

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

STRATÉGIE D'IMPLANTATION DU 4.0 SE TRADUISANT PAR L'AUGMENTATION DE
L'AGILITÉ D'UNE PME MANUFACTURIÈRE QUÉBÉCOISE

MÉMOIRE PRÉSENTÉ
COMME EXIGENCE PARTIELLE DE LA
MAÎTRISE EN GÉNIE INDUSTRIEL

PAR
STÉPHANIE BOUCHARD

JUILLET 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 :

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

UQTR

Sébastien Gamache, codirecteur de recherche, Ph.D.

UQTR

Jury d'évaluation du mémoire :

Georges Abdul-Nour, Ph.D.

UQTR

Chantal Baril, Ph.D.

UQTR

Walid Ghie, Ph.D.

UQAT

REMERCIEMENTS

Avant d'entamer la lecture de ce mémoire, il m'importe de prendre le temps de remercier ceux et celles qui m'ont supportée tout au long de ma maîtrise. J'aimerais tout d'abord remercier mon directeur, Georges Abdul-Nour, et mon codirecteur, Sébastien Gamache. Merci pour votre dévouement, votre disponibilité, votre confiance, vos précieux conseils et les nombreuses heures de discussions enrichissantes. Ce fût un privilège pour moi de travailler avec ces deux personnes pour qui j'ai tant de respect. Finalement, merci d'avoir été présents tout au long du processus, malgré les quelques creux de vague. Vous avez eu un impact important dans mon cheminement autant professionnel que personnel.

J'aimerais également prendre le temps de remercier l'entreprise partenaire ainsi que la bourse Mitacs Accélération, sans qui tout ce projet n'aurait jamais pu avoir lieu. Merci à l'équipe de chez Rovibec Agrisolutions Inc. pour la confiance au cours de ces deux dernières années.

Je tiens aussi à souligner le support inconditionnel de mes parents, Marie-France Langlois et Norman Bouchard. Vous êtes une source d'inspiration pour moi. Je ne vous remercierai jamais assez. Merci à mes frères, Frédéric et Pierre-Olivier, pour vos encouragements. Merci à mes amis pour votre présence et votre soutien.

Un merci tout spécial à mon pilier, celle qui a toujours été là pour moi, Mélissa Beaulieu. Pour finir, je ne pourrai terminer ces remerciements sans prendre le temps de remercier mon chien, Kauai, qui n'a probablement aucune idée que son nom figure sur mon travail de maîtrise.

SOMMAIRE

Dans le contexte de la quatrième révolution industrielle, l'apparition de nouvelles technologies et la modification des habitudes de consommation entraînent une demande dynamique et une production de masse personnalisée. Les entreprises sont forcées de revoir leurs méthodes de conception, de production et de mise en marché afin de rester compétitives et d'accroître leur agilité face à une demande grandissante et à l'élargissement des marchés. Il devient pertinent de se questionner sur les différents moyens à mettre en place pour se diriger davantage vers une production de masse personnalisée cadrant avec un environnement 4.0. L'objectif de cette recherche est d'offrir une stratégie d'implantation du 4.0 dans une PME manufacturière québécoise permettant de répondre à une production de masse personnalisée cadrant dans l'ère de la révolution 4.0. Une étude de cas a été réalisée dans une PME, dans le secteur alimentaire, afin de valider la stratégie d'implantation.

Une revue de la littérature a permis de cibler les mesures de performance qui allaient être retenues pour rendre le produit 4.0, pour rendre le procédé de production 4.0 et pour adapter le modèle d'affaires 4.0 : niveau d'inventaire, temps de passage, nombre de produit catalogue et la performance qui reflète l'agilité de l'entreprise, pouvant être mesurée par le temps de réaction. Pour rendre le produit 4.0, il a fallu utiliser la standardisation en structures modulaires par plateforme permettant d'obtenir un design avec un indice de similarité élevé facilement reconfigurables et connectables. Pour rendre le procédé 4.0, il a fallu explorer différentes solutions telles que l'implantation d'un système de Planification des Ressources d'Entreprise (ERP), la mise en place d'une codification adaptée aux structures modulaires favorisant la synchronisation du flux physique et un flux d'information et la mise en place de cellules de travail dynamiques. Pour adapter le modèle d'affaires au 4.0, il a fallu développer un modèle marketing axé sur la vente par catalogue en ligne, faire

l'usage de capteurs permettant la maintenance prédictive et faire le suivi accru du service après-vente.

Le travail de standardisation des modules a permis de réduire de 70 % les composantes reliées aux convoyeurs à courroie et a permis de réduire de 63 % les composantes reliées aux convoyeurs nourrisseurs. Non seulement il est question de réduire le nombre de composantes, mais également de réduire par le fait même le niveau d'inventaire, le risque de non conformes, le temps d'assemblage des modules, et ce, tout en augmentant la facilité d'assemblage.

Le travail de codification des modules standards a permis de faciliter la traçabilité et le suivi des modules. Le travail d'implantation d'un système ERP permettra de réaliser les tâches de planification en capacité finie. L'implantation de Kanbans de niveau 3 a permis de réduire significativement le temps de passage. Puis, le travail d'implantation des cellules dynamiques a permis de réaliser les tâches d'assemblage sur un seul poste de travail.

La transition des bons de commande via un fichier Excel vers une commande directement en ligne a permis de réduire considérablement le temps de réaction et voir venir les opportunités d'affaires. L'intégration de capteurs sur les modules a permis également de réduire le temps de réaction lors d'un bris et d'accroître le service offert.

