Nour, & Gamache, 2018).

2.4.5 PME et 4.0 – Standardisation et modularité (processus)

La standardisation des processus est primordiale pour augmenter la compétitivité d'une entreprise. Pour gagner en efficacité, en qualité et en productivité, le *lean manufacturing* est toujours d'actualité et ce, malgré la venue des industries intelligentes. Avec la participation du personnel de production, la recherche de solutions simples et efficaces pour augmenter la valeur ajoutée des opérations est toujours aussi essentielle pour conserver ou se donner des avantages concurrentiels.

En outre, la standardisation des méthodes de travail, des gabarits, des outils, des accessoires, etc. est un excellent moyen pour standardiser les temps de production. La standardisation des processus permet d'obtenir des temps standards, de faciliter et d'augmenter l'efficacité des programmes de formation et de faciliter la planification de la production.

En effet, l'établissement de temps standards permet de réduire la variabilité dans les temps de production de chaque tâche. De ce fait, les échéanciers sont plus précis et les retards de production sont diminués. De surcroît, la connaissance de ses temps de production permet un équilibrage de ligne efficient. De ce fait, on réduit les temps morts de chacun des postes de travail sur une ligne de production et, par conséquent, on augmente la productivité de la ligne. Dans la prochaine section, les lignes de production, plus particulièrement les lignes mixtes, sont abordées.

2.4.6 PME et 4.0 – Standardisation et modularité (ligne mixte)

Les lignes d'assemblage mixtes (*mixed-model assembly line* – MMAL), ou encore les lignes d'assemblage multimodèles, sont définis par Yang, Lan, Shen, Huang, Wang, & Lin (2017) comme étant un « mode de production commun » pour les entreprises fabriquant plusieurs produits différents dans des quantités différentes. Pour accomplir leurs « objectifs de production », les lignes mixtes demandent un grand flux de matériel et d'informations, puisque plusieurs produits, très différents, peuvent passer par les mêmes postes de travail. Dans ce contexte, l'industrie 4.0 peut optimiser l'utilisation des lignes mixtes par une transmission efficace et rapide d'information via internet.

Dans sa thèse, Aroui (2015) décrit les lignes d'assemblage mixtes comme un « cas particulier de lignes de production où différentes variétés de produits à base commune sont intermêlés pour être assemblés sur une même ligne ». Ici, les « bases communes » réfèrent aux « plateformes de base » décrites dans la section 2.4.3 portant sur la modularisation des produits. En effet, l'utilisation de MMAL vient de connivence avec les principes d'amélioration continue, de standardisation et « plus particulièrement dans un contexte de fabrication en juste à temps ». Dans leur article, Yang, Zhang, Chen, & Li (2010) décrivent les lignes d'assemblage multimodèles comme des « systèmes complexes ».

Dans le même ordre d'idées, Abdul-Nour, Drolet, & Lambert (1999) mentionnent que dans « [un environnement de ligne d'assemblage mixte, c'est-à-dire dans un environnement où il y a une grande variété de produits et de quantité], de nombreuses améliorations doivent être apportées aux étapes de conception, de production et d'assemblage [...] ». Les lignes d'assemblage mixtes sont souvent utilisées dans le domaine automobile où plusieurs véhicules différents, avec plusieurs options différentes, sont fabriqués. Des cellules de travail fabriquent des modules standards et alimentent une ligne d'assemblage mixte. La Figure 2.8 illustre ce principe. Dans cet exemple, une ligne de fabrication mixte fabrique différents produits en utilisant trois plateformes standards (A, B et C) et trois options différentes (1, 2 et 3). Dépendamment du travail à effectuer pour fabriquer un assemblage, un ou deux employés peuvent être déployés sur la ligne mixte. Dans le cas où un seul employé est requis, le second peut aider à fabriquer des modules dans une cellule de travail (principe d'équilibrage naturel).

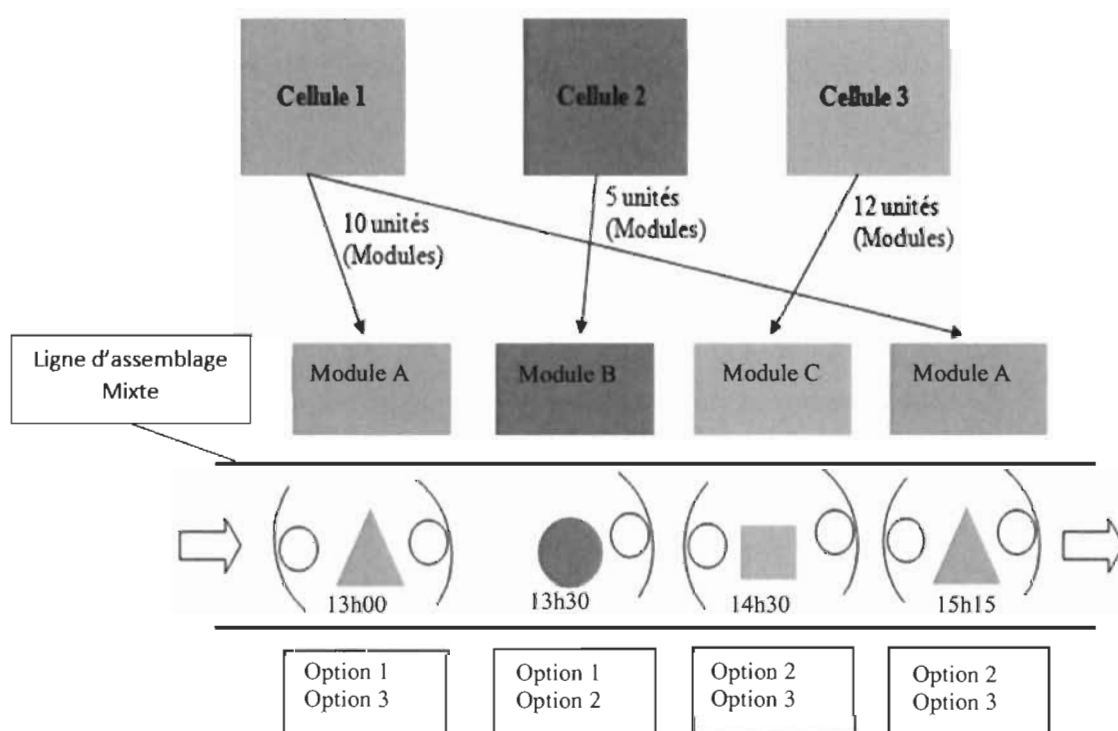


Figure 2.8 Représentation d'une ligne d'assemblage mixte en fonction du temps (MMAL)

Dans la présente étude, une ligne d'assemblage d'ambulance est étudiée. De ce fait, comme la littérature démontre que les lignes d'assemblage mixte et la conception modulaire sont avantageuses dans le domaine automobile, il est judicieux d'explorer ces avenues pour la suite de cette recherche. De plus, l'entreprise comporte une seule ligne d'assemblage pour fabriquer plusieurs structures d'ambulance différentes.

2.4.7 PME et 4.0 – Productivité, flexibilité et agilité

Dans le domaine du génie industriel, on tente d'augmenter la productivité des entreprises en « produisant plus avec moins ». C'est-à-dire, fabriquer plus de produits ou produire plus de services avec moins de ressources. Ici, une ressource peut être du matériel, du temps machine, du temps de main-d'œuvre, etc. De ce fait, la productivité est donc « étroitement liée à l'utilisation et la disponibilité des ressources », ce qui mène à la définition du prochain terme, la flexibilité. Toutefois, avant de poursuivre avec la flexibilité, voici les cinq façons d'augmenter la productivité d'une entreprise selon Tangen (2002).

1. Les extrants et les intrants augmentent mais l'augmentation des intrants est plus faible que celle des extrants.
2. Les extrants augmentent alors que les intrants restent constants.
3. Les extrants augmentent alors que les intrants diminuent.
4. Les extrants restent constants alors que les intrants diminuent.
5. Les extrants et les intrants diminuent mais la diminution des intrants est plus grande que celle des extrants.

Dans le monde des petites et moyennes entreprises, les environnements souvent « turbulents » ne facilitent pas la tâche des entreprises pour être productives. Comme l'a indiqué Tangen (2002) dans son article, la productivité est intimement liée à la disponibilité des machines. De ce fait, les temps de mise en course réalisés sur les

machines ont un impact négatif sur la productivité d'une entreprise. De là, on comprend l'importance pour une PME d'être flexible, car la flexibilité permet de répondre rapidement à un changement de production au niveau d'une machine ou d'un système.

Dans leur article intitulé « Mixed production, flexibility and SME », Abdul-Nour, & al. (1999) caractérisent la flexibilité en trois catégories, totalisant 11 types de flexibilité. La flexibilité de base, incluant la flexibilité machine, de manutention et d'opération. La flexibilité du système de production, qui englobe la flexibilité de volume, d'expansion, de routage, de procédé et de produit. La flexibilité agrégée, qui inclut la flexibilité de planification, de production et de marché. Selon les auteurs, ces 11 types de flexibilité permettent aux entreprises de « fabriquer une grande variété de produits en petites quantités au coût de la production de masse, tout en étant facilement adaptables au marché [...] ». Dans le Tableau 2.4 ci-dessous, les différents types de flexibilité sont définis et répartis selon leur catégorie.

Dans le cas de la ligne d'assemblage à l'étude et dans un contexte de production de masse personnalisé, les flexibilités de volume, de procédé, de produit et de production sont importantes. Toutefois, comme plusieurs produits sont fabriqués sur la ligne et ce, en quantités différentes, la rentabilité de la ligne passe par son agilité à fabriquer plusieurs produits en quantités différentes et avec plusieurs options différentes pour satisfaire les exigences toujours croissantes des clients.

Tableau 2.4 Catégorie et définition des types de flexibilité (Abdul-Nour, 2014)

Flexibilité de base	Définition
Flexibilité machine	« Variété des opérations exécutées par une machine. Rapidité de changement d'une opération à l'autre ».
Flexibilité de manutention	« Facilité à adapter le système pour manutentionner plusieurs types de composantes et à alimenter les machines avec un minimum de déplacements ».
Flexibilité d'opération	« Facilité à trouver des séquences d'opérations alternatives ».

Tableau 2.4 Catégorie et définition des types de flexibilité (Abdul-Nour, 2014) (suite)

Flexibilité du système de production	
Flexibilité de volume	« Capacité du système à produire profitablement des petits volumes ».
Flexibilité d'expansion	« Facilité à augmenter la capacité de production avec le minimum d'investissement ».
Flexibilité de routage	« Capacité à fournir des routages alternatifs de production ».
Flexibilité de procédé	« Capacité à produire une variété de produits, en petit volume [et ce, avec un minimum de mise en course] ».
Flexibilité de produit	« Capacité à fabriquer un produit à plusieurs options avec des [mises en course] mineures ».
Flexibilité agrégée	
Flexibilité de planification	« Habilité du système à opérer pendant une longue période de temps sans intervention externe ».
Flexibilité de production	« Capacité d'ajouter de nouveaux produits sur la ligne sans investissement majeur ».
Flexibilité de marché	« Capacité du système à s'adapter aux changements des conditions du marché ».

Finalement, depuis l'arrivée des usines intelligentes en 2011, l'agilité devient un sujet et un concept de plus en plus recherché. L'agilité est définie par la littérature comme étant « l'aptitude à détecter les changements environnementaux et y réagir rapidement ». Dans leur article, Matthiae & Richter (2018) ont utilisé une définition plus spécifique de l'agilité afin de réaliser leur recherche. Cette définition est la suivante : « Capacité d'une entreprise à faire face rapidement à des changements externes et internes imprévisibles afin de pouvoir faire face aux menaces sans précédent de l'environnement commercial et de tirer profit de ces changements en tant qu'opportunités ».

L'agilité permet donc aux entreprises œuvrant dans des environnements changeants de produire des produits de haute qualité, de haute performance et conçus selon les spécifications du client et ce, de façon profitable à l'entreprise. Dans leur article, Matthiae & Richter (2018) séparent l'agilité en cinq facettes : l'agilité de client, de marché, d'opération, de partenariat et de main-d'œuvre. Le Tableau 2.5 ci-dessous donne la

définition de chacune de ces facettes selon la revue de littérature effectuée par les chercheurs.

Tableau 2.5 Définition des cinq facettes de l'agilité (Matthiae & Richter, 2018)

Facette de l'agilité	Définition
Agilité client	« Aptitude d'une entreprise à utiliser ses clients comme source d'informations sur le marché et d'idées d'innovation ».
Agilité de marché	Capacité à répondre rapidement aux changements du marché ou aux changements de stratégies d'un compétiteur en « améliorant rapidement les produits et les services de l'entreprise ».
Agilité d'opération	« Capacité d'ajuster les processus opérationnels internes pour faire face aux exigences changeantes du marché ».
Agilité de partenariat	Capacité à utiliser les savoirs de son réseau de fournisseurs, distributeurs, partenaires, etc. afin de résoudre des problèmes hors de la portée de l'entreprise.
Agilité de main-d'œuvre	Capacité de la main-d'œuvre à supporter la production agile (compétence, apprentissage, gestion du stress).

2.4.8 Stratégie d'implantation du 4.0 dans les PME

Dans sa thèse intitulé « Stratégies de mise en œuvre de l'industrie 4.0 dans les petites et moyennes entreprises manufacturières québécoises », Gamache (2019) présente une stratégie d'implantation du 4.0 pour les PME du Québec. Cette stratégie consiste en six étapes. Une étape préliminaire visant à « développer une vision et une planification stratégique dans l'entreprise », la deuxième étape se réalise à l'aide d'une cartographie de la chaîne de valeur qui permet d'« assurer le contrôle des processus », la troisième étape est un audit permettant d'évaluer et de situer la performance numérique d'une entreprise. Pour ce faire, Gamache (2019) utilise un questionnaire développé par des comités d'experts pour le compte du ministère de l'Économie et de l'Innovation (MÉI) qui évaluent différentes pratiques d'affaires telles que la vision et la stratégie de l'entreprise, la veille technologique, la gestion du changement, l'agilité et l'innovation, etc. Ces

processus sont évalués selon l'échelle de Likert, adaptée par le CEFRIO, et présentés ci-dessous.

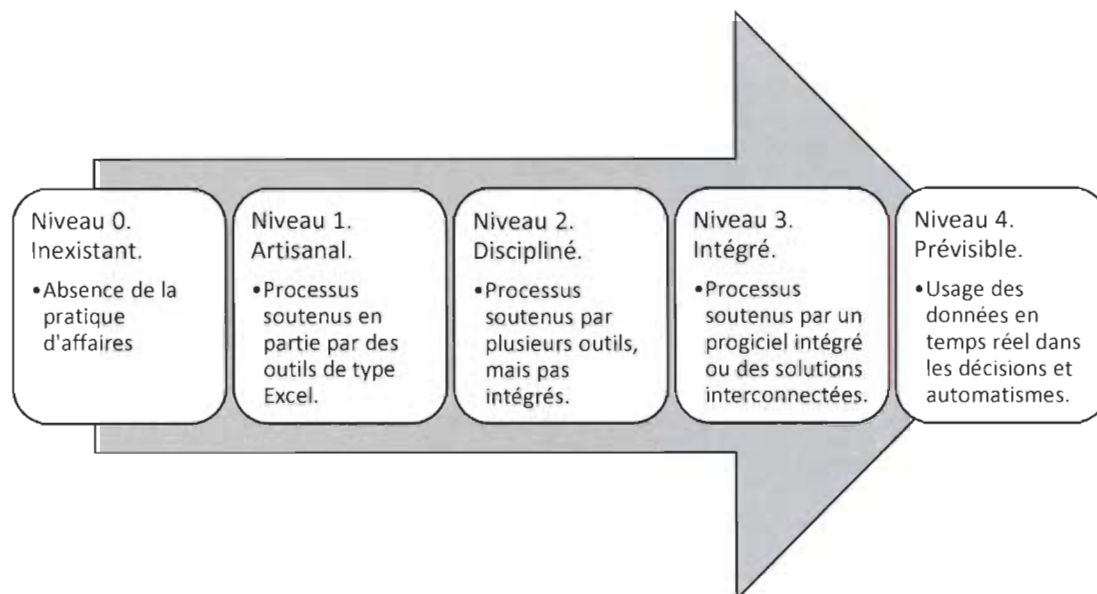


Figure 2.9 Échelle adaptée par Gamache du modèle originale retrouvé dans Beaudoin et al. (Gamache, 2019)

Ensuite, la quatrième étape de la stratégie d'implantation du 4.0 développée par Gamache (2019) lors de sa thèse est une étape de planification. Elle consiste à reprendre les résultats de l'étape 3 et d'« identifier les sources d'amélioration et [de] prioriser les projets dans un plan numérique [...] ». Une fois l'étape 4 terminée, la cinquième étape vise à tester et mettre en place les recommandations selon les priorités établies précédemment.

Enfin, la sixième et la septième étapes sont respectivement la phase de déploiement et d'optimisation. Lors de l'étape 6, l'auteur propose de « déployer les solutions numériques et non numériques dans l'ensemble des processus d'affaires ». Finalement, lors de la septième et dernière étape, la correction, l'optimisation des solutions et la mise en place du prochain projet sur la liste sont effectuées. Lorsqu'un nouveau projet est débuté, on

reprend à l'étape 4 pour tester et mettre en place les recommandations du prochain projet sur la liste des priorités.

Pour leur part, Moeuf, & al. (2018) décrivent les outils les plus utilisés pour initier un mouvement 4.0 dans les PME. De surcroit, les auteurs ont développé un outil d'analyse permettant de classer les différents articles de leur revue de littérature en fonction d'objectifs de performance désirés, de capacité managériale et de différents moyens de réalisation associés au concept de l'industrie 4.0. Cela permet donc, par exemple, de cibler des outils du 4.0 permettant l'atteinte de certains objectifs tels que la flexibilité, la réduction des coûts, l'amélioration de la productivité, etc. La Figure 2.10 présente le cadre d'analyse des auteurs et le Tableau 2.6, la traduction de ce dernier.