Cette recherche a permis de proposer une stratégie d'implantation du 4.0 dans les PME manufacturières québécoises permettant de réduire significativement le temps de réaction, d'accroître l'agilité, la connectivité et ultimement la performance de l'entreprise pour être en mesure de compétitionner dans le contexte de la quatrième révolution industrielle.

Mots-clés : structure modulaire, demande dynamique, standardisation, cellules dynamiques, PME manufacturière québécoise, production de masse personnalisée, agilité, connectivité, industrie 4.0.

TABLES DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	iv
SOMMAIRE	v
LISTE DES TABLEAUX	xi
LISTE DES FIGURES	xiii
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 - MISE EN CONTEXTE	2
1.1. Mise en contexte	2
1.2. Problématique	2
1.3. Question de recherche	3
1.4. Objectif principal	3
1.5. Objectifs secondaires	4
CHAPITRE 2 - REVUE DE LA LITTÉRATURE	5
2.1. Industrie 4.0	5
2.2. Petites et moyennes entreprises	10
2.3. Standardisation en structure modulaire	13
2.4. Cellules dynamiques	14
2.5. Modèle de recherche – Cadre conceptuel	19
CHAPITRE 3 - MÉTHODOLOGIE	21
3.1. Stratégie d'implantation globale	29
3.2. Implantation en entreprise	31
CHAPITRE 4 - RENDRE LE PRODUIT 4.0	32
4.1. Mise en contexte	32
4.2. Démarche pour obtenir un produit 4.0	33
4.2.1. Collecte des données	33

4.2.2. Analyse des quatre dernières années	33
4.2.2.1. Convoyeur à courroie (CC)	34
4.2.2.2. Convoyeur nourrisseur (CN)	38
4.2.2.3. Non conformes	41
4.2.3. Rencontre avec l'équipe de direction et les concessionnaires	42
4.2.4. Étude de conception.....	42
4.2.5. Conception.....	44
4.2.6. Assemblage et tests	44
4.2.7. Modification du manuel d'assemblage et du bon de commande.....	45
4.3. Résultats terrain	47
4.3.1.Convoyeur à courroie	47
4.3.2.Convoyeur nourrisseur	53
4.4. Conclusion.....	57
CHAPITRE 5 - RENDRE LE PROCÉDÉ DE PRODUCTION 4.0.....	58
5.1. Mise en contexte	58
5.2. Démarche pour obtenir un procédé de production 4.0.....	58
5.2.1.Implantation d'un système ERP	59
5.2.1.1. Analyse de la situation initiale de l'entreprise	59
5.2.1.2. Stratégie d'implantation déployée	60
5.2.2.Mise en place d'une codification adaptée aux structures modulaires....	62
5.2.2.1. Stratégie d'implantation déployée	62
5.2.3.Méthode Kanban	66
5.2.3.1. Analyse de la situation initiale de l'entreprise	66
5.2.3.2. Stratégie d'implantation déployée	67
5.2.4.Mise en place de cellules dynamiques	69
5.2.4.1. Analyse de la situation initiale de l'entreprise	69
5.2.4.2. Stratégie d'implantation déployée	73
5.3. Conclusion.....	79

CHAPITRE 6 - ADAPTER LE MODÈLE D'AFFAIRES AU 4.0	81
6.1. Mise en contexte	81
6.2. Démarche pour adapter le modèle d'affaires au 4.0.....	82
6.2.1. Modèle de marketing adapté	82
6.2.1.1. Analyse de la situation initiale de l'entreprise	82
6.2.1.2. Stratégie d'implantation déployée	83
6.2.2. Maintenance prédictive	87
6.2.2.1. Analyse de la situation initiale de l'entreprise	87
6.2.2.2. Stratégie d'implantation déployée	88
6.2.3. Conclusion.....	92
CHAPITRE 7 - CONCLUSION	94
7.1. Difficultés rencontrées	94
7.1.1. Rendre le produit 4.0	94
7.1.2. Rendre le procédé de production 4.0	95
7.1.3. Adapter le modèle d'affaires au 4.0.....	97
7.2. Facteurs de succès	97
7.3. Développements futurs.....	99
RÉFÉRENCES.....	101
ANNEXE I 106	
ANNEXE II 114	

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3.1 Variables dépendantes en lien avec la standardisation en fonction des auteurs	21
Tableau 3.2 Variables indépendantes en lien avec la standardisation en fonction des auteurs	21
Tableau 3.3 Variables dépendantes en lien avec les cellules dynamiques en fonction des auteurs	22
Tableau 3.4 Variables indépendantes en lien avec les cellules dynamiques en fonction des auteurs	23
Tableau 3.5 Variables dépendantes en lien avec le modèle d'affaires en fonction des auteurs	24
Tableau 3.6 Variables indépendantes en lien avec le modèle d'affaires en fonction des auteurs	25
Tableau 3.7 Stratégie d'implantation globale	30
Tableau 4.1 Vente des convoyeurs dans les quatre dernières années	33
Tableau 4.2 Vente des CC dans les quatre dernières années	35
Tableau 4.3 Options présentes plus de 80 % du temps dans les ventes chez les CC	36
Tableau 4.4 Vente des CN dans les quatre dernières années	39
Tableau 4.5 Options présentes plus de 80 % du temps dans les ventes chez les CN	40
Tableau 4.6 Standardisation des convoyeurs à courroie	53
Tableau 4.7 Standardisation des convoyeurs nourrisseurs	56
Tableau 5.1 Choix du système ERP (Source : Rovibec)	60
Tableau 5.2 Explication du pointage	61
Tableau 5.3 Implantation ERP	62
Tableau 5.4 Codification des convoyeurs à courroies	64
Tableau 5.5 Codification des convoyeurs nourrisseurs	65
Tableau 5.6 Niveau des Kanbans	67