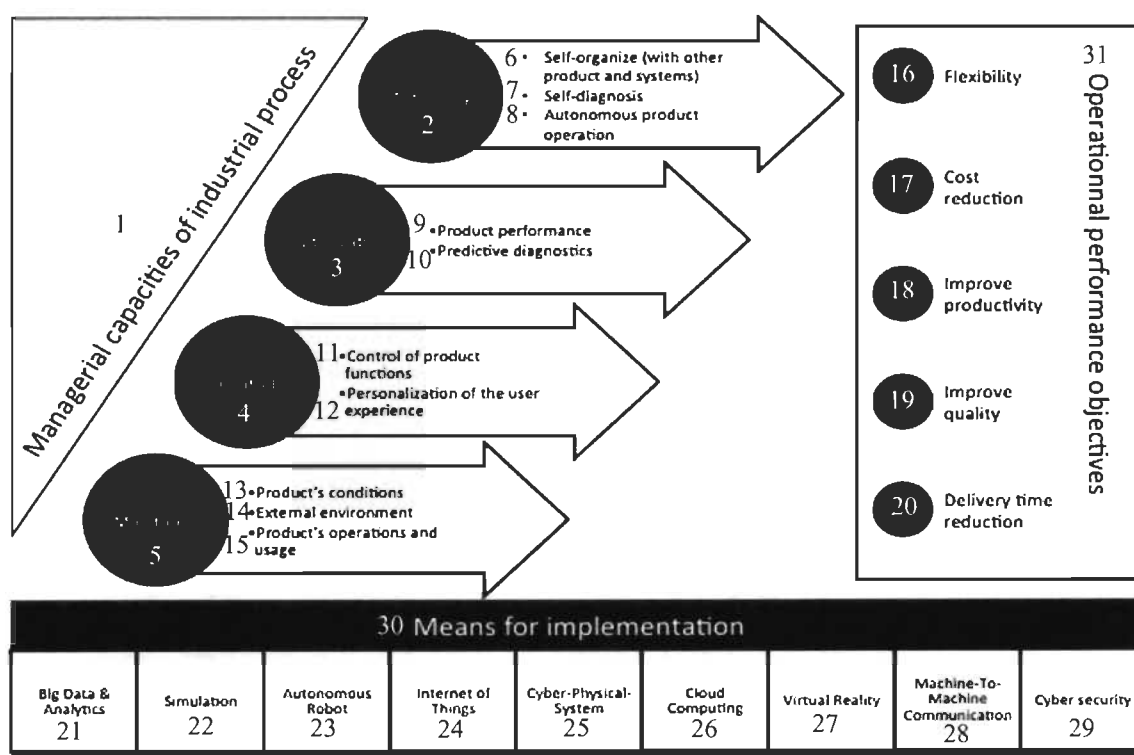


Figure 2.10 Cadre analytique des auteurs (Moeuf, & al., 2018)

Tableau 2.6 Traduction de la figure 10

#	Traduction	#	Traduction
1	Capacité managériale des procédés industriels	17	Réduction des coûts
2	Autonomie	18	Amélioration de la productivité
3	Optimisation	19	Amélioration de la qualité
4	Contrôle	20	Réduction du temps de livraison
5	Surveillance	21	Mégadonnée et analytique
6	Auto-organiser (avec les autres produits et systèmes)	22	Simulation
7	Autodiagnostic	23	Robot autonome
8	Opération de production autonome	24	Internet des objets
9	Performance du produit	25	Système cyberphysique
10	Diagnostic prédictif	26	Infonuagique
11	Contrôle des fonctions du produit	27	Réalité virtuelle
12	Personnalisation de l'expérience de l'utilisateur	28	Communication machine à machine
13	Condition du produit	29	Cybersécurité
14	Environnement extérieur	30	Moyen d'implantation
15	Fonctionnement et utilisation du produit	31	Objectifs de performance opérationnelle
16	Flexibilité		

À l'aide du cadre montré à la Figure 2.10, il est possible de cibler des outils à implanter en fonction des objectifs de performance opérationnelle désirée. Par exemple, si l'entreprise désire améliorer sa qualité, le cadre analytique de Moeuf, & al. (2018) propose d'implanter les outils et les principes de design suivant : mégadonnées, simulation, robot autonome, internet des objets et système cyberphysique. Cela représente le niveau de contrôle de leur échelle de capacité managériale des procédés industriels. Les auteurs ont réalisé leur étude sur plus d'une vingtaine d'articles et ceux-ci portaient entièrement sur les PME. Qui plus est, Moeuf, & al. (2018) ont uniquement réalisé leur étude sur des articles scientifiques et ils n'ont pas considéré les articles de portée commerciale. Cela

devient donc un outil intéressant pour les PME afin de connaître les moyens d'atteindre leurs objectifs à l'aide du 4.0 et de ses outils.

2.5 Matrice de la revue de littérature

2.5.1 Tableaux récapitulatifs de la matrice de revue de littérature

Cette section présente un exemple de la matrice de la revue de littérature. Les autres tableaux sont présentés en annexe afin d'alléger le texte. Celle-ci permet d'identifier les problématiques, objectifs, méthodologies, variables, hypothèses, mesures de performance et les résultats obtenus par différents auteurs d'articles scientifiques. En analysant les données obtenues dans ces tableaux, il est possible de valider une méthodologie et des variables appropriées à tester dans le cadre d'une nouvelle recherche.

Pour ce faire, les bases de données Scopus et Google Scholar ont principalement été utilisées. Les mots-clés recherchés sont les suivants : 4.0; usine intelligente; structure modulaire; conception modulaire; cellule dynamique; cobot; automatisation modulaire; « assemblage d'ambulance »; « assemblage de véhicule »; flexibilité; agilité. Note : les équivalents anglais des mots clés ont aussi été utilisés.

Tableau 2.7 Exemple de matrice de la revue de littérature

Article	Yang, Zhang, Chen, & Li (2010)	Yang, & al. (2017)
Problématique	Les lignes de production mixtes sont difficiles à modéliser et à résoudre.	La transition d'une production de masse vers une production de masse personnalisée augmente l'information nécessaire pour les entreprises.
Objectif	Simplifier et analyser un cas de ligne mixte.	Proposer un modèle basé sur l'internet des objets, l'infonuagique et la RFID pour faciliter le transfert d'information entre les différentes parties d'une entreprise (fournisseurs, clients, etc.).
Méthodologie	Étude de cas et développement mathématique (<i>complex weight network</i>).	Étude de cas.

Tableau 2.7 Exemple de matrice de la revue de littérature (suite)

Article	Yang, Zhang, Chen, & Li (2010)	Yang, & al. (2017)
Variable	Nombre de machines, d'opérateurs et de produits.	RFID, IOT et infonuagique.
Hypothèse	Simplification des sommets en quatre stades pour les machines (en production, attente, arrêt et bris). Simplification d'une ligne de production mixte en machine, produits et ressources (opérateur, outils, etc.).	Un système de communication en temps réel, entre les entreprises, leurs fournisseurs et leurs clients permettra d'augmenter la qualité des produits, leur cycle de vie et d'augmenter la productivité des entreprises.
Mesure de performance	Matrice de portée (<i>reach matrix</i>).	Faisabilité du système et commentaire des utilisateurs.
Résultat	La méthode de réseau pondéré complexe (<i>complex weight network</i>) est une méthode réalisable pour traiter les lignes mixtes.	Le système développé par les auteurs a été montré efficace mais nécessite des études plus approfondies. La simulation et la réalité virtuelle/augmentée permettront aussi d'augmenter l'efficacité d'avantage, selon les auteurs.
Article	Weyer, Schmitt, Ohmer, & Gorecky (2015)	Tzimas, & al. (2019)
Problématique	Les systèmes de production modulaire du 4.0 présentés jusqu'à maintenant sont spécifiques et difficilement applicables.	L'aspect technique de la réalité augmentée et son utilisation en entreprise sont peu documentés.
Objectif	Présenter un système de production hautement modulaire et standardisé développé dans le but de servir de référence pour les études sur le 4.0 et la production modulaire.	Montrer le potentiel de la réalité augmentée en entreprise.
Méthodologie	Étude de cas (test de production et observations sur la ligne développée par SmarIndustry ^{KL}).	Étude de cas (test d'un système de réalité augmenté en entreprise).
Variable	Modularisation d'une ligne d'assemblage, outils du 4.0 (CPS, IoT, RFID, etc.).	Réalité augmentée.
Hypothèse	Ligne de production en condition de laboratoire (environnement contrôlé).	La luminosité affecte la performance des caméras pour la réalité augmentée. L'utilisation d'une souris pour naviguer dans l'interface de l'application diminue la productivité du système.
Mesure de performance	Commentaires des utilisateurs/testeurs de la ligne.	Commentaire des utilisateurs et faisabilité.
Résultat	La ligne montre une flexibilité et une agilité élevées (temps de mise en course, reconfigurabilité, etc.). Toutefois, la fiabilité de la ligne semble être une problématique.	Les résultats ont montré qu'un système de réalité augmentée peut faciliter des tâches en entreprise tels que la mise en course de certaines pièces.

2.5.2 Analyse de la revue de littérature

Pour chaque article lu, les tableaux récapitulatifs de la revue de littérature présentent l'auteur, la problématique, l'objectif, la méthodologie, les variables (dépendantes et indépendantes), les hypothèses, les mesures de performance ainsi que les résultats obtenus lors de la recherche. Cela permet donc d'analyser visuellement et rapidement quels sont les aspects (problématique, objectif, méthodologie, etc.) les plus vécus ou utilisés dans la littérature. Par exemple, voici un diagramme d'Ishikawa réalisé à l'aide des tableaux récapitulatifs de la revue de littérature.

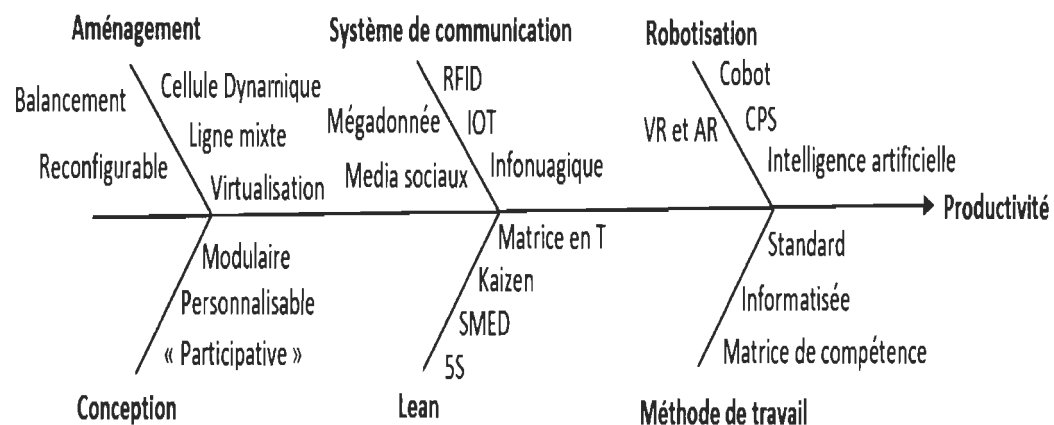


Figure 2.11 Diagramme d'Ishikawa des variables affectant la productivité d'une ligne d'assemblage

Cette figure résume les différentes variables indépendantes, regroupées sous différentes catégories, ayant eu un impact sur la productivité (concept de l'étude) d'une chaîne de montage pour différents auteurs. C'est-à-dire que l'on cible des variables pouvant influencer le concept à l'étude et, par la même occasion, la revue de littérature permet de cibler des mesures de performance efficaces pour contrôler ce concept. Pour cette étude, la mesure de performance principale est la quantité d'ambulances fabriquées par semaine. C'est donc à partir de cette mesure que l'on déterminera si une variable indépendante a un

impact ou non sur notre concept (la productivité de la ligne d'assemblage de cubes d'ambulance).

Ensuite, à partir de toutes ces variables identifiées, les tableaux récapitulatifs permettent d'identifier celles qui sont le plus utilisées dans la littérature. Le Tableau 2.8 ci-dessous montre, par ordre d'importance, les variables retrouvées dans la revue de littérature.

Tableau 2.8 Variable indépendante en ordre décroissant de fréquence d'utilisation dans la revue de littérature

Variable indépendante (VI)	Fréquence	Pourcentage d'articles ayant cité la VI
Outil 4.0 (global)	10	33,33 %
Aménagement cellulaire dynamique	5	16,66 %
IOT	5	16,66 %
Infonuagique	3	10,00 %
Agilité	3	10,00 %
<i>Lean</i>	3	10,00 %
Balancement de ligne	3	10,00 %
Réalité virtuelle ou augmenté	2	6,66 %
RFID	2	6,66 %
Automatisation/robotisation	2	6,66 %
Conception modulaire	2	6,66 %
Système cyber physique (CPS)	2	6,66 %
Virtualisation	1	3,33 %
Mégadonnée	1	3,33 %
Nombre d'articles	30	–

Le Tableau 2.8 permet d'illustrer quelles variables indépendantes sont le plus souvent citées dans la littérature. Bien sûr, cette analyse se fait sur un échantillon limité de la littérature, soit 30 articles dans le présent cas. Il n'en reste pas moins que cela éclaire le choix des variables indépendantes à utiliser lors d'une nouvelle étude. Finalement, le même type d'analyse est effectué avec la méthodologie. Dans ce cas, cela permet

d'éclaircir le type de méthodologie à adopter pour réaliser une étude. De cette façon, on préconise des méthodologies priorisées par les chercheurs du monde entier. Le Tableau 2.9 présente les méthodologies en ordre décroissant de fréquence d'utilisation dans la revue de littérature effectuée.

Tableau 2.9 Méthodologie en ordre décroissant de fréquence d'utilisation dans la revue de littérature

Méthodologie	Fréquence	Pourcentage d'articles ayant utilisé la méthodologie
Revue de littérature	17	56,66 %
Étude de cas	15	50,00 %
Simulation	10	33,33 %
Méthode Delphi	2	6,66 %
Développement mathématique	1	3,33 %
Sondage	1	3,33 %
Nombre d'articles	30	–

Le Tableau 2.9 montre que la revue de littérature, l'étude de cas et la simulation sont les méthodologies les plus utilisées. Ici, la revue de littérature a été utilisée pour débiter l'étude et renforcer les connaissances sur les sujets touchant la recherche. Ensuite, une étude de cas est faite sur une ligne de production dans une PME québécoise et les résultats sont tirés par expérience sur le terrain, si possible, et par simulation lorsque des contraintes de temps ou d'argent l'en empêche.

CHAPITRE 3 - MÉTHODOLOGIE

Dans ce chapitre, le choix de la méthodologie et des variables, telles que validées par la revue de la littérature, est présenté. Un plan d'expérience a été réalisé afin de guider la simulation et s'assurer de la collecte de données, de l'analyse des résultats et de la validité de l'étude de cas. Dans les prochaines sections, l'expérience terrain, la stratégie d'implantation du 4.0 utilisée, un rappel du choix des variables étudiées ainsi que leur niveau et le modèle de simulation sont présentés.

3.1 Interventions *lean* et 4.0 en PME

3.1.1 Description de la ligne d'assemblage et ses améliorations

La revue de littérature a permis de cibler les variables pouvant influencer la productivité d'une ligne d'assemblage de cubes d'ambulance. Toutefois, ces recherches restent au stade théorique puisqu'elles n'ont pas encore été validées dans la PME à l'étude. Cette section présente les différents projets réalisés en entreprise pour améliorer la ligne en fonction de ce que la théorie a énoncé.

Avant d'entreprendre ce projet de recherche, la ligne d'assemblage n'avait pas de méthode de travail standard à proprement parler. La formation se faisait par jumelage et il n'y avait pas de matrice de compétence pour suivre l'évolution des compétences sur la chaîne de montage. L'aménagement est cellulaire (fixe) et l'assemblage n'est pas centralisé, ce qui augmente les déplacements. L'équilibrage et la planification se font selon l'expérience des gestionnaires et les temps historiques de production sont disponibles à partir d'un logiciel ERP, donc pas en temps réel et avec plusieurs défauts tels que des erreurs de pointage, etc. Finalement, l'entreprise suit la philosophie *lean* et réalise des projets d'amélioration continue pour améliorer les performances de la ligne d'assemblage. Le

modèle de simulation prend en compte les changements effectués sur la ligne. La Figure 3.1 illustre le processus de la ligne de production.

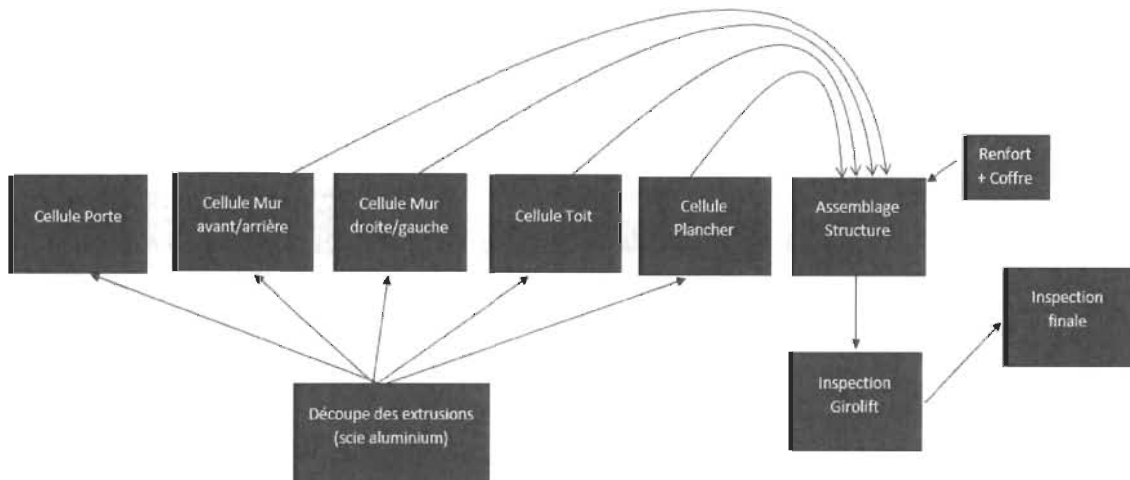


Figure 3.1 Processus de la ligne de production

La ligne est composée de cinq cellules qui consistent à fabriquer les portes, les murs : avant, arrière, gauche et droit, le toit et finalement, le plancher des cubes. Dans cette étude, la cellule de porte n'a pas été considérée puisqu'elle est gérée comme une ligne distincte. En effet, les portes suivent les ambulances sur la ligne mais peuvent être vendues séparément aussi. De plus, elles ne sont pas assemblées sur la structure, mais simplement déposées à l'intérieur et expédiées comme tel. Cette cellule n'est pas gérée de la même façon que les autres et n'est donc pas considérée dans cette étude. Toutefois, les temps de découpe des portes sont considérés, car ils affectent les temps de la ligne d'assemblage à l'étude. Les autres cellules sont dédiées à alimenter la ligne d'assemblage. Ensuite, la structure assemblée se dirige vers un premier poste d'inspection et de scellage (*inspection Girolift*). Finalement, le produit final termine sa course au poste d'inspection finale. S'il y a lieu, des réparations peuvent y être effectuées.

La première étape effectuée sur la chaîne de montage est la standardisation des méthodes de travail et des processus en instaurant un programme de formation. Pour ce faire, l'entreprise a acquis un logiciel permettant d'informatiser et de rendre disponibles sur tous les postes de travail les méthodes de chacune des opérations. Ensuite, avec l'aide d'employés expérimentés, des méthodes de travail standards ont été montées afin de réduire la variabilité des temps de production. De plus, une matrice des compétences a été instaurée afin de suivre les requis de formation des employés sur la ligne. Finalement, des 5S ont été implantés dans le but de standardiser les outils, réduire la recherche et les déplacements inutiles et rendre l'information disponible.

De nouveaux gabarits ont été conçus pour augmenter la capacité de certains postes de travail et, couplés à des études SMED, ont facilité et diminué le temps de mise en course. Par exemple, un gabarit double a été conçu sur le poste de fabrication des toits d'ambulance afin de doubler sa capacité. De surcroît, l'identification des butés sur les gabarits a été révisée pour faciliter les changements d'un produit à un autre sur la ligne. Aussi, des projets d'amélioration continue ont été réalisés dans le but d'augmenter l'efficacité de la ligne et cela, à moindre coût. Par exemple, de nouveaux procédés de colle plus efficace ont été testés et implantés sur la ligne afin de réduire les temps de séchage.