Tableau 5.7 Réduction du temps de passage au niveau 3.....	69
Tableau 5.8 Prédécesseurs des convoyeurs à courroie	70
Tableau 5.9 Prédécesseurs des convoyeurs nourrisseurs.....	72
Tableau 5.10 Temps d'opération par module des convoyeurs à courroie.....	73
Tableau 5.11 Temps d'opération par module des convoyeurs nourrisseurs	74
Tableau 5.12 Temps d'assemblage par module des convoyeurs à courroie	75
Tableau 5.13 Temps d'assemblage par module des convoyeurs à courroie	75
Tableau 5.14 Temps d'assemblage par module des convoyeurs nourrisseurs.....	75
Tableau 5.15 Temps d'assemblage par module des convoyeurs nourrisseurs.....	75
Tableau 5.16 Simulation pour le poste #1 des convoyeurs à courroie ayant un pourcentage de vente de 100 %	77
Tableau 5.17 Simulation pour le poste #2 des convoyeurs à courroie ayant un pourcentage de vente inférieur à 100 %	77
Tableau 5.18 Simulation pour le poste #1 des convoyeurs nourrisseurs ayant un pourcentage de vente de 100 %	78
Tableau 5.19 Simulation pour le poste #2 des convoyeurs nourrisseurs ayant un pourcentage de vente inférieur à 100 %	78
Tableau 5.20 Simulation d'un poste pour les convoyeurs nourrisseurs.....	79
Tableau 5.21 Niveau des moyens d'application	79
Tableau 6.1 AMDEC pour les convoyeurs à courroie	90
Tableau 6.2 AMDEC pour les convoyeurs nourrisseurs	91

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1 Étude réalisée par Group (2021)	9
Figure 2.2 Cadre conceptuel de la recherche.....	20
Figure 3.1 Diagramme d'Ishikawa	27
Figure 4.1 Diagramme de Pareto de la vente des convoyeurs	34
Figure 4.2 Diagramme de Pareto des modèles de convoyeurs à courroie	35
Figure 4.3 Diagramme de Pareto des modèles de convoyeurs nourrisseurs.....	39
Figure 4.4 Diagramme de Pareto des non conformes	41
Figure 4.5 Plateforme 1	43
Figure 4.6 Plateforme 2	44
Figure 4.7 Modules du convoyeur à courroie 18" LP	50
Figure 4.8 Modules du convoyeur à courroie 18"	51
Figure 4.9 Modules du convoyeur à courroie 24"	52
Figure 4.10 Modules du convoyeur nourrisseur 18"	55
Figure 4.11 Modules du convoyeur nourrisseur 24"	55
Figure 4.12 Modules du convoyeur nourrisseur 18" LP	56
Figure 5.1 Démarche pour atteindre un procédé de production 4.0.....	59
Figure 5.2 Codification des structures modulaires	63
Figure 5.3 Niveau des types de Kanban	68
Figure 5.4 Diagramme du flux de production des convoyeurs à courroie	70
Figure 5.5 Diagramme de préséance des convoyeurs à courroie	71
Figure 5.6 Diagramme du flux de production des convoyeurs nourrisseurs.....	71
Figure 5.7 Diagramme de préséances des convoyeurs nourrisseurs.....	72
Figure 6.1 Démarche pour adapter le modèle d'affaires au 4.0	82
Figure 6.2 Bon de commande des convoyeurs à courroie 24"	84
Figure 6.3 Bon de commande des convoyeurs à courroie 24" (suite).....	85
Figure 6.4 Bon de commande des convoyeurs à courroie 24" (suite).....	86

Figure 6.5 Critères d'évaluation de la criticité pour les valeurs extrêmes et centrales	89
Figure 7.1 Facteurs de succès humains.....	98
Figure 7.2 Facteurs de succès techniques.....	98

INTRODUCTION

Avec l'arrivée de la quatrième révolution industrielle et la modification des habitudes de consommation, les méthodes de conception, de production et de mise en marché doivent être revues. L'industrie 4.0, aussi synonyme d'interconnectivité et de transformation numérique, force les entreprises à revoir leurs façons de faire pour répondre à cette nouvelle demande dynamique associée à la production de masse personnalisée (Gamache, 2016). Les consommateurs veulent pouvoir répondre à leurs besoins en choisissant les options cadrant parfaitement pour eux. Désormais, un simple produit de base peut comporter des options, des caractéristiques et des configurations bien distinctes, venant modifier les modèles de production en place. Cette nouvelle réalité pousse les entreprises à devenir plus agiles et connectées pour rester compétitives et répondre à la demande des consommateurs.

Face à cette nouvelle réalité et aux contraintes de production grandissantes, il est pertinent de se questionner sur les pistes de solutions possibles permettant de répondre à cette demande dynamique. Plusieurs auteurs se sont penchés sur le concept de cellules dynamiques et sur une façon de concevoir les produits en modules standards afin d'augmenter la productivité, réduire les temps d'opération et d'augmenter l'agilité des entreprises. En prenant pour hypothèse que les essais de standardisation au niveau de la conception modulaire augmentent l'agilité des entreprises, la revue de littérature permet de mettre en lumière les différentes avancées qui ont eu lieu dans la communauté scientifiques sur ces concepts.

Ce mémoire de maîtrise vise à proposer une stratégie d'implantation de l'industrie 4.0 se traduisant par l'augmentation de l'agilité d'une petite ou moyenne entreprise (PME) manufacturière québécoise permettant de répondre à une demande dynamique et à une production de masse personnalisée.