Pour ce qui est de l'aménagement, des contraintes de coûts et de temps n'ont pas permis d'effectuer de changements physiques pour le moment. L'expérience acquise sur le terrain a permis de connaître les contraintes vécues par les entreprises ainsi que les facteurs facilitants pour l'implantation de certains projets. Dans ce projet, l'implication de la direction est l'une des pierres angulaires du changement. Sans la collaboration de la haute direction, aucun projet n'aurait pu être réalisé. Bien sûr, la simulation permet de vérifier certaines solutions de façon hors ligne et d'éviter certaines contraintes, mais l'implantation physique de solutions et la validation pratique de celles-ci passent par la haute direction. Il en est de même avec les employés de production qui vivent le changement et qui utilisent les nouveaux outils, etc. La coopération entre les employés et

la direction sont donc un élément clé de la réussite de l'implantation de tout projet d'amélioration.

L'amélioration continue des processus se base beaucoup sur l'expérience des employés. Comme ils développent une expertise dans leur domaine, le *lean* a pour principe de transformer ces connaissances en valeur ajoutée. Pour ce faire, des rencontres avec les employés sous forme d'atelier (Kaizen) sont effectuées pour tirer des idées afin de pallier certains problèmes sur la ligne ou simplement pour l'améliorer. En premier lieu, les employés les plus expérimentés ont permis d'établir des méthodes de travail standards et efficaces pour chacun des postes de travail. Bien sûr, les employés ont été formés pour apprendre à reconnaître les différentes formes de gaspillage (*muda*) énoncées par les pratiques du *lean manufacturing*.

D'autres projets ont été réalisés dans le but d'améliorer l'efficacité de la ligne avant la simulation. Un de ces projets est fait sur la cellule de fabrication de toit, un goulot, le temps de séchage de la colle était un gros problème. En effet, la colle anciennement utilisée prenait quatre heures pour sécher. En effectuant quelques recherches et en utilisant le logiciel de simulation Arena pour estimer la rentabilité d'un tel projet, un nouveau procédé de colle avec un activateur plus puissant a permis de diminuer les temps de séchage de 4 heures à 10 minutes. Cela a permis de libérer plus rapidement le gabarit de toit et de sortir plus d'ambulances (0,75 cube par semaine pour être plus précis). Bien sûr, les goulots peuvent se déplacer sur la ligne mais la simulation (le jumeau virtuel de la ligne) a permis de simuler ce déplacement et de garantir la rentabilité d'un tel projet.

Les déplacements de certaines pièces des cubes d'ambulance étaient longs et fastidieux pour les employés. Des charriots à roue ont donc été développés pour déplacer les grandes tôles de mur, toit, etc., ainsi que les différents types de renforts et toutes sortes de pièces entre les différents postes. Cela a augmenté l'agilité de la ligne par rapport à l'ancien système où certains postes étaient dépendants des charriots élévateurs, a diminué le risque

de blessures et les temps de déplacement de façon générale. De plus, comme l'entreprise œuvre dans le métal, il est simple et rapide de développer et produire de tels outils et ce, à moindre coût.

Finalement, la méthodologie des 5S et la standardisation des quincailleries ont été appliquées afin de réduire le temps de recherche d'information et d'outils, de réduire le risque d'erreur et de diminuer les déplacements. Comme certains postes nécessitent de se promener autour du cube d'ambulance, qui a des dimensions non négligeables, des charriots 5S ont été montés pour davantage réduire les déplacements. De la sorte, les employés peuvent emmener facilement tous les outils dont ils ont besoin pratiquement n'importe où. Du côté des quincailleries, le nombre de rivets, vis, etc. a été standardisé et réduit au strict minimum. Cela permet une meilleure gestion des inventaires, une réduction des erreurs, de recherche et une diminution de l'espace requise pour stocker ces composantes.

Du côté de l'amélioration du système de communication et dans le but de s'approcher d'un système en temps réel, l'entreprise a acquis une nouvelle plateforme pour gérer l'information qui circule dans l'entreprise. Ce nouveau logiciel, Visual Knowledge Share (VKS), permet de recueillir des informations en temps réel et d'éliminer les processus papier en les remplaçant par une application internet. En étant relié à l'ERP de l'entreprise, VKS a accès à plusieurs informations. Il permet notamment d'augmenter la réactivité sur la ligne en envoyant des signaux (témoin lumineux, courriel, etc.) lorsqu'un problème est détecté ou lorsqu'il y a des difficultés. La maîtrise et le développement de ce logiciel sont toujours en cours dans l'entreprise. Toutefois, toutes les instructions de travail sont numérisées dans VKS et sont accessibles sur n'importe quel poste de travail. Cela a pour avantage de rendre disponible toute amélioration à travers l'entreprise.

L'équipe d'informatique de l'entreprise à l'étude travaille de connivence avec celle de VKS pour développer et adapter cet outil pour l'entreprise. Dans un avenir rapproché,

l'entreprise aimerait obtenir davantage d'information en temps réel permettant d'augmenter davantage sa réactivité. En outre, le fait d'informatiser les bons de travail, par exemple, limite les erreurs et les pertes de temps en lien avec la recherche d'information ou la perte d'information. Il reste toutefois du travail à faire et cela ne sera pas traité dans cette étude.

3.1.2 Mise en place d'une stratégie d'implantation du 4.0

En se basant sur la littérature et sur l'expérience de l'entreprise dans son domaine, une stratégie d'implantation du 4.0 a été suivie afin de faciliter la transition vers ce nouveau concept. Une cartographie de la chaîne de valeur de la ligne d'assemblage a été effectuée afin d'« assurer le contrôle des processus » de la ligne à l'étude (Gamache, 2019). Par la suite, les principes d'amélioration continue ont été adoptés afin d'augmenter l'agilité et la productivité de la ligne. De plus, le *lean* permet d'assurer une pérennité des projets d'amélioration. Dans la section précédente, des exemples de projets d'amélioration effectués dans l'entreprise ont été présentés.

Les prochaines étapes pour diriger l'entreprise vers l'ère du 4.0 sont les suivantes : le réaménagement de la ligne en cellule dynamique et en ligne mixte, l'automatisation modulaire de la ligne à l'aide de robots/cobots, etc., la conception de produit modulaire et l'intégration d'outils et de principe de design tel que l'IOT. Certains projets sont en branle dans l'entreprise mais ne pourront être concrétisés avant la fin de ce projet de recherche. Par exemple, l'entreprise a acquis un logiciel permettant de relier ces machines entre elles à l'aide de l'internet des objets. Cela permettra de suivre la production en temps réel et d'obtenir des informations pertinentes quant à la production de certaines composantes et au statut de certaines machines. Pour obtenir des résultats fiables à traiter, un plan d'expérience (DOE) et la simulation sont utilisés pour valider la stratégie d'implantation et éviter les surprises.

Les études sur l'implantation du 4.0 dans les milieux des PME sont peu nombreuses. De plus, certaines d'entre elles restent générales quant aux secteurs des entreprises étudiées. Ce travail de recherche vise à adapter les stratégies d'implantation de 4.0 à l'industrie du métal. La stratégie d'implantation développée ici suit la même logique que ce qu'on retrouve dans la littérature mais certaines étapes sont adaptées à l'industrie du métal qui comporte ses propres forces et faiblesses.

3.2 Modèle de simulation

Avant de débiter les explications par rapport au modèle de simulation, rien ne vaut mieux qu'une image. De ce fait, la Figure 3.2 suivante illustre le modèle développé pour cette étude. Le logiciel de simulation utilisé est Arena de Rockwell.

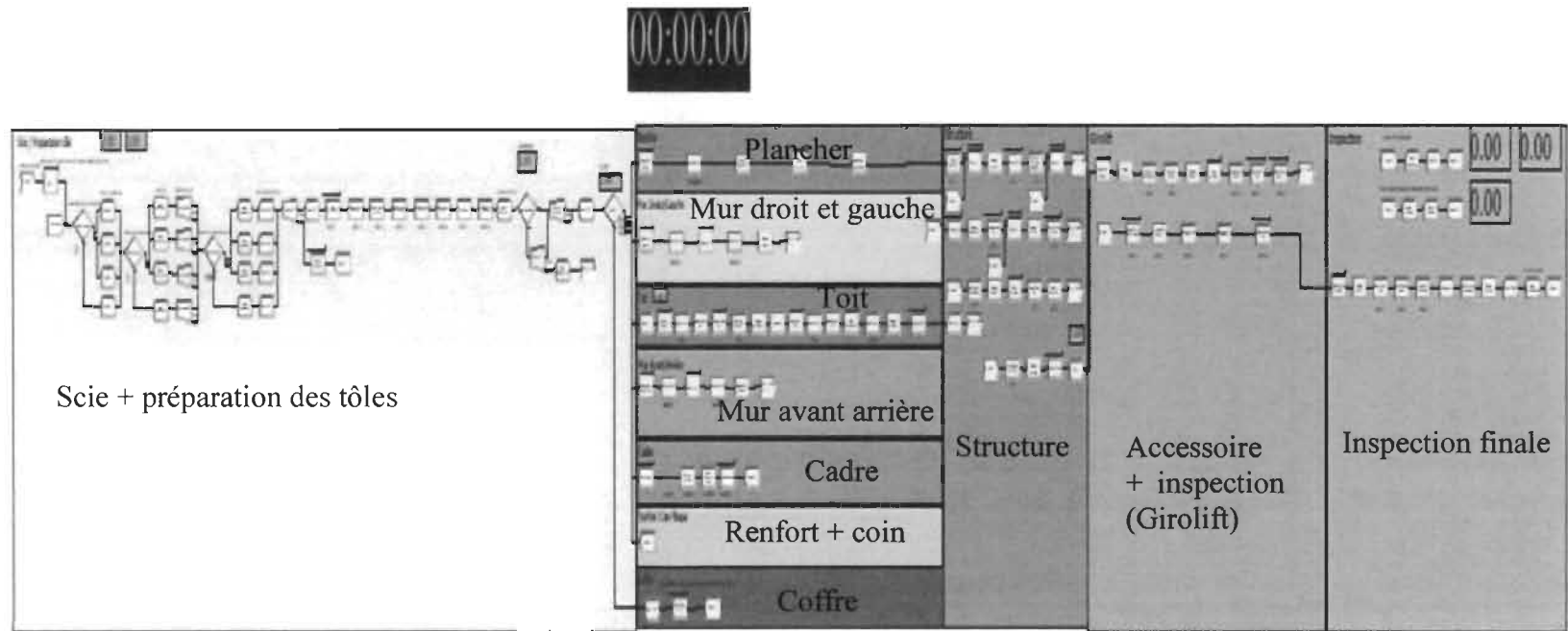


Figure 3.2 Modèle de simulation

La Figure 3.2 représente le cheminement d'une commande de structure (cube) d'ambulance jusqu'à sa complétion sur la ligne d'assemblage. Dans le but de faciliter la compréhension du modèle ainsi que sa validation, celui-ci a été séparé en plusieurs sections ou postes de travail. Le modèle de simulation débute avec la création d'une commande qui, par la suite, établit quel type et combien de cubes sont en commande. Avec l'aide d'une analyse Pareto, le modèle choisit aléatoirement entre quatre types de structures. Concrètement, cela donne 39 % pour la structure la plus populaire (616), 24,5 % pour la seconde (633), 19 % pour la troisième (621) et 17,5 % pour la dernière (619). Toute autre structure a été considérée comme négligeable. Le Tableau 3.1 et le Tableau 3.2 résument l'analyse Pareto effectuée. Aussi, la taille des commandes varie entre 2, 4, 6 et 8 unités. Cette fois-ci, tous avec la même probabilité d'être choisis par le système.

Tableau 3.1 Résultat de l'analyse Pareto des commandes des différents modèles de structure

Modèles	Quantités commandées	Pourcentage
B800616	60	27,03 %
B800633	38	17,12 %
B800621	29	13,06 %
B800619	27	12,16 %
B800638	13	5,86 %
B803638	12	5,41 %
B800617	12	5,41 %
B800632	10	4,50 %
B800644	5	2,25 %
B800645	4	1,80 %
B806617	3	1,35 %
B804638	3	1,35 %
B807621	2	0,90 %
B810621	1	0,45 %
B800643	1	0,45 %

Tableau 3.1 Résultat de l'analyse Pareto des commandes des différents modèles de structure (suite)

Modèles	Quantités commandées	Pourcentage
B804619	1	0,45 %
B800621-SPEC	1	0,45 %
Total	222	100,00 %

Tableau 3.2 Résultat de l'analyse Pareto après élimination des modèles considérés négligeables

Modèle	Quantités commandées	Pourcentage
B800616	60	39,0 %
B800633	38	24,5 %
B800621	29	19,0 %
B800619	27	17,5 %
Total	154	100,0 %

Une fois le modèle et la taille de la commande déterminés, le modèle attribue les différentes caractéristiques relatives aux différentes structures. Ce sont les temps de production des différentes opérations qui sont sous-entendus par caractéristiques. Ensuite, la production de la commande débute. Les premières opérations consistent à découper et préparer les différentes extrusions et tôles utilisées pour fabriquer les composantes et les sous-composantes de la structure d'ambulance. À la fin de cette étape, un module est utilisé pour déterminer le nombre de structures en cours de fabrication. Lorsqu'il y a trois structures ou moins dans le système, le modèle crée une nouvelle commande pour assurer une production en continu (ce qui représente la réalité).

Ensuite, les différentes extrusions continuent leur chemin et se dirigent vers la prochaine étape de leur transformation. Les prochaines étapes se déroulent en parallèle. C'est-à-dire que la production se fait simultanément sur différents postes de travail. Cela veut donc dire que c'est l'opération goulot, la plus lente des sept, qui impacte le temps de passage

total des structures. Ces opérations sont les suivantes : l'assemblage et la soudure du plancher, des murs droit et gauche, des murs avant et arrière, du toit (opération goulot), ainsi que la fabrication des cadres, des renforts et des coffres.

Lorsque toutes ces opérations sont terminées, c'est l'assemblage de la structure qui commence. Au fur et à mesure que les entités avancent dans le processus de fabrication de la structure, les différentes entités créées par le système pour fabriquer les murs, le toit, plancher, etc. fusionnent les entités pour terminer avec une seule entité, soit une structure d'ambulance. Celle-ci poursuivra son chemin vers un premier poste d'inspection, d'isolation et d'accessoirisation. Pour faire court, ce poste est nommé « Girolift » au sein de l'entreprise puisque les différentes opérations se déroulent sur ce type de système de levage hydraulique.

Une fois la pose des accessoires et les premières inspections terminées, le cube d'ambulance passent à l'inspection finale, puis est déplacé dans la zone d'entreposage avant expédition. Une fois toutes les opérations terminées, le système collecte des informations telles que le temps de passage et la quantité de structures fabriquées avant de disposer de l'entité. De plus, des modules indépendants sont utilisés pour calculer le nombre de cubes fabriqués et les ventes par semaine.

3.2.1 Données de simulation

Pour obtenir des résultats qui reflètent la réalité, il est capital de construire son modèle de simulation avec des données pertinentes. Dans cette étude, comme les temps de fabrication sont très longs et qu'il y a un grand nombre d'opérations, les données historiques de l'entreprise ont été utilisées pour construire les distributions statistiques des différentes opérations. Ce sont donc les données tirées de l'ERP qui ont permis d'obtenir des échantillons suffisamment grands pour être précis. Toutefois, comme les données tirées

d'un ERP peuvent contenir des données aberrantes dues à des erreurs d'entrées ou autres, il faut porter une attention particulière à l'analyse de ces données avant de les utiliser.

Pour ce faire, des tableaux ont été construits avec l'aide du logiciel Excel afin de vérifier et retirer, au besoin, les données aberrantes. De plus, afin d'obtenir des distributions statistiques précises, des échantillons d'au moins 30 données ont été respectés lorsque cela était possible. Pour celles où il n'était pas possible d'obtenir des échantillons aussi grands, des hypothèses ont été portées. Cependant, toutes les opérations critiques respectent un minimum de 30 données. Cela permet de respecter la loi du grand nombre. La Figure 3.3 présente un exemple de tableau qui a été réalisé dans le but de vérifier les données du système ERP pour une opération d'assemblage et de soudage du mur gauche d'une structure d'ambulance modèle 616. Pour alléger le document, les autres tableaux sont conservés sur une clé usb.

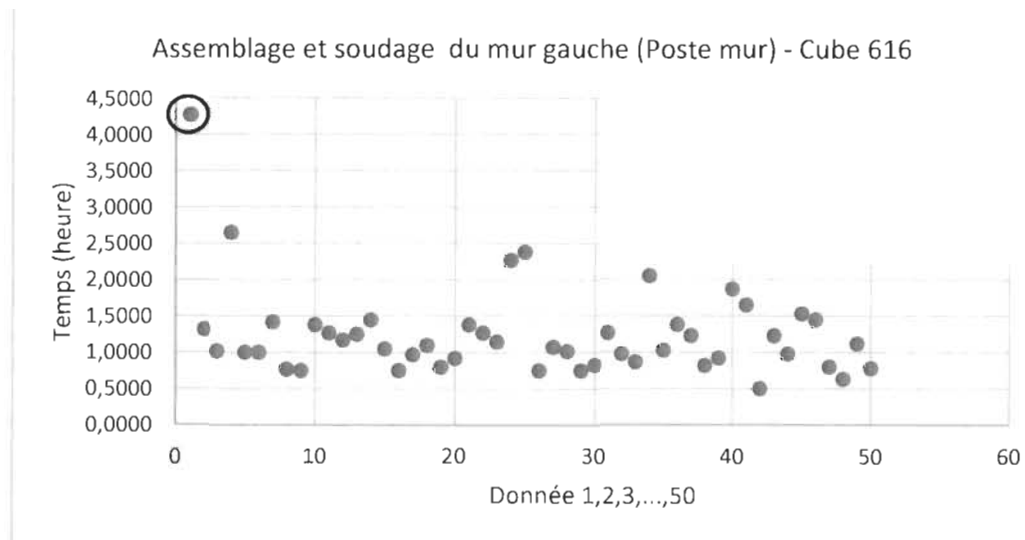


Figure 3.3 Exemple de tableau de vérification de données

Dans cet exemple, on voit qu'une donnée est encerclée en rouge. Elle représente une donnée aberrante causée par une erreur d'entrée de donnée. Par la suite, c'est à l'aide de

l'*input analyzer* d'Arena que les distributions statistiques ont été construites. Voici un exemple d'une distribution tirée de l'*input analyzer*.