CHAPITRE 1 - MISE EN CONTEXTE

1.1. Mise en contexte

Au cours des dernières décennies, le milieu technologique a fait place à de grands développements. Avec l'introduction de nouvelles technologies comme, entre autres, l'internet des objets, l'intelligence artificielle, le *cloud* et les systèmes cyberphysiques (Schumacher et al., 2016), il a été possible de voir une modification des habitudes de consommation. Ce nouveau contexte a également engendré une mondialisation de l'économie, laissant place à une modification et un élargissement des marchés. Parmi les nombreux marchés touchés par ces transformations, on retrouve le milieu agroalimentaire qui est aux prises avec une demande dynamique, une concurrence grandissante et l'apparition d'une production de masse personnalisée. Enfin, comme la grande majorité des marchés, le milieu agroalimentaire fait face à une pénurie de main-d'œuvre forçant les différentes industries à revoir leurs façons de faire.

1.2. Problématique

Il a été possible de constater une diminution notable du nombre de petites fermes au Québec au cours des dernières années. Les fermes restantes deviennent de plus en plus grandes (Zombre, 2019). Les entreprises qui faisaient auparavant affaires avec les petites fermes sont forcées d'élargir leur marché pour aller chercher une clientèle nouvelle qui se situe dans les pays européens et asiatiques. Cependant, ce nouveau marché est grandement axé sur l'industrie 4.0 (Clercq et al., 2018). Avec le manque de main-d'œuvre criant, la mondialisation des marchés, un produit ne répondant plus à la demande et l'apparition d'un besoin de production de masse personnalisée, les PME manufacturières québécoises qui veulent être en mesure de

compétitionner dans cette nouvelle ère de la quatrième révolution industrielle sont forcées de revoir leurs façons de faire afin d'être plus agiles et connectées.

1.3. Question de recherche

La diminution du nombre de petites fermes au Québec et les changements dans le paysage de l'industrie agroalimentaire survenus dans les deux dernières décennies amènent à se questionner sur la façon d'augmenter l'agilité et la performance d'une entreprise dans l'ère de l'industrie 4.0. Il faut se demander :

- Comment se diriger vers une production de masse personnalisée?
- Comment une PME manufacturière peut-elle être plus agile et connectée?

Il faut aussi se demander :

- Comment une PME manufacturière peut-elle adapter son produit à un environnement 4.0?
- Comment le plancher de production d'une PME manufacturière peut-il s'adapter pour fabriquer un produit 4.0?
- Comment aligner les ventes, la conception et la production à la révolution 4.0?

1.4. Objectif principal

L'objectif principal de cette recherche est d'offrir une stratégie d'implantation du 4.0 dans une PME manufacturière québécoise permettant de répondre à une production de masse personnalisée cadrant dans l'ère de la révolution 4.0.

1.5. Objectifs secondaires

Certains objectifs secondaires ont découlé des questions de recherche :

- objectif secondaire #1 : déterminer les conditions nécessaires pour atteindre **l'agilité et la connectivité**;
- objectif secondaire #2 : rendre le **produit 4.0**;
- objectif secondaire #3 : rendre le **procédé de production 4.0**;
- objectif secondaire #4 : adapter le **modèle d'affaires au 4.0**.

Pour rendre le produit 4.0, la standardisation en structures modulaires par plateforme permettant d'obtenir un design avec un indice de similarité élevé facilement reconfigurables et connectables a notamment été explorée.

Pour rendre le procédé 4.0, différentes solutions telles que l'implantation d'un système ERP, la mise en place d'une codification adaptée aux structures modulaires favorisant un flux physique et un flux d'information et la mise en place de cellules de travail dynamiques ont été explorées.

Pour adapter le modèle d'affaires au 4.0, le développement d'un modèle marketing axé sur la vente par catalogue en ligne, l'usage de capteurs permettant la maintenance prédictive et le suivi accru du service après-vente ont été explorés.

CHAPITRE 2 - REVUE DE LA LITTÉRATURE

Une revue de la littérature permet de faire l'état des lieux des connaissances actuelles. Jusqu'à aujourd'hui, aucune méthode permettant d'augmenter l'agilité d'une PME manufacturière québécoise n'a été présentée formellement dans la littérature scientifique. L'augmentation de l'agilité permet de répondre à une demande de masse personnalisée cadrant dans l'ère de la révolution 4.0. Ce chapitre est séparé en quatre parties. La première partie traite de l'industrie 4.0, l'agilité et des nouvelles exigences engendrées par cette révolution. La seconde partie traite des PME manufacturières, la définition ciblée et leurs objectifs dans le contexte actuel. La troisième partie traite de la standardisation en structure modulaire, un moyen pour arriver à la personnalisation de masse. La dernière partie traite des cellules dynamiques, un moyen pour mettre en œuvre les structures modulaires.

Puis, pour chaque article qui a été lu dans le cadre de la revue de littérature, les objectifs, les variables dépendantes, les variables indépendantes, la méthodologie utilisée et la conclusion ont été classés dans une matrice. Il est possible de récapituler les principaux éléments qui sont ressortis des différents articles dans cette matrice. Cet outil permet de plus facilement déterminer le cadre conceptuel de la recherche, et ce, en mettant l'accent sur les différentes mesures de performance et les différentes méthodologies utilisées. Le tableau AI.1 est présenté en annexe.

2.1. Industrie 4.0

L'industrie 4.0 a été mise de l'avant pour la première fois en 2011 au Salon de la technologie industrielle, à Hanovre, en Allemagne. Cette 4^e révolution industrielle est la réponse allemande à l'émergence des technologies dans le milieu industriel (Kohler et Weisz, 2019). Cette politique industrielle a initialement pour objectif de

maintenir un avantage concurrentiel mondial dans le secteur des entreprises manufacturières (Blanchet, 2016).

Cette révolution est principalement caractérisée par l'apparition et l'intégration de technologies à l'intérieur des procédés de production du milieu industriel (Cohen et al., 2019). Parmi les technologies les plus souvent mises de l'avant dans le contexte de l'industrie 4.0, on retrouve l'internet des objets, l'intelligence artificielle, le *cloud*, le *big data*, les systèmes cyber-physiques, les robots collaboratifs, la fabrication additive et la réalité augmentée. L'industrie 4.0 repose, entre autres, sur la connectivité des ressources technologiques permettant une utilisation plus efficace et agile des données de production afin d'améliorer la réponse à la demande (Genest et Gamache, 2020). Par ailleurs, l'industrie 4.0 engendre des bénéfices notoires permettant d'accroître la productivité, d'augmenter la satisfaction des clients et d'améliorer la capacité à innover (Gamache, 2019).

L'industrie 4.0 engendre une globalisation des marchés et une production de masse personnalisée qui force les entreprises à revoir leur modèle d'affaires, mais également à revoir leurs méthodes de production afin de rester compétitives. C'est l'entièreté du processus, de la vente jusqu'au service après-vente, qui doit être revu et adapté à cette nouvelle réalité et aux demandes grandissantes des clients. De ce fait, l'automatisation des processus et les technologies numériques, qui elles découlent de l'implantation du 4.0 dans une entreprise, permettent d'accroître l'agilité, l'efficacité et la performance d'une entreprise (Abdul-Nour et al., 2017). Une telle augmentation de l'agilité, de l'efficacité et de la performance permet d'être plus réactif en contexte de demande de masse personnalisée.

En cherchant à accroître la connectivité et l'automatisation de l'industrie manufacturière, la quatrième révolution industrielle tente d'inclure les ressources technologiques aux procédés de production en place. Cependant, il est possible de

remarquer que les petites et moyennes entreprises sont aux prises avec plus de difficultés au moment d'exploiter le potentiel de l'industrie 4.0 (Rauch et al., 2019).

Rauch et al. (2019) s'intéressent dans leurs travaux aux prérequis et aux barrières de l'implantation du *smart manufacturing* dans les PME. Parmi les différents prérequis qui en ressortent, quatre d'entre eux sont qualifiés comme ayant une grande importance. Il est question de l'agilité et de la personnalisation de masse, des données en temps réel et de la connectivité, de la fabrication de pointe et de l'automatisation et enfin, de la facilité d'utilisation des technologies. L'agilité et la personnalisation de masse cherchent à mettre en place un système manufacturier rapidement adaptable et reconfigurable face aux changements rapides et constants des volumes et des produits. L'agilité permet de répondre à une demande de masse personnalisée (Rauch et al., 2019).

La quatrième révolution industrielle nécessite l'augmentation de la flexibilité, de l'agilité et de l'efficacité au niveau de la production. En raison de la compétitivité grandissante sur les marchés manufacturiers, les entreprises sont forcées d'accroître la productivité et la flexibilité de leur système de production. Un système de production possédant un haut degré de flexibilité et d'agilité est en mesure de mieux répondre à la demande changeante. La similarité des processus de production des différents produits favorise également la mise en place d'un système adaptée (Niakan et al., 2016). Enfin, dans leurs travaux, Niakan et al. (2016) mettent de l'avant la pertinence de faire usage des cellules dynamiques comme système de production pour être en mesure d'atteindre les exigences de l'industrie 4.0.

Dans le contexte de l'industrie 4.0, il est important d'avoir un système de maintenance étant donné le nombre élevé d'équipements mécaniques et électroniques. Bien qu'il soit nécessaire de contrôler les équipements de production en place, il est également essentiel de générer des informations permettant de

déetecter les pannes afin de pouvoir agir en temps réel (Bourezza et Mousrij, 2021). Dans leurs travaux, Bourezza et Mousrij (2021) cherchent à implanter une plateforme intelligente de maintenance industrielle permettant d'acquérir des données en temps réel pour détecter les pannes, mais aussi pour être en mesure d'estimer le temps avant que la durée de vie d'un appareil soit atteinte. Ces informations permettent un meilleur suivi des équipements et réduit le temps de réaction lors d'un bris ou d'une panne. Dans le même ordre d'idée, Erez et al. (2021) ont étudié la méthode de conception de différents capteurs dans le domaine des nanosciences pour des machines industrielles dans le cadre de la maintenance prédictive en contexte d'industrie 4.0 (Erez et al., 2021). Ces recherches ont mis en lumière l'importance de l'utilisation de capteurs pour permettre la maintenance prédictive de différents appareils dans un contexte cherchant à réduire les temps de réaction et à accroître la performance des processus de production.

Le service après-vente est également un aspect crucial dans le contexte de l'industrie 4.0. Cimini et al. (2021) s'intéressent dans leurs travaux à la servicisation numérique et au développement des compétences. La servicisation est une tendance que l'on retrouve notamment en industrie pour offrir aux clients des solutions intégrant différents biens, services, soutien et connaissances en faisant l'usage des nouvelles technologies de manière à faciliter l'innovation. Un produit peut donc être utilisé pour vendre le résultat d'un service. Ils proposent un modèle orienté vers la vente d'une solution au lieu de la vente d'un produit. En se basant sur les stratégies utilisées et les capacités des produits dont il est question, ce modèle permet de situer une entreprise et d'établir une marche à suivre en fonction de l'objectif de l'entreprise (Cimini et al., 2021).