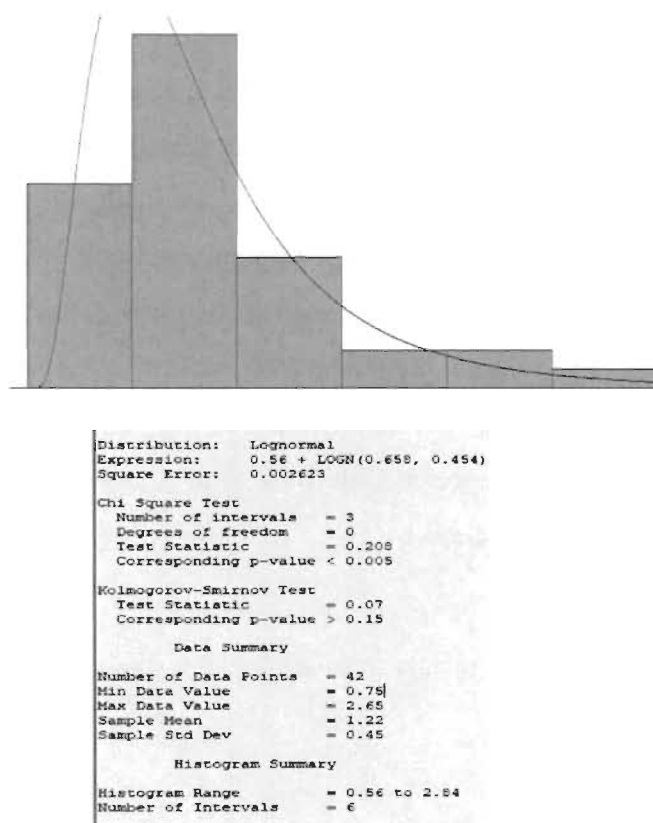


Figure 3.4 Exemple de distribution tiré de l'*input analyzer* d'Arena

Ce qui est intéressant, c'est le fait que ce logiciel donne les résultats de test statistique tel que le chi carré et le test de Kolmogorov-Smirnov afin de valider les résultats obtenus. Qui plus est, c'est un moyen rapide d'obtenir des distributions statistiques intéressantes. Bien sûr, cela à condition de fournir des données pertinentes aux logiciels. D'où la validation des données préalablement réalisées avec Excel.

3.2.2 Hypothèses limitatives

Dans le but de limiter la complexité de l'étude sans compromettre la validité des résultats, il est primordial d'énoncer certaines hypothèses pour cadrer le modèle de simulation. Comme il est impossible de tester tous les facteurs qui ont un impact sur le système, pour une question de temps et d'argent, il faut cibler les variables les plus pertinentes de l'étude. Pour contrôler l'environnement dans lequel les variables à l'étude seront testées, les autres facteurs, dits bruit, seront contrôlés, lorsque possible, à des niveaux d'intérêt, sinon ils seront laissés au hasard. Dans cette étude, voici la liste des hypothèses limitatives :

Hypothèse A. Certains transports ont été considérés comme négligeables.

Hypothèse B. Temps de transport considéré constant.

Hypothèse C. Les machines et outils sont considérés fiables et bien entretenus.

Hypothèse D. Temps de travail indirect moyen (réunion, formation, nettoyage, etc.) des employés considérés et inclus dans la l'horaire de production.

Hypothèse E. Temps de réparation considéré constant.

Hypothèse F. Certaines distributions avec peu de données comme échantillon sont considérées comme suffisantes.

Hypothèse G. Temps de mise en course entre deux modèles d'ambulance négligeable (gabarit).

Hypothèse H. Temps de transport négligeable dans les cellules dynamiques.

Hypothèse I. Les modèles de cubes en commande sont modélisés en fonction du pourcentage de commandes reçues dans la dernière année (analyse Pareto). Certains modèles ne sont pas à l'étude et considérés négligeables.

Hypothèse J. Le nombre de cubes en commande varie entre 2, 4, 6 et 8 unités. Les quantités mentionnées ont toutes la même chance d'être choisies par le modèle (25 %).

Hypothèse K. Les commandes sont infinies et la fabrication débute lorsqu'il y a trois structures ou moins sur la ligne de production.

3.2.3 Régime permanent

Pour représenter la réalité le plus fidèlement possible, il faut tenir compte de plusieurs facteurs. L'un d'entre eux est le régime permanent. En effet, l'entreprise à l'étude est bien établie depuis plusieurs années et fabrique des pièces en continu. Pour ne pas fausser les résultats de simulation, il faut tenir compte dans les temps de production que les postes de travail et la ligne de production sont déjà en cours de production. En effet, si l'on ne le faisait pas, la simulation débiterait avec une ligne de production vide, ce qui réduirait considérablement le temps de passage (ainsi que la quantité de cubes fabriqués par semaine) puisqu'il n'y aurait aucun temps d'attente au début de la simulation.

Encore une fois, c'est avec l'aide d'un module du logiciel Arena de Rockwell que le régime permanent a été déterminé. Voici le graphique obtenu avec l'*output analyzer* d'Arena.

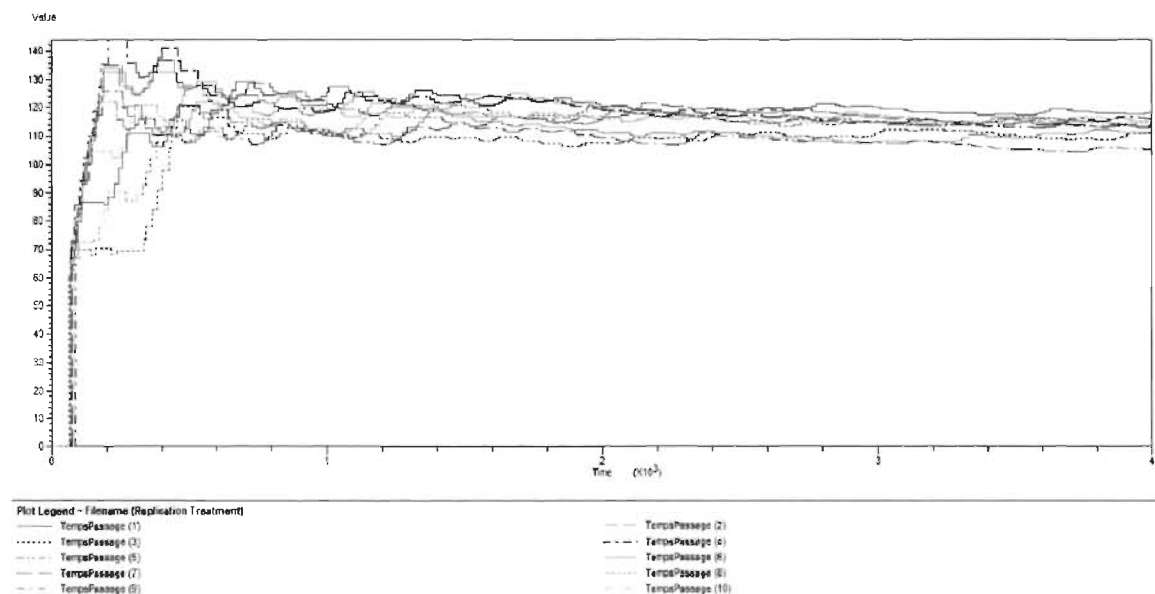


Figure 3.5 Régime permanent - graphique obtenu de l'*output analyzer* d'Arena

En utilisant le graphique obtenu ci-dessus, il est possible de déterminer un temps de réchauffement (*warm-up*) de 2 500 heures avant que le système ne fonctionne en régime permanent. Pour ce qui est du temps de simulation utilisé, 10 000 heures ont été utilisées. Avec quelques essais et erreurs, il a été déterminé qu'à partir de ce point, les résultats obtenus variaient peu et étaient donc considérés fiables.

3.2.4 Validation du modèle de simulation

Dans le but de s'assurer que les résultats obtenus par le modèle de simulation reflètent bel et bien la réalité de la ligne de production, plusieurs validations ont été effectuées. Voici une liste d'étapes réalisées. Cette méthode de validation est inspirée de Gamache (2016).

1. Définir la portée de l'étude et la problématique.
2. Récolter, vérifier et valider les données.
3. Construire un modèle de simulation « actuel » qui représente bien la ligne étudiée. Construire section par section en validant chacune d'entre elles au fur et à mesure.
4. Valider le modèle en utilisant des animations. Vérifier que les étapes de production sont bel et bien le reflet de la réalité. Vérifier les files d'attente.
5. Utiliser des temps constants et valider les opérations. Calculer manuellement les temps versus obtenus par logiciel.
6. Construire des distributions statistiques fiables pour les opérations.
7. Vérifier par section que les temps obtenus reflètent la réalité. Par exemple, utiliser des modules permettant de calculer les temps de passage et vérifier les temps de production des différents postes (quel est le temps réel pour fabriquer un toit et comparer avec le temps obtenu par simulation).
8. Vérifier les modules de décisions « *Decide* » avec l'aide de compteur et du module « *Record* ». S'il y a 39 % de cubes 616 à fabriquer, combien mon modèle en fabrique-t-il? Lancer un nombre fini d'entités dans le système et valider.

9. Valider que les ressources goulots dans la réalité sont les goulots dans la simulation. Utiliser les pourcentages d'utilisation des ressources et les temps de fabrication.
10. Vérifier les horaires de production. Utiliser des variables pour s'assurer d'avoir le bon nombre d'opérateurs.
11. Vérifier et valider les hypothèses appliquées sur le modèle. Utiliser l'expertise des employés, superviseurs, ingénieurs, etc. présents dans l'entreprise.
12. Comparer le temps de passage et la quantité de pièces produites dans un temps donné par rapport à la réalité. L'entreprise fabrique un peu moins de six cubes par semaine actuellement. Par simulation, le modèle actuel donne environ 5,8 structures par semaine, ce qui correspond à la réalité.

Une fois le modèle de simulation actuel construit et validé, il est maintenant possible de lui apporter des changements pour vérifier virtuellement l'impact des variables sur la ligne de production. Par exemple, il est possible d'ajouter des ressources, de robotiser des postes de travail, d'équilibrer autrement la ligne, etc., et de voir les changements sur le temps de passage des pièces. Cela permet aussi, entre autres, de visualiser les déplacements des goulots et le taux d'occupation des ressources. C'est avec ces modèles que les données du plan d'expérience sont tirées. Comme pour le modèle actuel, les modèles futurs sont validés. Toutefois, c'est beaucoup plus rapide puisqu'ils sont construits à partir du modèle actuel qui a été préalablement validé.

3.3 Choix des variables et de leur niveau

Les variables étudiées dans cette recherche ont été choisies à partir des lectures et des analyses effectuées lors de la revue de littérature. Les variables qui sont ressorties comme pertinentes pour influencer la productivité de la ligne d'assemblage sont nombreuses, seulement celles pertinentes à cette étude ont été sélectionnées. Ces variables sont l'aménagement avec les cellules dynamiques (A), la conception modulaire (B), la

robotisation (C), l'équilibrage de ligne mixte (D), l'automatisation modulaire (E), l'amélioration continue ou *lean* (F) et l'amélioration du système de communication (G).

Les effets des variables sélectionnées, les cinq premières (A à E) sont étudiées en utilisant un plan d'expérience et la simulation à l'aide du logiciel Arena de Rockwell. À l'aide des plans orthogonaux de Taguchi, l'impact de ces variables sur la réponse mesurée, le nombre d'ambulances fabriquées par semaine, est mesuré et analysé. L'impact de l'interaction entre ses facteurs est également évalué. Cela permet de déterminer la meilleure combinaison pour réussir l'implantation de 4.0.

À présent, le Tableau 3.3 présente les variables indépendantes ainsi que leur niveau. C'est à partir de ce tableau que le plan d'expérience DOE est construit.

Tableau 3.3 Facteur et niveaux

Facteur	Niveau 1	Niveau 2
Aménagement (A)	Aménagement actuel	Cellule dynamique centralisée
Conception modulaire (B)	Aucune	Plateformes standards et modules
Robotisation (C)	Sans robot	Avec robot
Balancement de ligne (D)	Sans équilibrage	Avec équilibrage naturel
Automatisation modulaire (E)	Sans cobot	Avec cobot

Tel que démontré dans les sections précédentes, les deux variables (F) et (G), le *lean* et l'amélioration du système de communication, sont déjà implantées dans l'entreprise et sont intégrées dans le modèle de simulation. La littérature fait consensus sur l'impact positif de ces variables pour la réponse à l'étude.

3.4 Modèles mathématiques

L'équation mathématique représentant le modèle d'expérience est la suivante :

$$Y_{ijklmno} = \mu + A_i + B_j + C_k + D_l + E_m + AB + AC + AD + DE + \varepsilon_{o(ijklm)}$$

où

- Y_{ijklmn} : La réponse mesurée (temps de passage d'un cube).
- A_i : Le niveau i de la variable « aménagement ».
- B_j : Le niveau j de la variable « conception modulaire ».
- C_k : Le niveau k de la variable « robotisation ».
- D_l : Le niveau l de la variable « balancement de ligne ».
- E_m : Le niveau m de la variable « automatisation modulaire ».
- AB : Interaction entre les facteurs A et B.
- AC : Interaction entre les facteurs A et C.
- AD : Interaction entre les facteurs A et D.
- DE : Interaction entre les facteurs D et E.
- $\varepsilon_{o(ijklmn)}$: L'erreur expérimentale.

Toutes les variables à l'étude ont deux niveaux. Celles-ci sont présentées au Tableau 3.3.

3.5 Hypothèses statistiques

Dans cette section, une liste d'hypothèses statistiques, qui sont vérifiées lors de l'étude, est présentée.

Hypothèse 1. La transition vers un aménagement cellulaire dynamique augmente l'agilité et la productivité de la ligne d'assemblage.

Les aménagements sont une source importante de gaspillage. Par exemple, une mauvaise configuration du plancher peut engendrer des manutentions et des déplacements inutiles, de la non-qualité, de la recherche d'information, etc. Les aménagements cellulaires sont réputés pour diminuer les temps de mises en course, les déplacements et les manipulations en rapprochant les machines liées les unes des autres. De plus, en combinant cela à un aménagement dynamique facilement reconfigurable, on peut diminuer les différents gaspillages énumérés pour différents modèles de produits sur une même ligne d'assemblage en optimisant la distance entre les machines.

Hypothèse 2. La conception modulaire permet de réduire les temps de changement de produit et donc d'augmenter l'agilité et la productivité.

La conception modulaire permet de réduire le nombre de composantes à gérer sur une ligne d'assemblage en passant de plusieurs composantes à une poignée de modules s'assemblant pour former un produit fini. Ce principe utilise une plateforme standard sur laquelle on vient assembler les modules (ou options) pour former différents produits de façon très efficace. La standardisation est la clé de la conception modulaire.

Hypothèse 3. La robotisation augmente la capacité de production, diminue les temps de cycles et augmente la qualité des produits. Tout cela a un impact direct sur la productivité de l'entreprise.

En robotisant les opérations qui sont répétitives, dangereuses ou goulots, on augmente la productivité de l'ensemble de la chaîne de production. En outre, la qualité est augmentée et la variabilité est contrôlée par la fiabilité du robot utilisé. Contrairement aux opérations manuelles qui dépendent beaucoup de l'employé, les robots peuvent conserver une meilleure qualité en réduisant la variabilité.

Hypothèse 4. L'adoption des principes d'équilibrage naturel permet d'augmenter la productivité de la ligne en réduisant les temps de cycle aux goulots.

En formant les employés pour les rendre multidisciplinaires et en les sensibilisant aux opérations goulots, il est possible d'augmenter la productivité de la ligne d'assemblage. Il est essentiel de travailler sur les bonnes opérations et au bon moment afin de ne pas créer d'encours inutilement et de diminuer le temps de passage des produits à valeur ajoutée (produits finis).

Hypothèse 5. L'automatisation modulaire augmente l'agilité et la réactivité de l'entreprise, ce qui augmente la productivité.

L'automatisation des procédés permet de diminuer la variabilité dans les temps de production et dans la qualité des produits. De plus, l'utilisation de cobots est beaucoup plus flexible et agile que celle des robots car leur programmation est simple et rapide. Cela peut donc être intéressant lorsque plusieurs produits différents doivent être travaillés, tels que dans un contexte de production de masse personnalisée.

Dans le but de rendre les expériences répétables et de comprendre les changements apportés entre le modèle actuel et les modèles futurs, le Tableau 3.4 résume les changements apportés pour simuler l'impact des différents facteurs à l'études.

Tableau 3.4 Changements apportés aux facteurs dans le modèle de simulation selon leur niveau

Facteurs	Niveau 1	Niveau 2
	Description	Description
Aménagement (A)	Temps de transport considéré	Tous les temps de transport considérés négligeables.

Tableau 3.4 Changements apportés aux facteurs dans le modèle de simulation selon leur niveau (suite)

Conception modulaire (B)	Tous les temps de cubes à l'études sont considérés. Beaucoup de variabilité.	Simuler avec une structure modulaire standard (module 616).
Robotisation (C)	Aucun robot. Production manuelle seulement.	Robotisation des opérations de soudure de toits (goulot de la ligne). Quinze minutes de préparations des gabarits, réduction de 30 % du temps de soudure et cinq minutes pour vider le robot.*
Balancement ligne (D)	Sans équilibrage naturelle	Avec équilibrage naturel. Limite d'encours de trois unités avant qu'un employé se déplace vers le poste en amont ou en aval. Diminution du temps de production de 50 % lorsque deux employés exécutent une même opération.*
Automatisation modulaire (E)	Sans cobot. Production manuelle seulement.	Ajout d'un cobot pouvant effectuer n'importe laquelle des opérations de soudure sur les postes goulots selon la disponibilité de celui-ci. Réduction des temps de soudure de 10 % et 15 minutes de préparation.*

* Les réductions de temps de production ont été approximés par expérience sur le terrain et avec l'aide d'entreprises professionnelles pour les robots et les cobots. Le nom de ces entreprises ne sera pas divulgué dans ce rapport par souci de confidentialité. Pour le balancement, c'est par étude de temps que le 50 % a été approximé.

3.6 Plan d'expérimentation L16

Un plan Taguchi L16 est utilisé pour déterminer les variables ayant un impact réel sur la réponse à l'étude, soit le temps de passage. Un plan L16 est choisi car cela permet d'obtenir un nombre de degré de liberté pour l'erreur intéressant (6) en fonction de la

quantité de facteur et de niveau. Cela permet donc d'augmenter la précision des résultats tout en limitant le nombre d'expérimentations. Une fois le plan d'expérience complété, différents modèles de simulation sont utilisés pour mesurer la variation du temps de passage par rapport au modèle actuel. Le Tableau 3.5 et le Tableau 3.6 présentent le plan L16 utilisé ainsi que la signification des différents niveaux utilisés.