Dans leurs travaux, Nishi et al. (2020) abordent l'utilisation de catalogues électroniques permettant la construction d'une chaîne de production virtuelle et ce, dans un contexte 4.0. Le fait de transitionner vers le monde virtuel permet aux

entreprises de plus facilement étudier les différentes opportunités qui s'offrent à elles mais aussi, les possibilités d'expansion (Nishi et al., 2020). L'utilisation de catalogues de vente en ligne permet de faciliter la mise en œuvre d'une chaîne de production virtuelle qui elle, permet de plus facilement simuler la planification des phases de production. Pour ce faire, des modèles de catalogues en ligne spécifiques aux types d'entreprise sont implantés. Les travaux offrent une méthode de configuration de la chaîne de production en fonction du catalogue électronique (Nishi et al., 2020).

Une étude réalisée par le Boston Consulting Group (Group, 2021) auprès de plus de 800 répondants démontre que seulement 30 % des transformations numériques sont réussies avec succès comme l'indique la figure 2.1. Dans le 70 % des cas restants, les transformations n'atteignent pas les objectifs et les attentes ciblés en matière de ressources humaines, de processus, d'infrastructures, de durabilité et de capacité à innover, dans un horizon de temps déterminé.

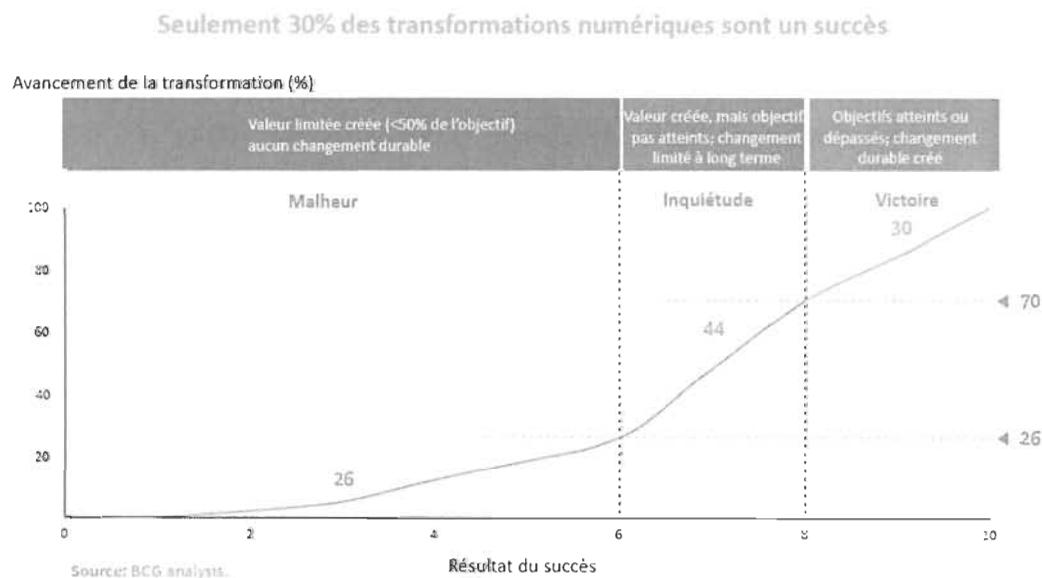


Figure 2.1 Étude réalisée par Group (2021)

Un taux d'échec aussi élevé est d'autant plus préoccupant dans un contexte où la transformation numérique est au cœur des changements économiques qui s'opèrent. Selon le Boston Consulting Group (BCG), six facteurs clés pourraient faire passer les chances d'une transformation numérique réussies de 30 % à 80 % : une stratégie intégrée avec des objectifs de transformation clairs, l'engagement de la part de la direction, une technologie modulaire de données en place, une gouvernance agile pour répondre de façon rapide et flexible à la demande, un déploiement de talents et un suivi efficace des progrès.

Les auteurs s'entendent sur la pertinence d'augmenter l'agilité, la flexibilité et la performance des processus de production en place afin de répondre à une demande de masse personnalisée et d'être compétitif dans un contexte de globalisation des marchés. Aussi, ils s'entendent sur l'importance d'avoir un système de maintenance prédictive en place et de faire l'usage de catalogues de vente électronique afin d'être plus réactif et de mieux voir venir les opportunités. Il est important de développer une méthode formelle afin d'accroître l'agilité et de réduire le temps de réaction d'une entreprise dans un tel contexte.

Bien que le concept d'industrie 4.0 est large et comprend plusieurs éléments, le travail actuel définit la quatrième révolution industrielle comme étant l'interconnectivité des technologies émergentes dans le but d'accroître l'agilité et l'interconnectivité des systèmes et des processus industriels en place permettant de répondre à une demande dynamique.

2.2. Petites et moyennes entreprises

Selon Torrès (1999), la plupart des pays distinguent les entreprises selon leur taille ou leur chiffre d'affaires. Bien que les critères soient différents en fonction des pays, la Commission européenne a défini en 2008 qu'une PME doit compter moins de

250 employés et posséder un chiffre d'affaires qui ne dépasse pas 50 millions d'euros (Moeuf et al., 2018).

Au-delà de la taille de l'entreprise et du chiffre d'affaires, Torrès (1999) explique dans ses recherches ce qui caractérisent les PME, soit l'importance d'une implication forte et soutenue de la direction, une planification stratégique à court terme et une absence d'expert dans des fonctions bien précises. De plus, l'auteur décrit une PME comme étant une entreprise ayant une faible productivité, des coûts de production élevés et des performances en termes de temps de mise en production faible. Également, Moeuf et al. (2018) expliquent que la stratégie d'affaires des PME est souvent axée sur la flexibilité, la réactivité et la proximité avec leurs clients.

Étant axées sur la réactivité et la flexibilité, les PME sont un milieu propice pour développer le concept d'agilité. Shashi et al. (2020) abordent la notion de chaîne d'approvisionnement agile en entreprise comme étant une stratégie cruciale pour développer des capacités flexibles permettant de répondre rapidement aux demandes changeantes des clients. Le concept d'agilité au niveau de la chaîne d'approvisionnement, défini par Goldman et al. (1995), est une stratégie permettant d'être réactif et prêt aux changements face à une demande dynamique et turbulente. Par ailleurs, l'agilité est une stratégie exclusivement motivée dans un contexte où il y a présence d'une demande volatile et changeante. Le coût et la réactivité sont des indicateurs importants permettant de quantifier le niveau d'agilité.

Harris et al. (2019) réalisent des entrevues avec différentes PME manufacturières dans le but d'identifier les lacunes de ces entreprises en matière de fabrication numérique, communément appelée *digital manufacturing*. Dans le cadre de leurs recherches, les auteurs constatent que les PME manufacturières interviewées possèdent un faible volume de production mais une grande variété de produits, d'où l'importance d'être agiles face à la demande changeante.

Mittal et al. (2018) présentent les caractéristiques d'une PME manufacturière dans le contexte de l'industrie 4.0. Les auteurs dépeignent les PME comme étant l'une des forces de l'économie manufacturière et comme étant la ligne directrice de l'industrie manufacturière. La quatrième révolution industrielle a un impact d'envergure sur les PME. De plus, l'article explique que les PME font souvent face à des défis importants quant à l'implantation de nouvelles technologies. À la suite de leurs recherches, ils considèrent que :

- les PME ont une excellente relation avec leurs clients;
- les PME sont grandement dépendantes de leurs réseaux de collaboration;
- les PME ont des connaissances souvent restreintes dans des domaines bien précis;
- les PME ont une plus grande variété de produits adaptables selon la demande;
- les PME ont une structure organisationnelle peu complexe et plutôt informelle.

En bref, les auteurs notent une grande différence et ce, à tous les niveaux entre les deux types d'entreprises étudiées, soit les PME et les plus grosses entreprises.

Abdul-Nour et al. (2017) ont mené une étude cherchant à comprendre les forces et les faiblesses des PME québécoises dans un contexte de 4.0. Cette étude a permis de mettre en lumière le manque de ressources et de connaissances technologiques des entreprises. L'étude propose entre autres aux entreprises qui veulent entreprendre le virage numérique d'implanter des stratégies d'amélioration continue, de réduire leur niveau d'inventaire, de se diriger vers des conceptions à design modulaire et de standardiser les produits et les processus afin de faciliter la mise en place de cellules de production dynamiques.

Bien qu'il existe plusieurs définitions différentes de ce qu'est une PME, tant sur le plan qualitatif que sur le plan quantitatif et aussi en fonction du secteur d'activités,

le travail actuel définit une PME comme étant une entreprise possédant moins de 250 employés et ayant un chiffre d'affaires inférieur à 50 M\$.

2.3. Standardisation en structure modulaire

Le concept de standardisation est particulièrement important dans des domaines industriels avec de la machinerie plutôt lourde en raison de la nécessité de transporter, d'assembler et de désassembler la machinerie, comme l'expliquent Zhang et al. (2019). Les auteurs démontrent dans leurs recherches la pertinence d'utiliser des modules pouvant être configurés et reconfigurés. Cette standardisation de modules se fait en concevant des designs avec des fonctions indépendantes pouvant être unies à l'aide d'interface de connexion. Les auteurs démontrent qu'un assemblage final est le fruit d'une combinaison de différents modules permettant de concevoir des produits variés pouvant répondre à la demande personnalisée. Il est simplement question de remplacer certains modules fonctionnels pour obtenir une structure différente. Enfin, ceux-ci concluent en expliquant qu'une telle conception modulaire standardisée permet d'obtenir des structures plus épurées, de faciliter l'assemblage, d'augmenter la durée de vie de la machine, mais aussi de faciliter la maintenance des équipements.

Les auteurs Egilmez et al. (2019) explorent la similarité élevée des processus de fabrication menant à la formation de cellules de travail. Au terme de leurs recherches, ils concluent sur le lien entre une bonne formation de cellule de travail et un indice de similarité élevé des équipements de la cellule.

Dans le cadre de ses recherches, Gamache (2016) s'est intéressé aux facteurs clés de succès d'implantation des cellules dynamiques dans les entreprises réseaux. Le but de ses recherches était de déterminer les effets de l'utilisation des cellules dynamiques et des équipements à design modulaire sur la performance des

entreprises réseaux. À l'aide d'un design expérimental, d'une simulation et d'une étude de cas, l'auteur a été en mesure de valider la pertinence de son modèle. Gamache (2016) conclut que la standardisation par l'entremise d'équipements à structure modulaire permet d'implanter avec succès des cellules dynamiques. L'auteur constate que l'implantation des cellules dynamiques permet d'optimiser la performance des entreprises. Ainsi, la standardisation des modules, l'implantation des cellules dynamiques et la performance des entreprises sont, selon l'auteur, intimement reliées. Néanmoins, l'auteur n'aborde pas de manière concrète la façon de mettre en œuvre cette standardisation et cette conception modulaire.