Tableau 3.5 Plan Taguchi L16, variables et niveaux (1,2)

Expérimentation	Colonne														
	B	A	AB	E	AD	D					DE		AC		C
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2
3	1	1	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2
4	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1
5	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2
6	1	2	2	1	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1
7	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	1	1
8	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1	1	1	2	2
9	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
10	2	1	2	1	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1
11	2	1	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1
12	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1	1	2	1	2
13	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1
14	2	2	1	1	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	2
15	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1	1	2
16	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	2	1	2	2	1

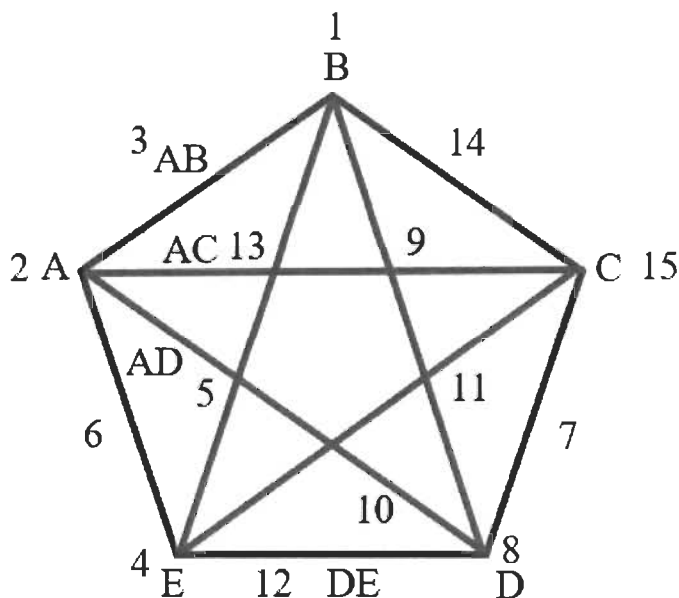


Figure 3.6 Attribution des interactions aux colonnes du plan Taguchi L16

La Figure 3.6 montre la figure d'attribution des colonnes pour le plan Taguchi. Celle-ci permet de placer les facteurs et leurs interactions dans le plan d'expérience. En ce qui concerne les interactions, Gamache (2016) a déjà étudié les interactions entre les variables suivantes : équilibrage naturel (interdisciplinarité), système de production (cellule dynamique), système d'alimentation (kanban) et les structures modulaires, dans un environnement *lean*. Puisque la présente étude vise à augmenter la productivité de la ligne d'assemblage dans un environnement *lean* et 4.0, il a été décidé d'étudier d'autres interactions impliquant les variables robotisation (C) et automatisation modulaire (E). Les interactions retenues sont les suivantes : aménagement-conception modulaire (AB), aménagement-robotisation (AC), aménagement-balancement de ligne (AD) et balancement-automatisation modulaire (DE). L'étude de ces interactions permettra de corroborer certains résultats obtenus par Gamache (2016) mais surtout d'analyser des interactions entre des variables plus en lien avec les concepts de l'industrie 4.0.

Tableau 3.6 Tableau Taguchi L16, signification des niveaux

Expérimentation	Colonne					Résultat									
	B	A	E	D	C	(Temps de passage)									
	1	2	4	8	15	Rép.1	Rép.2	Rép.3	Rép.4	Rép.5	Rép.6	Rép.7	Rép.8	Rép.9	Rép.10
1	Aucune	Aménagement actuel	Sans cobot	Sans équilibrage	Sans robot	241,81	124,75	184,87	122,63	135,64	140,15	118,31	143,82	153,22	114,41
2	Aucune	Aménagement actuel	Sans cobot	Avec équilibrage naturel	Avec robot	185,06	142,20	157,14	125,82	120,52	121,83	171,14	143,73	135,64	112,32
3	Aucune	Aménagement actuel	Avec cobot	Sans équilibrage	Avec robot	116,08	115,29	121,12	132,72	178,89	116,65	113,24	119,73	116,69	185,71
4	Aucune	Aménagement actuel	Avec cobot	Avec équilibrage naturel	Sans robot	130,76	117,19	120,96	159,61	172,14	133,46	173,58	120,53	113,56	140,36
5	Aucune	Cellule dynamique	Sans cobot	Sans équilibrage	Avec robot	145,39	128,84	162,03	137,52	118,04	116,39	134,14	121,49	158,00	113,30
6	Aucune	Cellule dynamique	Sans cobot	Avec équilibrage naturel	Sans robot	138,17	117,71	119,25	116,45	186,06	113,09	109,54	160,12	112,86	174,05
7	Aucune	Cellule dynamique	Avec cobot	Sans équilibrage	Sans robot	118,67	117,38	122,57	120,74	199,14	130,59	113,22	120,61	117,90	180,80
8	Aucune	Cellule dynamique	Avec ans cobot	Avec équilibrage naturel	Avec robot	118,08	122,08	117,52	137,81	153,25	130,08	158,85	115,80	113,36	131,12
9	Plateformes standards et modules	Aménagement actuel	Sans cobot	Sans équilibrage	Avec robot	119,24	176,88	160,29	135,13	122,91	115,68	117,63	114,63	135,85	118,66
10	Plateformes standards et modules	Aménagement actuel	Sans cobot	Avec équilibrage naturel	Sans robot	138,91	115,69	131,60	114,98	158,53	143,58	146,22	113,59	111,86	137,40
11	Plateformes standards et modules	Aménagement actuel	Avec cobot	Sans équilibrage	Sans robot	143,41	125,41	118,62	110,38	160,99	127,61	185,95	109,86	117,98	130,88
12	Plateformes standards et modules	Aménagement actuel	Avec cobot	Avec équilibrage naturel	Avec robot	133,05	110,33	137,09	108,36	148,89	132,30	185,28	111,37	113,89	111,84
13	Plateformes standards et modules	Cellule dynamique	Sans cobot	Sans équilibrage	Sans robot	161,08	112,50	111,70	149,02	128,09	132,99	135,78	185,25	115,29	121,09
14	Plateformes standards et modules	Cellule dynamique	Sans cobot	Avec équilibrage naturel	Avec robot	146,24	132,73	118,58	144,14	112,61	113,16	155,30	110,70	115,04	109,12
15	Plateformes standards et modules	Cellule dynamique	Avec cobot	Sans équilibrage	Avec robot	122,34	111,32	136,06	109,64	121,84	115,53	117,47	110,60	111,92	136,78
16	Plateformes standards et modules	Cellule dynamique	Avec cobot	Avec équilibrage naturel	Sans robot	161,57	116,06	114,69	128,90	112,81	127,49	113,24	116,86	132,11	113,35

Le Tableau 3.6 présente les temps de passage pour chacune des expérimentations et ce, pour les 10 réplifications effectuées. Le nombre de réplifications a été décidé afin d'augmenter la précision des résultats obtenus et avec l'aide des données fournies par le logiciel de simulation Arena. Plus particulièrement, c'est le « *half width* » qui a été utilisé pour vérifier la précision du modèle. Comme le modèle actuel comporte beaucoup de variabilité, cette donnée est relativement élevée. Toutefois, on note une augmentation de la précision avec 10 réplifications par rapport à une seule. Le « *half width* » passe de « inconnue » à une réplification à 758,57 avec deux à 27,91 avec 10. On peut voir cette donnée comme la tolérance ($\pm$) sur le résultat obtenu. Pour limiter le nombre de réplifications, 10 ont été choisies, car c'est le point où la réponse s'est stabilisée. Pour illustrer ces propos, le Tableau 3.7 montre les réponses obtenues ainsi que leur « *half width* » en fonction du nombre de réplifications.

Tableau 3.7 Réponse et « *half width* » en fonction du nombre de réplifications

Nombre de réplifications	Réponse	« <i>Half width</i> »
1	238,36	Données insuffisantes
2	178,66	758,57
5	159,3	64,13
10	146,12	27,91
100	146,97	6,73

On constate qu'entre 10 réplifications et 100 réplifications, le temps de passage varie seulement de 0,85 heure soit un peu plus de 0,5 %. Malgré une variation plus grande pour le « *half width* » (de 27,91 à 6,73), 10 réplifications ont été choisies pour limiter la taille de l'ANOVA lors de l'analyse (10 réplifications de 16 expériences impliquent 160 degrés de liberté versus 1600 à 100 réplifications).

Dans le chapitre suivant, l'analyse graphique et l'analyse de variance (ANOVA) sont utilisées pour vérifier si l'effet des variables indépendantes ainsi que leurs interactions sur la réponse, la productivité de la ligne de cubes d'ambulance, sont significatifs. L'analyse graphique permet de visualiser rapidement l'impact des facteurs ou d'une interaction sur la réponse. Pour ce qui est de l'ANOVA, elle permet de comparer la moyenne des réponses de chacune des expérimentations afin d'isoler les facteurs ou les interactions significatifs. C'est-à-dire qui influence le résultat de la mesure de performance.

CHAPITRE 4 - RÉSULTAT ET DISCUSSION

Dans l'intention de comparer les différents facteurs à l'étude, c'est principalement le temps de passage qui a été utilisé. Cela affecte la quantité de produits fabriqués pour un temps mesuré. Ici, c'est le nombre de cubes fabriqués par semaine qui a été comparé pour donner un aperçu de la différence de production et de l'impact de la réduction du temps de passage entre les différentes solutions et l'état actuel. Cela permet de mieux saisir et quantifier les gains obtenus pour la compagnie à l'étude. Toutefois, étant donné la corrélation entre le temps de passage et la quantité des cubes produite, seulement le temps de passage a été utilisé pour effectuer l'analyse de résultats.

4.1 Analyse graphique du plan Taguchi L16

Pour effectuer l'analyse des résultats, le logiciel statistique Minitab a été utilisé afin de construire les ANOVA (analyse de variance), ainsi qu'un graphique des effets principaux des facteurs sur la réponse. La Figure 4.1 présente l'effet des facteurs sur le temps de passage et le Tableau 4.1 montre les résultats de l'ANOVA obtenus à la suite de l'analyse des résultats obtenus par simulation pour les différents facteurs (A : aménagement; B : conception modulaire; C : robot; D : balancement de ligne; E : automatisation modulaire (Cobot)).

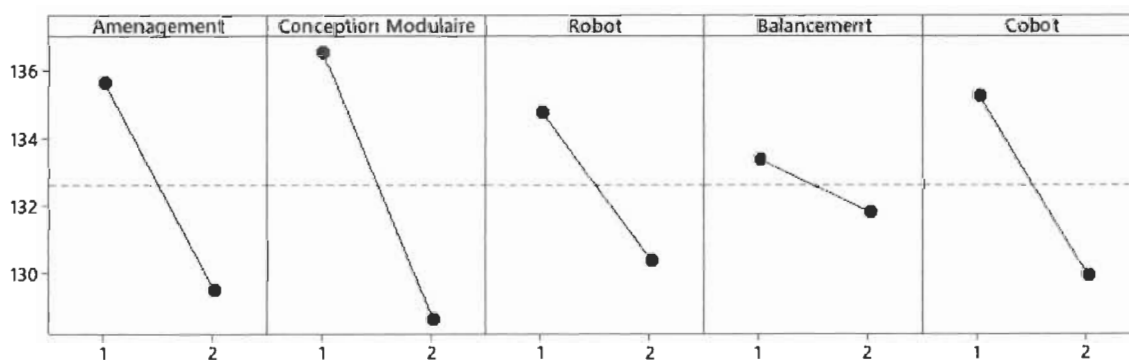


Figure 4.1 Effets principaux des facteurs sur le temps de passage

La Figure 4.1 montre que tous les facteurs ont un effet sur le temps de passage des structures d'ambulance. En effet, on constate qu'au deuxième niveau, le temps de passage moyen est plus faible que pour le niveau 1 pour tous les facteurs. Toutefois, on remarque que le balancement de ligne a un impact beaucoup moins grand que les autres facteurs. On note une réduction d'environ 4 % du temps de passage pour l'aménagement, 6 % pour la conception modulaire, 3 % pour l'utilisation d'un robot, 1 % pour le balancement et 4 % pour l'utilisation d'un cobot. Le Tableau 4.1 suivant montre les résultats de l'ANOVA pour les facteurs et leurs interactions.

4.2 Analyse de variance du plan Taguchi L16

Tableau 4.1 Analyse de variance, avec interactions, des facteurs A à E

Source	DL	SomCar séq	SomCar ajust	CM ajust	F	P
Aménagement	1	149,891	149,891	149,891	12,62	0,012
Conception modulaire	1	246,678	246,678	246,678	20,78	0,004
Robot	1	77,563	77,563	77,563	6,53	0,043
Balancement	1	9,797	9,797	9,797	0,83	0,399
Cobot	1	112,636	112,636	112,636	9,49	0,022
Aménagement*Conception modulaire	1	2,739	2,739	2,739	0,23	0,648
Aménagement*Robot	1	0,850	0,850	0,850	0,07	0,798
Aménagement*Balancement	1	1,777	1,777	1,777	0,15	0,712
Balancement*Cobot	1	18,559	18,559	18,559	1,56	0,258
Erreur résiduelle	6	71,242	71,242	11,874		
Total	15	691,732				

Avant de poursuivre, le seuil de signification α utilisé pour cette étude est de 5 %. Cela veut donc dire que pour être considéré significatif, c'est-à-dire qu'il y ait un impact sur la réponse, le temps de passage, et que cela n'est pas dû au hasard, un facteur ou une interaction doit obtenir un p-value, noté « P » dans le Tableau 4.1, inférieur à 0,05. Cela

dit, on note que tous les facteurs sont significatifs excepté le facteur D (équilibre de ligne). Cela s'explique, car dans le modèle actuel et dans la prise de données, l'entreprise utilisait déjà des matrices de compétence ainsi que les principes d'équilibrage naturel. De plus, l'analyse graphique montre une diminution du temps de passage de moins de 1 % pour le balancement. Pour ce qui est des interactions entre les facteurs, elles ne sont pas significatives.

Puisqu'il n'y avait pas d'interactions significatives considérées, une deuxième ANOVA a été effectuée, mais seulement avec les facteurs. Cela permet d'augmenter les degrés de liberté de l'erreur et d'augmenter la précision de l'analyse. Voici les résultats présentés dans le Tableau 4.2.

Tableau 4.2 Analyse de variance, sans interactions, des facteurs A à E

Source	DL	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p	
A	1	149,891	149,891	149,891	15,75	0,003
B	1	246,678	246,678	246,678	25,92	0,000
C	1	77,563	77,563	77,563	8,15	0,017
D	1	9,797	9,797	9,797	1,03	0,334
E	1	112,636	112,636	112,636	11,84	0,006
Erreur	10	95,167	95,167	9,517		
Total	15	691,732				

Les résultats montrent que les facteurs, du plus au moins significatifs, sont B, la conception modulaire, suivi par A, l'aménagement. Ensuite, on retrouve E, l'automatisation modulaire avec un *p-value* de 0,6 % et C, la robotisation avec 1,7 %. Finalement, le facteur D, l'équilibrage de la ligne, n'est pas significatif et obtient une valeur P égale à 0,334 supérieur à 0,05.

4.3 Analyse de variance sur le modèle linéaire général

La section précédente portait sur les résultats donnés par le logiciel statistique Minitab et son outil d'« analyse de plan Taguchi ». Le logiciel affiche un total de 16 degrés de liberté dans son analyse de variance du plan Taguchi et ce, malgré le fait qu'il comporte 10 répétitions de 16 expériences. De ce fait, par souci de transparence, une analyse de variance sur le modèle linéaire générale (GLM) a été réalisée. Comme Minitab est un logiciel reconnu mondialement et que l'analyse graphique corrobore les résultats, la première analyse de variance a tout de même été considérée valable.

L'ANOVA sur le GLM a aussi été réalisée à l'aide de Minitab. Dans cette analyse, tous les degrés de liberté ont été pris en compte. Le Tableau 4.3 de la page suivante montre le résultat de cette analyse.

Tableau 4.3 ANOVA sur le modèle linéaire général

Analyse de la variance pour moyennes					
Source	DL	SomCar ajust	CM ajust	F	p-value
Aménagement (A)	1	1498,9	1498,91	2,77	0,098
Conception Modulaire (B)	1	2466,8	2466,78	4,57	0,034
Robot (C)	1	775,6	775,63	1,44	0,233
Balancement (D)	1	98,0	97,97	0,18	0,671
Cobot (E)	1	1126,4	1126,36	2,09	0,151
Aménagement*Conception Modulaire (AB)	1	27,4	27,39	0,05	0,822
Aménagement*Robot (AC)	1	8,5	8,50	0,02	0,900
Aménagement*Balancement (AD)	1	10,5	10,51	0,02	0,889
Balancement*Cobot (DE)	1	185,6	185,59	0,34	0,559
Erreur	150	81026,6	540,18		
Inadéquation de l'ajustement	6	719,7	119,95	0,22	0,972
Erreur pure	144	80306,9	557,69		
Total	159	87224,3			

Lorsque tous les degrés de liberté sont considérés, les résultats de l'ANOVA sont différents. Ici, le seul facteur significatif avec un seuil de signification de 5 % est la conception modulaire. L'aménagement, quant-à-elle, est significative mais avec un seuil de 10 %. On voit que l'ordre des facteurs, en ordre du plus significatif au moins significatif, n'a pas changé. La conception modulaire, l'aménagement, l'utilisation de cobot, de robot et puis finalement le balancement de ligne. La logique des résultats demeure donc la même. Toutefois, en augmentant le nombre de degrés de liberté de l'erreur, sa somme des carrés devient très élevée, ce qui fait que l'atteinte de signification des facteurs et des interactions de façon franche est plus difficile.

4.4 Analyse des résultats

Le Tableau 4.4 présente des données pertinentes pour poursuivre l'analyse des résultats. Premièrement, la première colonne des résultats montre les réponses moyennes obtenues par simulation en fonction des expérimentations. L'expérimentation 1 correspond à l'état actuel de la ligne de production à l'étude et permet de comparer les résultats entre la ligne actuelle et les changements qui pourraient y être effectués. Si l'on compare la situation actuelle par rapport à la meilleure solution, l'expérimentation 15, on note une diminution du temps de passage de 28,61 heures, soit une amélioration de 19,34 %. Cela représente une augmentation de la production hebdomadaire de près d'un cube par semaine. Ce qui représente plusieurs milliers de dollars par semaine pour l'entreprise.

Tableau 4.4 Tableau récapitulatif de l'analyse des résultats

Expérimentation	Colonne					Résultats			
	Conception modulaire (B)	Aménagement (A)	Automatisation modulaire (E)	Balancement de ligne (D)	Robotisation (C)	Temps de passage (moy.)	Écart-type	Étendue	# cube/sem. moy.
	1*	2*	4*	8*	15*				
1	Aucune	Aménagement actuel	Sans cobot	Sans équilibrage	Sans robot	147,96	38,89129336	127,40	5,83
2	Aucune	Aménagement actuel	Sans cobot	Avec équilibrage naturel	Avec robot	141,84	23,56283184	72,74	6,03
3	Aucune	Aménagement actuel	Avec cobot	Sans équilibrage	Avec robot	131,98	31,64328661	104,33	6,24
4	Aucune	Aménagement actuel	Avec cobot	Avec équilibrage naturel	Sans robot	138,22	22,61399972	60,02	6,05
5	Aucune	Cellule dynamique	Sans cobot	Sans équilibrage	Avec robot	133,51	17,24951027	48,73	6,18
6	Aucune	Cellule dynamique	Sans cobot	Avec équilibrage naturel	Sans robot	134,73	28,44470035	76,52	6,11
7	Aucune	Cellule dynamique	Avec cobot	Sans équilibrage	Sans robot	134,16	30,06075618	85,92	6,11
8	Aucune	Cellule dynamique	Avec cobot	Avec équilibrage naturel	Avec robot	129,80	15,8948435	45,49	6,32
9	Plateformes standards et modules	Aménagement actuel	Sans cobot	Sans équilibrage	Avec robot	131,69	21,17691196	62,25	6,19
10	Plateformes standards et modules	Aménagement actuel	Sans cobot	Avec équilibrage naturel	Sans robot	131,24	16,36941946	46,67	6,20
11	Plateformes standards et modules	Aménagement actuel	Avec cobot	Sans équilibrage	Sans robot	133,11	24,18919706	76,09	6,14
12	Plateformes standards et modules	Aménagement actuel	Avec cobot	Avec équilibrage naturel	Avec robot	129,24	24,18307075	76,92	6,38
13	Plateformes standards et modules	Cellule dynamique	Sans cobot	Sans équilibrage	Sans robot	135,28	23,76860602	73,55	6,09
14	Plateformes standards et modules	Cellule dynamique	Sans cobot	Avec équilibrage naturel	Avec robot	125,76	17,25718453	46,18	6,45
15	Plateformes standards et modules	Cellule dynamique	Avec cobot	Sans équilibrage	Avec robot	119,35	10,03786387	27,14	6,83
16	Plateformes standards et modules	Cellule dynamique	Avec cobot	Avec équilibrage naturel	Sans robot	123,71	15,15743294	48,76	6,75

*Les chiffres situés en dessous des facteurs représentent leur numéro de colonne dans le plan Taguchi L16 présenté au Tableau 3.5.

Les colonnes « écart-type » et « étendue », quant à elles, permettent d'apprécier la diminution de la variabilité. Encore une fois, si l'on compare la meilleure solution par rapport à l'état actuel, on constate une diminution notable de la variabilité dans les résultats. En effet, le temps de passage actuel est d'environ 147,96 heures avec un écart-type de 38,89 heures, soit 26,2 %. Lorsqu'on regarde l'expérimentation 15, la standardisation permettrait de diminuer non seulement le temps de passage à 119,35 heures, mais l'écart-type des temps diminuerait à 10,04 heures. Cela représente 8,41 %, soit une amélioration d'environ 17,8 %. Pour ce qui est de l'étendue, la différence entre la plus grande et la plus petite valeur obtenue, on voit une différence de près de 120 heures. L'étendue pour la situation initiale est de 127,40 heures comparativement à 27,14 heures pour la meilleure solution. On voit donc une grande amélioration au niveau de la variabilité.

Le Tableau 4.4 présente le niveau utilisé pour les différents facteurs. La meilleure solution est donc la standardisation des produits et des processus par la conception modulaire, l'utilisation de cellules dynamiques pour l'aménagement, l'utilisation de cobots, de robots et l'équilibrage demeure en l'état actuel. Cela reflète exactement les résultats obtenus lors de l'analyse de variance. Effectivement, tous les facteurs sont significatifs, excepté l'équilibrage de ligne. Tel qu'expliqué précédemment, le facteur « équilibrage de ligne » n'est pas significatif puisque l'entreprise utilisait déjà les principes d'équilibrage naturel et de matrice de compétence.

Pour conclure, les principes et les outils du 4.0 peuvent aider les PME à augmenter la productivité de leur ligne d'assemblage. L'agilité, le *lean* et les structures modulaires aident à mieux implanter et profiter de l'efficacité du 4.0. À la suite des résultats obtenus lors de cette étude par simulation, des démarches ont été entreprises pour aller chercher les gains de productivité démontrés par les expériences de cette recherche. En effet, l'entreprise vise à standardiser ces structures par la conception modulaire afin de réduire la variabilité des temps de production. De plus, des démarches sont effectuées pour

acquérir des robots et des cobots afin d'augmenter la productivité et l'agilité des postes goulots. L'aménagement sera revisité afin de centraliser le poste de structure qui est alimenté par différentes cellules de production. Pour résumer et pour finir, la stratégie est donc d'utiliser la cartographie de la chaîne de valeur, le *lean*, l'agilité, les produits modulaires et un aménagement cellulaire dynamique mixte.

CHAPITRE 5 - CONCLUSION

Les changements proposés par la quatrième révolution industrielle ont suscité beaucoup de questionnements. L'industrie 4.0 se base sur les technologies, l'interconnectivité, l'information en temps réel, etc. Bref, elle se base sur les innovations technologiques des dernières années. Il devient donc pertinent de se poser des questions sur le coût d'implantation et la rentabilité d'un tel système. Ce qui mène directement à penser aux petites et moyennes entreprises. Quelle est la meilleure stratégie d'implantation dans la PME? Les PME ont-elles les ressources nécessaires pour effectuer un tel virage numérique? Quels sont ou quels seront les impacts de cette révolution sur nos PME québécoises? Voici le type de questions qui ont poussé cette recherche à voir le jour.

La présente recherche porte sur la stratégie d'implantation du 4.0 dans la PME québécoise et une étude de cas, une ligne de production de structures d'ambulance dans une PME du Québec, a été utilisée pour valider les résultats.

Dans un premier temps, une revue de la littérature a été effectuée pour faire le point sur l'état des connaissances du 4.0 par rapport à la PME. De plus, à partir des articles consultés lors de cette revue, une matrice isolant les objectifs, méthodologies, variables, hypothèses, les mesures de performance et les résultats ont été construits. Cela permet, par exemple, d'isoler les méthodologies et les variables les plus utilisées par la communauté scientifique lors de recherches portant sur le 4.0 et les PME. Résultat, la méthodologie (simulation), les variables (aménagement, conception modulaire, robotisation, balancement de ligne, automatisation modulaire, *lean* et système de communication), ainsi que les mesures des performance (temps de passage et nombre d'unités produites par unité de temps) de cette étude ont pu être déterminées de façon éclairée.

Une fois le cadre de la recherche établi, un modèle de simulation est construit à partir des données réelles de la ligne de production à l'étude. Un plan Taguchi L16 a permis

d'évaluer l'impact des variables mentionnées plus haut sur les réponses (temps de passage et nombre de structures fabriquées par semaine). Par la suite, c'est avec l'aide d'une analyse de variance (ANOVA) et un seuil de signification de 5 % que les variables ont été analysées. De cette analyse, quatre facteurs sur cinq sont sortis significatifs. L'aménagement, la conception modulaire, la robotisation et l'automatisation modulaire. Le *lean* et les systèmes de communication ont été analysés autrement à partir de la revue de littérature et d'observations faites directement dans l'entreprise. Pour ce qui est de l'équilibrage de ligne, l'entreprise a déjà implanté les principes d'équilibrage naturel et de matrice de compétence avant de commencer la simulation. Les résultats sont intégrés dans le modèle de simulation. Cela peut expliquer pourquoi cette variable n'est pas sortie significative.

Le but de cette recherche est de vérifier l'impact et valider une stratégie d'implantation de principe du 4.0 dans les PME québécoises. Pour ce faire, une étude par simulation a été réalisée sur une ligne de production dans une petite entreprise du Québec. Les résultats montrent que même les PME peuvent être gagnantes lorsqu'elles prennent le virage numérique de l'industrie 4.0. Bien sûr, la façon de procéder au virage n'est pas la même que dans la grande entreprise. La littérature démontre qu'il est possible d'adopter les principes du 4.0 et d'obtenir de bons résultats et ce, sans avoir à dépenser des millions de dollars en automatisation. Cette recherche va dans le même sens que la littérature. L'application de certains principes du 4.0 permet d'augmenter la productivité, l'agilité et la rentabilité des entreprises. La quatrième révolution industrielle n'est donc pas uniquement destinée aux grandes entreprises.

Les PME représentent plus de 99 % des entreprises canadiennes. Force est de conclure qu'il est donc primordial d'investir dans la croissance et la stabilité de nos petites et moyennes entreprises. Il reste encore beaucoup de travail à faire afin de déterminer l'impact réel de la quatrième révolution industrielle sur les petites et les moyennes

industries du Québec. D'éventuelles recherches seront nécessaires pour épauler ces entreprises dans un virage numérique sans précédent.

RÉFÉRENCES

- Ab Rashid, M., Mohamed, N., Rose, A., & Kor, K. (2015). Simulation study of a vehicle production line for productivity improvement. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, 8, 1283-1292.
- Abdul-Nour, G. (2014). Juste-à-temps et PVA : de la philosophie à la pratique. *Séminaire de formation*. Angers.
- Abdul-Nour, G., Drolet, J., & Lambert, S. (1999). Mixed production, flexibility and SME. *Computers & Industrial Engineering*, 37, 429-432.
- Abdul-Nour, G., Raymond, L., Jacob, R., & Julien, P.-A. (2003). Les PME et les nouvelles technologies. Dans P.-A. Julien, *L'entreprise-réseau : dix ans d'expérience de la Chaire Bombardier Produits récréatifs* (pp. 171-190). Québec: Presses de l'Université du Québec.
- Akerman, M., Fast-Berglund, A., Halvordsson, E., & Stahre, J. (2018). Modularized assembly system: A digital innovation hub for the Swedish Smart Industry. *Manufacturing Letters*, 15, 143-146.
- ANSSI. (2019). *Glossaire "C"*. Consulté le 29 mai, 2019, sur Agence nationale de la sécurité des systèmes d'information: <https://www.ssi.gouv.fr/entreprise/glossaire/c/>.
- Aroui, K. (2015). Séquencement d'une chaîne de montage multimodèle : application à l'industrie du véhicule industriel. *Thèse de doctorat*. Université Grenoble Alpes.
- Bagheri, B., Yang, S., Kao, H.-A., & Lee, J. (2015). Cyber-physical systems architecture for self-aware machines in industry 4.0 environments. *IFAC PapersOnLine*, 48(3), 1622-1627.
- Barenji, A., Barenji, R., & Hashemipour, M. (2016). Flexible testing platform for employment of RFID-enabled multi-agent systems on flexible assembly line. *Advances in Engineering Software*, 91, 1-11.
- Beaudoin, J., Lefebvre, G., Normand, M., Gouri, V., Skerlj, A., Pellerin, R., & Danjou, C. (2016). *Prendre part à la révolution manufacturière? Du rattrapage*

technologique à l'Industrie 4.0 chez les PME. Centre francophone d'informatisation des organisations (CEFRIIO).

- Bilal Ahmed, M., Imran Shafiq, S., Sanin, C., & Szczerbicki, E. (2019). Towards experienced-based smart product design for industry 4.0. *Cybernetics and Systems*, 50(2), 165-175.
- Blockchain France. (2019). *Qu'est-ce que la blockchain?* Récupéré sur Blockchain France : <https://blockchainfrance.net/decouvrir-la-blockchain/c-est-quoi-la-blockchain/>.
- Boisvert, M. (2017, septembre 18). *IPSO s'implique dans "industrie 4.0"*. Consulté le 13 mai, 2019, sur IPSO Technologies : <https://ipso.ca/2017/09/18/ipso-simplique-dans-industrie-4-0/>.
- Breivold, H. (2017). Internet-of-Things and cloud computing for smart industry: A systematic mapping study. *ES 2017 - The 5th International Conference on Enterprise Systems*. Pékin, Chine.
- Caggiano, A., Caiazzo, F., & Teti, R. (2015). Digital factory approach for flexible and efficient manufacturing systems in the aerospace industry. *Procedia CIRP*, 37, 122-127.
- Castro, A., Silva, M., & Silva, F. (2017). Designing a robotic welding cell for bus body frame using a sustainable way. *Procedia Manufacturing*, 11, 207-214.
- Cohen, Y., Faccio, M., Galizia, F., Mora, C., & Pilati, F. (2017). Assembly system configuration through Industry 4.0 principles: the expected change in the actual paradigms. *IFAC-PapersOnLine*, 50(1), 14958-14963.
- Commons Transition. (2014). *Wikimodular*. Consulté le 25 juin, 2019, sur Commons Transitions.
- Danjou, C., Pellerin, R., & Rivest, L. (2017). *Le passage au numérique: Industrie 4.0: des pistes pour aborder l'ère du numérique et de la connectivité*. Québec : CEFRIIO.
- Dissanayake, C., & Farris, J. (2014). Assembly lines of the future: A literature review of research articles from 2000-2014. Virginia Beach, Virginie: ASEM.

- Expert.ai. (2019, septembre 19). *La technologie sémantique pour le Big Data : analyse, défense, sécurité et renseignement*. Consulté le 3 juin, 2019, sur Expert.ai : <https://www.expert.ai/fr/technologie-semantique/>.
- Fan, X., Li, Z., & Zhou, L. (2019). Literature review on Big Data and its application fields. *Journal of Physics: Conference Series*, 1176(4).
- Farinia Group. (2019). *Qu'est-ce que la fabrication additive (FA)?* Consulté le 29 mai, 2019, sur Farinia Group : <https://www.farinia.com/fr/fabrication-additive/techniques-fabrication-additive/qu-est-ce-que-la-fabrication-additive>.
- Fernandez-Carames, T., & Fraga-Lamas, P. (2019). A review on the application of blockchain to the next generation of cybersecure Industry 4.0 smart factories. *IEEE Access*, 7, 45201-45218.
- Frazzon, E., & et al. (2018). Data-driven production control for complex and dynamic manufacturing systems. *CIRP Annals*, 67(1), 515-518.
- Gamache, S. (2016). Effet des cellules dynamiques sur la performance des entreprises-réseaux. *Mémoire*. Université du Québec à Trois-Rivières.
- Gamache, S. (2019). Stratégies de mise en oeuvre de l'industrie 4.0 dans les petites et moyennes entreprises manufacturières québécoises. *Thèse de doctorat*. Université du Québec à Trois-Rivières.
- 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.
- Ghobakhloo, M. (2018). The future of manufacturing industry: A strategic roadmap toward industry 4.0. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 29(6), 910-936.
- Gilchrist, A. (2016). *Industry 4.0. The industrial Internet of things*. Apress.
- Gouvernement du Canada. (2019). *Recherche et statistique sur la PME*. Consulté le 7 juin, 2019, sur Gouvernement du Canada: <http://www.ic.gc.ca/eic/site/061.nsf/fra/accueil>.

- Hermann, M., Pentek, T., & Otto, B. (2016). Design principles for industry 4.0 scenarios. *49th Hawaii International Conference on System Sciences*. Koloa.
- Hohmann, C. (2017, octobre 29). *Qu'est-ce qu'un système cyber-physique*. Consulté le 13 mai, 2019, sur Christian Hohmann: <http://christian.hohmann.free.fr/index.php/usine-du-futur/744-quest-ce-quun-systeme-cyber-physique>.
- Horváth, D., & Szabó, R. (2019). Driving forces and barriers of Industry 4.0: Do multinational and small and medium-sized companies have equal opportunities? *Technological Forecasting and Social Change*, 146, 119-132.
- International Federation of Robotics. (2018). *Global industrial robot sales doubled over the past five years*. Consulté le 29 mai, 2019, sur IFR - International Federation of Robotics : <https://ifr.org/ifr-press-releases/news/global-industrial-robot-sales-doubled-over-the-past-five-years>.
- Jiang, P., Ding, K., & Leng, J. (2016). Towards a cyber-physical-social-connected and service-oriented manufacturing paradigm: Social manufacturing. *Manufacturing Letters*, 7, 15-21.
- Kagermann, H., Wahlster, W., & Helbig, J. (2013). *Recommendations for implementing the strategic initiative Industrie 4.0. Final report of the Industrie 4.0 working group*. Francfort : Acatech.
- Khodkari, H., Maghrebi, S., & Branch, R. (2016). Necessity of the integration Internet of things and cloud services with quality of service assurance approach. *Bulletin de la Société royale des sciences de Liège*, 85(1), 434-445.
- Larousse. (2019). *Sémantique*. Consulté le 3 juin, 2019, sur Larousse : <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/s%C3%A9mantique/71933#locution>.
- Lee, I., & Lee, K. (2015). The Internet of things (IoT): Applications, investments and challenges for enterprises. *Business Horizons*, 58(4), 431-440.
- Matthiae, M., & Richter, J. (2018). Industry 4.0 - Induced Change Factors and the Role of Organizational Agility. *European Conference of Information Systems (ECIS)*.

- Ministère de l'Économie et de l'Innovation. (2016). *Industrie 4.0 : origine et définition*. Consulté le 10 mai, 2019, sur Ministère de l'Économie et de l'Innovation : <https://www.economie.gouv.qc.ca/fr/bibliotheques/outils/gestion-dune-entreprise/industrie-40/feuille-de-route-industrie-40/1-industrie-40-origine-et-definition/>.
- 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., 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.
- Mohamed, N., Ab Rashid, M., Rose, A., & Ting, W. (2015). Production layout improvement for steel fabrication works. *Journal of Industrial and Intelligent Information*, 3(2), 133-37.
- Moreno, A., Velez, G., Ardanza, A., Barandiaran, I., de Infante, A., & Chopitea, R. (2017). Virtualisation process of a sheet metal punching machine within the Industry 4.0 vision. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, 11(2), 365-373.
- Nouri, N., Abdul-Nour, G., & Gamache, S. (2018). Cellular Manufacturing System Evolution from Group Technology to a Reconfigurable Manufacturing System: A Case Study of a Dynamic Cellular Manufacturing System (DCMS) in an Electromechanical Assembly Industry. Dans G. Süer, & M. Gen (Éds.), *Cellular Manufacturing Systems: Recent Developments, Analysis and Case Studies* (pp. 3-34). Nova Science Publishers.
- Office québécois de la langue française. (2012). *Intégration horizontale*. Consulté le 19 mai, 2019, sur Office québécois de la langue française : http://www.granddictionnaire.com/ficheOqlf.aspx?Id_Fiche=502897.

- Office québécois de la langue française. (2012). *Intégration verticale*. Consulté le 19 mai, 2019, sur Office québécois de la langue française : http://www.granddictionnaire.com/ficheOqlf.aspx?Id_Fiche=505806.
- Office québécois de la langue française. (2015). *Internet des objets*. Récupéré sur Office québécois de la langue française : http://gdt.oqlf.gouv.qc.ca/ficheOqlf.aspx?Id_Fiche=26529845.
- Office québécois de la langue française. (2017). *Infonuagique*. Consulté le 28 mai, 2019, sur Office québécois de la langue française - OQLF : http://gdt.oqlf.gouv.qc.ca/ficheOqlf.aspx?Id_Fiche=26501384.
- Rachmawaty, D., Karningsih, P., & Santosa, B. (2018). Two-sided assembly line balancing to minimize the number of workstations with considering the relationships between tasks. *MATEC Web of Conferences*, 204.
- Rheault, M., Drolet, J., & Abdul-Nour, G. (1995). Physically reconfigurable virtual cells: A dynamic model for a highly dynamic environment. *Computers and Industrial Engineering*, 29(1-4), 221-225.
- Scheuermann, C., Verclas, S., & Bruegge, B. (2015). Agile factory. An example of an Industry 4.0 manufacturing process. *2015 IEEE 3rd International Conference on Cyber-Physical Systems, Networks, and Applications*, (pp. 43-47). Hong Kong.
- Shahzad, M.-K., Jimenez, C., Said, A., & Tollenaere, M. (2016). Towards quantified measures of agility for production line information systems (PLIS). *IFAC-PapersOnLine*, 49(12), 562-567.
- Tangen, S. (2002). Understanding the concept of productivity. *Actes de la 7th Asia-Pacific Industrial Engineering and Management Systems Conference*. Taipei, Taïwan.
- Tao, F., & Qi, Q. (2019). New IT driven service-oriented smart manufacturing: Framework and characteristics. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics Systems*, 49(1), 81-91.
- Tzimas, E., Vosniakos, G., & Matsas, E. (2019). Machine tool setup instructions in the smart factory using augmented reality: A system construction perspective. *International on Interactive Design and Manufacturing*, 13(1), 121-136.

- Weyer, S., Schmitt, M., Ohmer, M., & Gorecky, D. (2015). Towards Industry 4.0 standardization as the crucial challenge for highly modular, multi-vendor production systems. *IFAC PapersOnLine*, 48(3), 579-584.
- Wikipedia. (2019). *Big data*. Consulté le 28 mai, 2019, sur Wikipedia : https://fr.wikipedia.org/wiki/Big_data
- Wu, X. (2017). A simulation-based approach for solving assembly line balancing problems. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 231.
- Yang, C., Lan, S., Shen, W., Huang, G., Wang, X., & Lin, T. (2017). Towards product customization and personalization in IoT-enabled cloud manufacturing. *Cluster Computing*, 20(2), 1717-1730.
- Yang, T., Zhang, D., Chen, B., & Li, S. (2010). Analysis of mixed production line based on complex weighted network. *2010 International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation*. Changsha, Chine : ICICTA 2010.
- Yassir, A., & Mohamed, N. (2018). Assembly line efficiency improvement by using Witness simulation software. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 319.
- Zupan, H., & Herakovic, N. (2015). Production line balancing with discrete event simulation: A case study. *IFAC-PapersOnLine*, 28(3), 2305-2311.

ANNEXE I

Liste de définition du 4.0

Blockchain. La *blockchain* permet de créer des « applications décentralisées capables retracer et de stocker plusieurs transactions effectuées par une grande quantité d'utilisateurs et d'appareils » (Fernandez-Carames & Fraga-Lamas, 2019). C'est une « technologie de stockage et de transmission d'informations, transparente, sécurisée et fonctionnant sans organe de contrôle central ». En fait, une *blockchain* constitue une base de données des transactions effectuées entre ses utilisateurs. Cette base de données est « sécurisée » et « distribuée », c'est-à-dire qu'elle est « partagée par ses différents utilisateurs, sans intermédiaire, ce qui permet à chacun de vérifier la validité de la chaîne » (Blockchain France, 2019).

Capabilité en temps réel. Dans son livre *Industry 4.0: The industrial internet of Things*, l'auteur Alasdair Gilchrist définit tous les principes de design de l'industrie 4.0. Dans ce livre, il rappelle l'importance qu'accorde l'industrie 4.0 aux données collectées en temps réel. Cela permet de réduire le temps de réaction des entreprises face aux différentes situations qu'elles peuvent vivre. Le principe de capabilité en temps réel est donc le principe que les données sur la production, l'état des machines, des processus, les rétroactions sur le produit, etc. sont collectées en temps réel (Gilchrist, 2016).

Cyber sécurité. La cyber sécurité correspond aux « techniques de sécurité de système d'information et s'appuie sur la lutte contre la cybercriminalité et la mise en place d'une cyberdéfense » (ANSSI, 2019). L'industrie 4.0 se base sur l'utilisation de réseaux internet pour connecter ses différents systèmes, outils, machines, etc., entre eux. Effectivement, l'internet des objets est même l'un des concepts clés de la quatrième révolution industrielle. En outre, les usines intelligentes utilisent parfois l'internet pour offrir de nouveaux services et pour stocker ses données (l'internet des services et l'internet des données). De ce fait, l'internet est un aspect capital de l'industrie 4.0 et, par conséquent, la cyber sécurité devient indispensable pour les entreprises afin de se protéger des pirates informatiques.

Décentralisation. « L'industrie 4.0 supporte la décentralisation, ce qui permet aux différents systèmes à l'intérieur d'une usine intelligente de prendre des décisions de façon autonome et ce, sans dévier du but ultime de l'entreprise » (traduit de l'anglais) (Gilchrist, 2016).

Fabrication additive. La fabrication additive, ou l'impression 3D, est une méthode de fabrication qui « s'oppose à la fabrication soustractive, où l'on enlève de la matière pour atteindre la forme désirée ». Au contraire, on ajoute de la matière par « addition de couches de matière successives sous contrôle d'un ordinateur ». Cette méthode de fabrication révolutionnaire permet de produire des pièces que l'on ne pouvait auparavant produire, de faciliter le design et la fabrication de nouvelles pièces ou de nouveaux produits, etc. (Farinia Group, 2019).

Intégration horizontale. L'intégration horizontale est définie par l'Institut canadien des comptables agréés, sur le site de l'Office québécois de la langue française, comme étant :

« [l']intégration, dans une même entreprise ou dans un même groupe, d'activités situées au même stade du processus de production ou de commercialisation, ou d'activités ayant trait à des produits ou des services similaires vendus sur les mêmes marchés, dans le but de réduire la concurrence ou de neutraliser certains concurrents en les absorbant » (Office québécois de la langue française, 2012).

Intégration verticale. L'intégration verticale est définie par l'Institut canadien des comptables agréés, sur le site de l'Office québécois de la langue française, comme étant l'« intégration, dans une même entreprise ou dans un même groupe, d'activités situées à divers stades du processus de production ou de commercialisation » (Office québécois de la langue française, 2012).

Internet des services. L'internet des services est l'outil permettant aux entreprises de vendre des services via internet. C'est « une infrastructure technologique » permettant aux entreprises de se rapprocher de leurs consommateurs et de « renforcer leur compétitivité » en offrant de nouveaux services. Finalement, c'est une nouvelle façon pour les entreprises d'ajouter de la valeur à leur produit (Ghobakhloo, 2018).

Internet des données. L'internet des données est l'internet qui s'intéresse « aux moyens de transfert, de stockage, de gestion et de traitement de données efficaces » dans un environnement où une grande quantité de données est produite par une grande quantité d'appareils, de machines, etc. Certains auteurs vont même jusqu'à dire que l'internet des données est « l'extension de l'internet des objets dans le monde digital » (Ghobakhloo, 2018).

Internet des personnes. L'internet des personnes fait « référence à un système sociotechnique complexe dans lequel les humains et leurs appareils personnels ne sont pas considérés uniquement comme des utilisateurs finaux d'applications, mais deviennent des éléments actifs d'internet » (Ghobakhloo, 2018).

Interopérabilité. « [L']interopérabilité réfère à la capacité de tous les composants [d'un processus] de se connecter, de communiquer et d'opérer ensemble via l'internet des objets [(IOT)] ». C'est un principe important de l'industrie 4.0 car les procédés ne font plus que suivre « une recette ou une méthode prédéterminée » (Gilchrist, 2016).

Orientation des services. Dans le contexte de l'industrie 4.0, l'orientation des services offerts par l'entreprise passe par les concepts de fabrication et par les produits. En effet, les nouvelles technologies de communication et l'interconnexion entre les produits permettent aux entreprises d'offrir de nouvelles gammes de services aux clients par l'entremise des informations reçues par le produit. Par exemple, installer des capteurs dans une voiture afin de connaître le moment opportun pour effectuer un changement d'huile

ou de freins. L'entreprise peut donc vendre un service de maintenance préventive à ses clients grâce aux capteurs qui leur transmettent des informations en temps réel (Ghobakhloo, 2018) (Tao & Qi, 2019).

Produit intelligent. Un « produit intelligent » est un produit constitué de trois types de « connaissance » : à propos de lui-même, de son environnement et de son utilisateur. Les produits intelligents utilisent les données qu'ils produisent afin de mieux servir l'utilisateur et ce, durant toute leur durée de vie. Par exemple, un produit intelligent peut détecter le moment où il aura besoin d'une maintenance (changement d'huile, etc.). Cela permet donc d'augmenter la valeur ajoutée du produit en procurant de nouvelles expériences aux utilisateurs, en facilitant l'utilisation du produit et en augmentant sa durée de vie (Bilal Ahmed, Imran Shafiq, Sanin, & Szczerbicki, 2019).

Personnalisation du produit. La quatrième révolution industrielle est devenue nécessaire lorsque le marché a basculé d'une production de masse à une production de masse personnalisée. Auparavant, on produisait de gros lots de pièces standards et donc le nombre de mises en course était limité, ce qui augmentait l'efficacité des procédés et la disponibilité des machines. Aujourd'hui, à la suite de ce changement de paradigme axé sur la personnalisation de produit, les entreprises se doivent, en plus d'être flexibles, d'être agiles. La personnalisation de produit est le résultat d'une production de plus en plus centrée et orientée sur le client (Ghobakhloo, 2018) (Yang, et al., 2017).

De plus en plus, les clients participent à l'élaboration et à l'amélioration de leur produit. De cette façon, il est certain que le produit répond aux exigences du client (Jiang, Ding, & Leng, 2016). Avec l'aide d'outils tels que les « systèmes cyber-physiques, l'internet des objets (IOT), l'architecture des produits ouverte, l'automatisation et la fabrication additive », les industries intelligentes seront en mesure de « personnaliser et reconfigurer leur produit en fonction d'évaluation et de prédiction du comportement des consommateurs [et du marché] » (Ghobakhloo, 2018).

Responsabilité sociale de l'entreprise. Dans son article, Ghobakhloo (2018) parle de la responsabilité sociale des entreprises, car l'industrie 4.0 est très axée sur la mise en place de nouvelles technologies et cela crée des peurs chez les employés. Effectivement, plusieurs croient que l'arrivée des technologies va « éliminer » des emplois, car les machines remplaceront les journaliers. Toutefois, comme l'explique Ghobakhloo (2018), les technologies ont plus tendance à créer de nouveaux emplois plutôt que d'en éliminer. Selon l'auteur, les entreprises entreprenant un virage numérique (4.0) doivent plutôt se préparer à former leur personnel car l'industrie 4.0 demande une main-d'œuvre un peu plus spécialisée. C'est donc la main-d'œuvre peu qualifiée qui sera le plus répercutée par les changements à venir avec cette nouvelle ère industrielle.

Finalement, le principe de « responsabilité sociale » veut que les entreprises doivent se préparer et « mettre l'emphasis » sur le « développement de compétence » au sein de l'entreprise. Par exemple, des outils tels qu'une matrice de compétence sont intéressants pour structurer et tenir en banque les compétences acquises, en développement ou manquantes dans l'entreprise.

Technologie sémantique. Dans le dictionnaire Larousse, la sémantique se définit par tout ce qui est « relatif au sens [et] à la signification des unités linguistiques » (Larousse, 2019). Pour ce qui est des technologies sémantiques, la compagnie Expert System donne la définition suivante : « la technologie sémantique, dans sa définition la plus simple, renvoie à un logiciel capable d'analyser des textes et d'associer un sens à chaque mot ». Pour ce faire, le logiciel utilise « l'apprentissage machine », ainsi que des « algorithmes d'intelligence artificielle » (Expert.ai, 2019).

ANNEXE II

Tableaux de la revue de littérature
(Tableaux 2.2 à 2.9 de la revue de littérature)

Tableau AII.1 Matrice de la revue de littérature (Tableau 2.2)

Article	Tao & Qi (2019)	Tangen (2002)	Rheault, Drolet, & Abdul-Nour (1995)	Moreno, & al. (2017)
Problématique	Les usines intelligentes centrées sur l'approche client (sur les services) sont peu documentées.	La productivité est parfois confondue ou mal comprise, ce qui entraîne des pertes de productivité dans certaines entreprises.	La planification de la production dans un environnement dynamique et turbulent est difficile et complexe (sous-traitance implique taille de lot variable, grande variété de produit, etc.).	Manque de connaissance dans le domaine de la virtualisation. Actuellement, les simulations se font en 2D, alors que les nouvelles technologies permettent une simulation 3D et hors ligne du comportement de machines.
Objectif	Décrire la structure et les caractéristiques d'une entreprise 4.0 centrée sur l'approche client.	Définir et distinguer la productivité par rapport à d'autres termes semblables.	Présenter une structure de planification de production pour les entreprises dans un environnement dynamique et turbulent.	Créer un jumeau digital pour une poinçonneuse à métal (machine CNC).
Méthodologie	Étude de cas (conceptuelle).	Revue de littérature.	Étude de cas (conceptuelle) (simulation dans un 2 ^e temps).	Simulation.
Variable	Outil du 4.0 (<i>smart industry</i>).	Productivité.	Aménagement cellulaire dynamique.	Automatisation/virtualisation.
Hypothèse	L'application d'outil 4.0 permet une approche client optimale, un meilleur contrôle qualité, une augmentation de la productivité, etc.	N/A.	N/A (recherche conceptuelle).	Simplification du modèle de simulation par l'utilisation de variable binaire. Simplification du modèle 3D en ne représentant que les parties visibles.
Mesure de performance	N/A (recherche conceptuelle et définition/explication des outils 4.0).	N/A.	Cet article était encore à l'état conceptuel, mais les auteurs parlent de simulation.	Étude comparative des mouvements et du résultat visuel du jumeau digital par rapport à la réalité.
Résultat	Les différents outils des usines intelligentes et une étude de cas conceptuelle ont été établis pour favoriser la promotion des industries intelligentes.	La productivité a été définie et distinguée de la performance, de l'efficacité, de l'efficacité et de la rentabilité. Chacun de ses termes a aussi été défini.	Une structure conceptuelle d'aménagement cellulaire dynamique est présentée. Dans cet article, les auteurs n'avaient pas encore simulé leur résultat.	Un jumeau virtuel pour une poinçonneuse a été développé et montré efficace pour aider les programmeurs dans la conception de leur programme de poinçonnage CNC.

Tableau AII.2 Matrice de la revue de littérature (Tableau 2.3)

Article	Moeuf, & al. (2018)	Mittal, & al. (2018)	Matthiae & Richter (2018)	Lee & Lee (2015)
Problématique	Les PME sont mal équipées pour utiliser les principes et outils du 4.0 dans leur planification et contrôle de production (gestion de processus industriel).	Le cadre conceptuel (actuel) de l'industrie 4.0 ne semble pas prendre en considération les réalités des PME.	L'agilité est considérée comme un facteur clé de l'industrie 4.0. alors qu'aucun (ou peu de) fait scientifique ne vient appuyer cette déclaration.	L'IOT est un paradigme technologique qui est considéré comme un pilier de l'industrie 4.0. Étant donné la nouveauté du sujet, peu d'articles scientifiques traitent du sujet.
Objectif	Analyser les pratiques de planification et de contrôle de la production des PME dans une optique de 4.0.	Analyser et critiquer la structure de l'industrie 4.0 par rapport aux besoins particuliers des PME.	Démontrer que l'agilité organisationnelle permet de gérer les changements induits par l'industrie 4.0.	Peaufiner les recherches sur l'IOT en établissant un modèle conceptuel d'application pour l'internet des objets.
Méthodologie	Revue de littérature.	Revue de littérature.	Revue de littérature.	Revue de littérature.
Variable	Outils et principes du 4.0.	Outils et principes du 4.0.	Outils et principes du 4.0 (principalement l'agilité).	L'IOT.
Hypothèse	PME en Europe = moins de 250 employés et moins de 50M d'euros de chiffre d'affaires.	Europe : Petite entreprise : <= 50 employés et <= 10M euros chiffre d'affaires Moyenne entreprise : <= 250 employés et <= 50M euros chiffre d'affaires.	Le peu de preuves scientifiques démontrant l'importance de l'agilité dans le 4.0 provient du fait que l'industrie 4.0 est « encore dans le futur » et que la majorité des recherches sont à venir.	N/A.
Mesure de performance	Réduction des coûts, temps de mise en course, taux de bonne pièce, taux de livraison à temps et temps de passage.	Maturité numérique.	Agilité (temps de réaction, temps de mise en course, etc.).	ROI (« analyse stochastique »).
Résultat	La revue de littérature effectuée par les auteurs permet d'identifier les pratiques des PME, ainsi que les outils, mesure de performance, etc. les plus utilisés par celle-ci.	Une nouvelle structure 4.0 est présentée pour aider les PME à atteindre la maturité numérique nécessaire aux principes du 4.0. L'article identifie les exigences spécifiques aux PME.	L'article résume et analyse la littérature scientifique pour sortir les avantages des différents types d'agilité pour une entreprise. L'article corrobore le fait que l'agilité est un facteur clé du 4.0.	L'article présente un cadre conceptuel pour l'application de l'IOT en entreprise, cinq défis à relever pour son intégration et un exemple de calcul de rentabilité.

Tableau AII.3 Matrice de la revue de littérature (Tableau 2.4)

Article	Khodkari, Maghrebi, & Branch (2016)	Jiang, Ding, & Leng (2016)	Horváth, & Szabó (2019)	Hermann, Pentek, & Otto (2016)
Problématique	L'intégration de l'infonuagique et de l'IOT peut entraîner des problèmes de qualité dans les services rendus aux clients.	L'arrivée des médias sociaux permet d'exploiter de nouvelles méthodes de production. Toutefois, peu de documentation traite de ce nouveau paradigme (<i>social manufacturing</i>).	L'entreprise 4.0 touche toutes les entreprises, mais celles-ci n'ont pas toutes les mêmes réalités. Par exemple, les PME versus les grandes entreprises.	Industrie 4.0 ne comporte pas de définition et de compréhensions générales acceptées par tous. De ce fait, les recherches académiques et l'implantation du 4.0 sont difficiles.
Objectif	Évaluer les exigences de l'infonuagique et de l'IOT, de sorte que la qualité des services est garantie.	Initialiser la recherche sur un nouveau paradigme : le <i>social manufacturing</i> . (combinaison des CPS avec les médias sociaux pour optimiser la production, le développement de produit, etc.).	Déterminer si les PME et les grandes entreprises ont les mêmes opportunités par rapport à l'implantation de l'industrie 4.0.	Définir des principes de design du 4.0 pour faciliter les recherches académiques et l'implantation en entreprise.
Méthodologie	Revue de littérature.	Revue de littérature.	Étude de cas qualitative (sondage/entrevue).	Étude de cas et méthode Delphi (neuf experts de différents milieux).
Variable	IOT et infonuagique.	Outils et principes du 4.0 (CPS et médias sociaux).	Outils et principes du 4.0.	Outils et principes du 4.0.
Hypothèse	L'infonuagique et l'IOT sont des éléments complémentaires.	Il est possible de combiner les systèmes cyber physiques (CPS) avec médias sociaux pour former des CPSS (système cyber physique social).	Les réponses données par les questionnaires interviewés sont considérées fiables.	Les experts sélectionnés pour déterminer les principes de design les plus importants du 4.0 représentent un échantillon représentatif du marché.
Mesure de performance	Temps de fonctionnement (<i>downtime</i>) (qualité du service).	Analyse comparative avec d'autres paradigmes existants (qualitatifs).	Réponse des questionnaires aux entrevues (forte, moyenne ou faible).	<i>Analytic hierarchy process</i> (analyse par poids pondéré).
Résultat	Les auteurs présentent les exigences de qualité de service pour l'IOT et l'infonuagique.	La recherche sur le <i>social manufacturing</i> a été initiée et discutée (étude conceptuelle). Les faiblesses potentielles d'un tel paradigme ont aussi été soulevées pour alimenter des recherches futures.	L'article démontre que les grandes entreprises ont plus d'opportunités et moins de barrières vis-à-vis le 4.0 que les PME. Toutefois, les auteurs mentionnent que les PME ont tout de même des opportunités.	L'article présente les quatre principes de design du 4.0 les plus importants selon neuf experts. De plus, une étude de cas montre un exemple d'implantation pour ces principes.

Tableau AII.4 Matrice de la revue de littérature (Tableau 2.5)

Article	Ghobakhloo (2018)	Gamache, Abdul-Nour, & Baril (2017)	Fan, Li, & Zhou (2019)	Caggiano, Caiazzo, & Teti (2015)
Problématique	Il n'y a pas de consensus sur une définition claire et globale de l'industrie 4.0.	Les avancées technologiques et la venue de l'industrie 4.0 forcent les PME du Québec à investir dans ses technologies pour rester compétitives.	La modernisation des technologies d'information fait en sorte qu'une grande quantité de données doit être traitée et analysée.	La transition d'une production de masse vers une production de masse personnalisée exige des systèmes de production de plus en plus agiles et flexibles.
Objectif	Réaliser une revue de littérature permettant d'identifier les tendances technologiques et les principes de design du 4.0.	Déterminer l'état actuel des PME québécoises par rapport à l'industrie 4.0.	Résumer les avancées technologiques du <i>Big data</i> (des mégadonnées) et prévoir son développement.	Augmenter la flexibilité d'une cellule de production en utilisant les principes du 4.0 (domaine aérospatial).
Méthodologie	Revue de littérature et étude conceptuelle.	Revue de littérature + analyse de base de données (VSM sur 148 entreprises).	Revue de littérature.	Simulation.
Variable	Outils et principes du 4.0.	Outil <i>lean</i> et 4.0.	Mégadonnées (<i>Big data</i>).	Outils et principes du 4.0 (automatisation, IoT, etc.).
Hypothèse	N/A.	Le secteur d'activité de l'entreprise, la présence de famille de produit, d'un service à la clientèle, etc. influencent son impact sur sa productivité, qualité, etc. (voir le tableau récapitulatif dans l'étude).	N/A.	Temps de mise en course sont des estimations. Les temps de maintenance sont considérés. La simulation est faite sur une année de production = 239 jours. Estimation des temps de chargement et de déchargement.
Mesure de performance	Occurrence des principes et des tendances technologiques dans la littérature étudiée.	Étude comparative des différentes entreprises (% d'occurrence des outils).	N/A.	Temps de mise en course et temps de passage des pièces.
Résultat	L'article identifie 14 designs de principes et 12 tendances technologiques sur lesquelles repose l'industrie 4.0. À noter que seuls les articles en anglais ont été traités.	L'étude montre que les PME québécoises ne sont pas prêtes à l'ère digitale. À titre d'exemple, seulement 31 % des entreprises recensées ont un système ERP. Le gouvernement doit continuer d'investir dans le développement de ses PME.	Les auteurs caractérisent les mégadonnées et présentent des prévisions sur l'impact de cette technologie pour le marché.	La simulation montre une augmentation de 42 % de la productivité de la cellule de production et une amélioration de la flexibilité de la ligne.

Tableau AII.5 Matrice de la revue de littérature (Tableau 2.6)

Article	Breivold (2017)	Bilal Ahmed, & al. (2019)	Bagheri, & al. (2015)	Åkerman, & al. (2018)
Problématique	Beaucoup de recherches portent sur les usines intelligentes et il devient difficile de connaître l'étendue de ces recherches.	La production de masse personnalisée réduit le cycle de vie des produits et demande aux entreprises de développer des produits de plus en plus rapidement.	Beaucoup d'études se font sur le 4.0, mais la plupart d'entre elles sont conceptuelles.	Beaucoup d'études se font sur le 4.0, mais la plupart d'entre elles sont conceptuelles.
Objectif	Recenser l'avancement des recherches portant sur les techniques et les méthodes permettant une transition vers une usine intelligente et identifier de nouvelles avenues de recherches.	Vérifier la faisabilité et l'efficacité d'un système d'aide au développement de produit virtuel (<i>smart virtual product development system, SVPD</i>).	Présenter les résultats d'une étude sur l'intégration de système cyber physique dans une entreprise de découpe de métal. Proposer une architecture d'intégration pour les CPS (méthode des 5 C).	Développer une plateforme d'information modulaire et adaptable pour une entreprise suédoise.
Méthodologie	Revue de littérature.	Étude de cas et simulation.	Étude de cas.	Étude de cas.
Variable	IOT et infonuagique.	Outil et principe du 4.0 (SPVD).	Outils et principe du 4.0 (CPS).	Outils et principe du 4.0 (IOT).
Hypothèse	N/A.	L'étude de cas (petite entreprise) est représentative.		
Mesure de performance	N/A.	Taux de bonne pièce et temps de développement (nouvelle pièce).	Faisabilité et commentaires des utilisateurs.	Faisabilité et commentaires des utilisateurs.
Résultat	114 études ont été analysées et décortiquées en sujet de recherche. La recherche a permis d'établir que les conditions d'application des recherches ne sont majoritairement pas représentatives de la réalité des entreprises et nécessiterait plus d'études pratiques.	Le système d'aide au développement de produit virtuel monter sur JAVA par les chercheurs a permis d'évaluer les cinq meilleurs matériels pour la conception d'une nouvelle pièce (les pièces sont des tarauds) et ce, en quelques fractions de seconde. L'étude confirme la faisabilité d'un tel outil et apporte de nouvelles venues de recherche dans ce domaine.	L'étude propose une architecture d'intégration et de traitement de données afin de transformer l'information captée par les CPS en information utile pour prendre des décisions dans l'entreprise (5C CPS architecture).	Une nouvelle approche pour parvenir à un environnement de production adaptable et modulaire est présentée.

Tableau AII.6 Matrice de la revue de littérature (Tableau 2.7)

Article	Ab Rashid, Mohamed, Rose, & Kor (2015)	Barenji, Barenji, & Hashemipour (2016)	Castro, Silva, & Silva (2017)	Cohen, Faccio, Galizia, Mora, & Pilati (2017)
Problématique	La ligne d'assemblage de moto de l'entreprise n'arrive plus à répondre à la demande et sa croissance.	Les lignes d'assemblage doivent désormais en plus d'être flexibles, être agiles. La production de masse personnalisée demande à ce que la planification et le contrôle des systèmes soient améliorés pour augmenter la réactivité des entreprises.	La production de masse personnalisée amène des problèmes de productivité sur les lignes d'assemblage des PME.	Manque de flexibilité et agilité des lignes d'assemblage du 3.0 pour répondre à la production de masse personnalisée (<i>mass customization era</i>).
Objectif	Augmenter d'au moins 12 % la productivité de la ligne.	Augmenter la productivité d'une ligne d'assemblage flexible par l'entremise de systèmes RFID.	Développer une ligne de production flexible et automatisée en utilisant de « vieux robots ».	Présenter les impacts du 4.0 sur les lignes d'assemblages actuels.
Méthodologie	Simulation (logiciel Witness).	Revue de littérature, étude de cas et simulation (logiciel Petri nets).	Simulation (solidworks et Roboguide).	Revue de littérature et étude de cas.
Variable	Cinq suggestions ont été testées : nettoyage des postes de travail, maintenance préventive, engager un assistant pour le superviseur, monter des procédures standard, poka yoke.	Implantation d'un système RFID permettant de planifier et contrôler le système.	Robotisation.	Principes du 4.0 (modèle de ligne d'assemblage présenté).
Hypothèse	1. Les distances ne sont pas prises en compte dans le modèle de simulation; 2. Le temps de simulation est de cinq jours, sur un quart; 3. Les machines arrêtent de fonctionner si les espaces d'encours son plein; 4. Les bris sont considérés et seul le superviseur de ligne a les connaissances pour les réparer.	1. Temps de transport constant; 2. Aucun manque de matériel pour les commandes; 3. Probabilité qu'une machine brise de 15 % et les temps de réparation suit une distribution Weibull; 4. Aucun temps de mise en course considéré; 5. Temps de simulation de 10 000 minutes avec 1 500 minutes de temps de réchauffement et 25 réplifications (méthode de Welch utilisé).	Usine de production de véhicule : petite : 0-100; moyenne : 100 à 10 000; grande : + 10 000 véhicules. Le robot ne produit pas de défaut de soudure (négligeable). La vibration, la rigidité du support et la stabilité du robot ont des impacts sur ses performances.	Le 4.0 aura un impact sur la flexibilité, l'agilité, la reconfigurabilité, l'efficacité, l'ergonomie et sur le nombre de modèles pouvant être produits par une ligne d'assemblage.
Mesure de performance	1. Nombre de modèles de moto Z produite par semaine. 2. Profit engendré par les solutions.	Temps de passage, nombre de fours produits par semaine (<i>throughput</i>), écart-type (<i>output variability</i>), temps de production unitaire, pourcentage d'utilisation des ressources.	Temps de cycle.	Temps de mise en course, nombre de produits différents par ligne d'assemblage, nombre d'unités produit par unité de temps.
Résultat	La standardisation des méthodes, l'implantation de « Poka Yoke » et engager un assistant pour le superviseur de ligne « augmente la productivité d'au moins 12 % ».	Le temps de passage d'une ligne de production de four a été réduit de 22 % en plus d'améliorer les autres indicateurs de performances du système.	Le temps de cycle pour produire un sous-assemblage d'autobus passe de 35 à 17 minutes lorsque l'on robotise la ligne d'assemblage.	Un modèle de ligne d'assemblage 4.0 a été proposé par les auteurs et appuyé par une étude de cas dans une entreprise italienne (étude exploratoire).

Tableau AII.7 Matrice de la revue de littérature (Tableau 2.8)

Article	Dissanayake & Farris (2014)	Mohamed, Ab Rashid, Rose, & Ting (2015)	Rachmawaty, Karningsih, & Santosa (2018)	Scheuermann, Verclas, & Bruegge (2015)
Problématique	Beaucoup d'articles traitent des changements apportés aux lignes d'assemblage par le 4.0 mais aucune ne fait la synthèse de ce que seront les lignes d'assemblage dans le futur.	La demande actuelle élevée fait en sorte que l'aménagement d'une ligne de production dans une compagnie de transformation de métal (découpe et pliage) n'est plus optimal.	Manque de productivité des lignes d'assemblage causé par un mauvais balancement de ligne.	La production de masse personnalisée oblige les entreprises à devenir agiles et entraîne des problèmes de productivité et de rentabilité.
Objectif	Présenter un modèle de ligne d'assemblage du futur. C'est-à-dire, une ligne d'assemblage à la suite de l'implantation des principes du 4.0.	Améliorer l'aménagement afin de réduire les coûts de manutention, d'améliorer la flexibilité des opérations, de maximiser l'espace et de réduire les temps de production.	Développer un nouveau modèle mathématique de balancement de ligne en considérant de nouveaux facteurs influençant l'efficacité du balancement.	Décrire le développement d'une usine agile en réalisant un prototype (usine test).
Méthodologie	Revue de littérature.	Simulation (logiciel Witness).	Revue de littérature.	Étude de cas (implantation d'une usine prototype sur une période de six mois).
Variable	L'auteur traite des sujets suivants : modèle de ligne d'assemblage (4); réalité augmentée/virtuelle et assemblage virtuel; production omniprésente (<i>ubiquitous</i>) : design, produit et vend n'importe où.	Aménagement (nombre d'employés, de convoyeurs, localisation des machines, du matériel, etc.). Planification (ordonnancement).	Distance, outillage, aménagement, compétence (matrice), mouvement.	Agilité (implantation de technologie de communication Bluetooth, de système cyber physique, etc.).
Hypothèse	Non applicable (texte hypothétique dans son G6 intégralité).	Pas d'hypothèse de simulation présentée.	Les nouveaux facteurs permettront d'augmenter l'efficacité des formules de balancement de ligne.	L'intégration de technologie de communication moderne facilite et permet l'intégration ou l'évolution d'une usine à une usine agile.
Mesure de performance	Qualité (exemple, ppm), productivité, agilité, flexibilité, capacité d'évolution, temps de mise en production d'un nouveau produit.	Temps de cycle, nombre de pièces produites par heure.	Nombre de postes sur la ligne, temps de cycle z, temps mort (<i>idle</i>).	Faisabilité (commentaire reçu lors de l'implantation du prototype, etc.).
Résultat	Un modèle de ligne d'assemblage 4.0 a été proposé par les auteurs et appuyé par une revue de littérature approfondie (étude exploratoire).	La nouvelle alternative d'aménagement montre une augmentation de la productivité de 0,42 à 0,71 pièce par heure et une réduction des encours de 151 %.	L'ajout de facteurs dans les formules de balancements de lignes d'assemblage doubles est efficace pour réduire les temps de cycle et d' <i>idle</i> .	Le concept d'usine agile a été validé comme étant efficace. Les technologies Bluetooth, d'application mobile, etc. ont été démontré efficaces.

Tableau AII.8 Matrice de la revue de littérature (Tableau 2.9)

Article	Shahzad, Jimenez, Said, & Tollenaere (2016)	Wu (2017)	Yasir & Mohamed (2018)	Zupan & Herakovic (2015)
Problématique	Les systèmes d'informations actuelles manquent d'agilité.	Manque d'efficacité des lignes d'assemblage dû aux balancements de la ligne.	Manque de productivité d'une ligne d'assemblage dans le secteur automobile.	Manque de productivité des lignes d'assemblage causé par un mauvais balancement de ligne.
Objectif	Proposer une nouvelle catégorie de système d'information agile pour les lignes de productions permettant de déterminer, contrôler, prédire et résoudre les problèmes de façon proactive.	Établir un modèle mathématique et un modèle de simulation efficace pour établir le balancement d'une ligne d'assemblage.	Trouver des solutions afin d'augmenter l'efficacité de la ligne de production.	Développer un modèle mathématique permettant de balancer efficacement les lignes d'assemblage.
Méthodologie	Revue de littérature, discussion avec des experts (<i>brainstorming</i>). Étude de cas.	Simulation. Développement d'algorithmes.	Revue de littérature. Simulation (logiciel Witness).	Simulation (logiciel Plan simulation), développement d'algorithmes, étude de cas.
Variable	Agilité des systèmes d'information, maintenabilité, compatibilité, évolutivité, intégrité de la conception, fonctionnalité des systèmes.	Balancement de ligne.	Type d'aménagement. Balancement de ligne.	Balancement de ligne.
Hypothèse	Il faut avoir un système d'information agile pour avoir une ligne de production agile.	Le modèle mathématique proposé est une heuristique et il a été optimisé par rapport aux anciens.	Temps de simulation de 6 mois; les employés travaillent 22 jours par mois, 10 heures par jour; il n'est pas possible de changer la configuration des postes d'assemblage.	Le modèle mathématique proposé est une heuristique et il a été optimisé par rapport aux anciens.
Mesure de performance	Temps de production. Temps d'occupation des postes (<i>Idle time</i>).	Temps tact. Nombre de stations de travail.	Temps de cycle. Temps d'occupation des postes (<i>idle time</i>). Nombre de véhicules produits par heure.	Temps de cycle. Nombre d'unité produite par huit jours. Nombre d'encours. Profit.
Résultat	Le temps de production et les temps d'occupation des postes ont augmenté à la suite de l'implantation d'un système d'information agile dans une entreprise de fabrication d'équipement de mesure.	Un modèle mathématique a été développé et simulé sur une ligne d'assemblage de moteur thermique au gaz. Celui-ci montre que la ligne d'assemblage à un temps tact minimal de 96 minutes avec neuf stations de travail.	L'option d'aménagement numéro 2 est la solution la plus efficace avec une augmentation de 3,93 % de la productivité de l'entreprise et ce, avec deux employés en moins (réassigné ou congédié).	À la suite du balancement de la ligne, le modèle de simulation montre que la ligne passe de 76 unités produites à 302. De plus, les encours sont réduits et la productivité a augmenté de presque 400 % (temps de cycle de 88 minutes à 22 minutes).

ANNEXE III

Représentation détaillée d'une usine 4.0

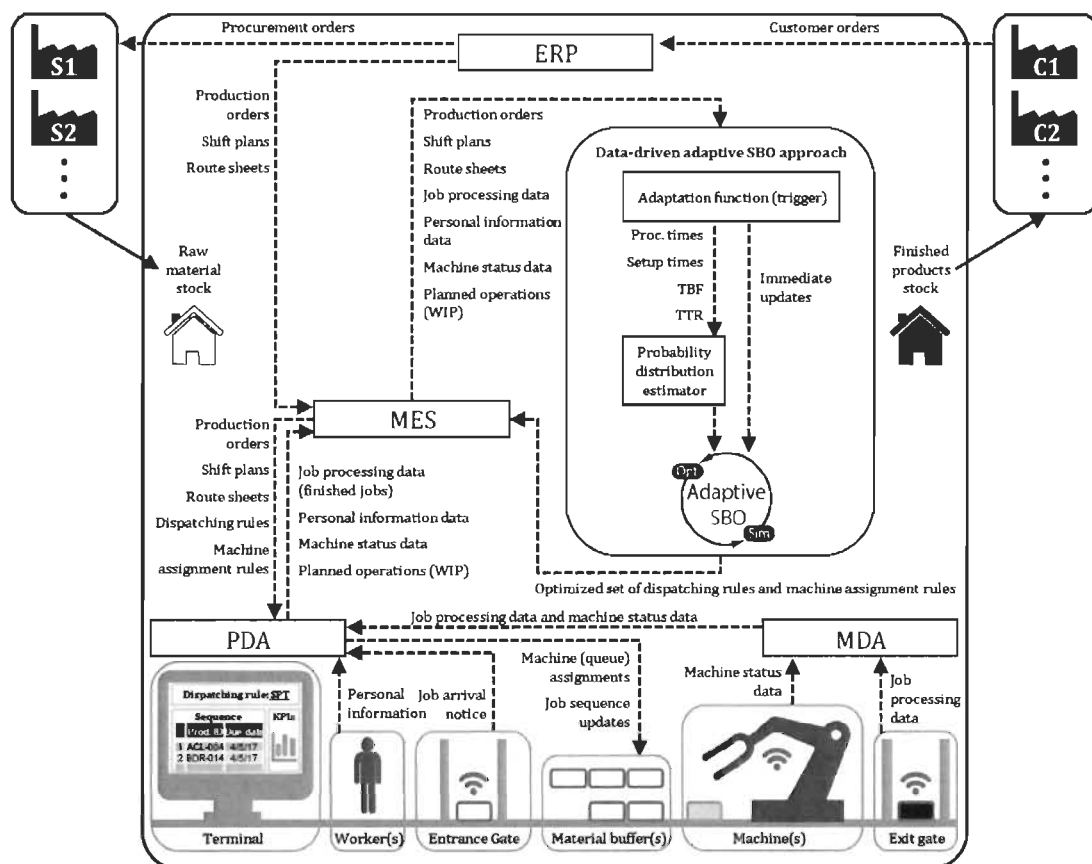


Figure AIII.1 Schéma détaillée d'une usine 4.0 (Frazzon & et al., 2018)