Les auteurs s'entendent sur la pertinence de standardiser en structure modulaire pour obtenir des bénéfices notoires pour compétitionner dans un contexte de demande de masse personnalisée. Cependant, la littérature ne se penche pas sur la façon de le faire et sur les impacts qui s'y rattachent au niveau de la personnalisation de masse. Il est intéressant de poursuivre dans cet élan en mettant davantage l'accent sur le niveau de standardisation et l'impact sur l'agilité et le temps de réponse et ce, auprès d'une entreprise de type PME manufacturière.

2.4. Cellules dynamiques

Le concept de cellule dynamique a tout d'abord été mis de l'avant en 1995 par Rheault et al. (1995) pour cadrer dans la réalité des entreprises de sous-traitance voulant produire une grande variété de pièces pour des clients différents. Pour œuvrer dans un tel environnement et maintenir son niveau de compétitivité, il est primordial de miser sur la flexibilité de l'entreprise. Ces auteurs sont les premiers à utiliser l'appellation cellules dynamiques, communément appelées dans la littérature scientifique « DCMS », soit *dynamic cellular manufacturing system*. Ce concept de cellule dynamique, comme l'explique Gamache (2016), est une façon de produire en regroupant physiquement différents postes de travail ou différentes

machines, pouvant être formés et déformés à plusieurs reprises en fonction de la demande, dans le but de fabriquer une gamme de produits ayant un grand indice de similarité. Cependant, comme l'expliquent Rheault et al. (1996), le déplacement des machines doit avoir lieu si et seulement si il est économiquement justifiable de le faire.

Selon Rheault et al. (1995), le concept de cellule dynamique existe en raison de l'environnement turbulent dans lequel le système manufacturier se retrouve. L'environnement turbulent est décrit par les auteurs comme étant un environnement dans lequel se trouve une grande variation au niveau des lots de production, de la quantité de demandes, des temps de traitement et des mises en course. Selon les auteurs, en raison entre autres des changements constants des produits, l'environnement est dit turbulent (Rheault et al., 1996). Les auteurs se réfèrent aux travaux de Ramudhin et Rochette (1991), Montreuil et al. (1991), Irani (1993), Rajamani et al. (1992), Hayes et Pisano (1994), Greene et Cleary (1985) et enfin, Kusiak et Heragu (1987) pour caractériser cet environnement. Également, l'environnement est caractérisé comme étant turbulent lorsqu'il y a de fréquents changements de produits au niveau de la production, mais aussi lorsque la compétition sur le marché est forte. Enfin, les auteurs expliquent qu'en raison de la turbulence de l'environnement, les lignes de production et autres aménagements fixes deviennent rapidement obsolètes. Les cellules dynamiques ont par ailleurs démontré à plusieurs reprises leur efficacité dans des environnements dynamiques (Rheault et al., 1996).

Plusieurs auteurs s'intéressent aux modèles mathématiques et aux algorithmes derrières les cellules dynamiques. D'une part, à l'aide d'un design expérimental, Rheault et al. (1996) utilisent différentes variables dont la position actuelle du poste de travail, les distances entre les zones de travail pour ultimement conclure sur la pertinence de l'algorithme du coût marginal minimal. Celui-ci affirme qu'il s'agit

d'une base solide permettant la concrétisation du concept de cellule dynamique. Puis, différents auteurs poursuivent le travail déjà entamé et ce, en ayant tous un objectif commun, soit celui de réduire les coûts marginaux de manutention et de configuration. Les prochains paragraphes présentent des travaux pertinents dans le domaine des cellules dynamiques. Cela est nécessaire dans le but de faire le bilan des différentes variables pouvant venir affecter la performance des cellules dynamiques.

Dans leurs recherches, Safaei et Tavakkoli-Moghaddam (2009) étudient à leur tour la réduction des coûts, mais cette fois-ci en s'attardant au coût variable et au coût fixe des machines et de la manutention inter et intracellulaire. Les auteurs s'intéressent, dans leurs travaux, au mouvement inter et intracellulaire et au niveau d'inventaire en considérant les séquences d'opération et la relocalisation des machines. Par l'entremise d'un modèle mathématique intégré de formation cellulaire et de planification de production au sein des cellules dynamiques, ils concluent sur la pertinence d'un tel modèle dans un environnement dynamique.

Sakhaïi et al. (2013) étudient, quant à eux, la formation des cellules dynamiques, l'aménagement intercellulaire, la fiabilité des machines, les séquences d'assemblage et la planification de la production dans le but de conclure sur la diminution des coûts. Les auteurs démontrent la validité du modèle mis en place pour obtenir une solution optimale permettant de réduire les coûts engendrés par une machine en panne et la relocalisation des machines.

Kia et al. (2014) s'attaquent, quant à eux, aux séquences d'opération, au temps de processus, à la capacité des machines, aux différents aménagements et à la reconfiguration flexible afin de mesurer les coûts totaux. Dans leurs travaux, il est question de réduire les coûts de manutention du matériel intra et intercellulaire, les coûts de relocalisation de machine, les coûts d'achat de nouvelles machines et le coût de mise en œuvre des machines. Pour ce faire, les auteurs ont utilisé un modèle de

programmation linéaire en nombres mixtes pour intégrer les différentes décisions et ce, dans un environnement dit dynamique. Les auteurs ont été en mesure de conclure quant à l'efficacité de l'algorithme et ce, grâce à deux exemples permettant de prouver les résultats obtenus.

Dans leurs travaux, Niakan et al. (2016) ont eux aussi pour objectif de réduire les coûts significatifs reliés aux machines et à la main-d'œuvre, mais abordent également la réduction des pertes de production. En travaillant au niveau des affectations de la main-d'œuvre et au niveau des critères environnementaux et sociaux à l'aide d'une méthode de simulation à objectifs multiples, les auteurs ont pu conclure sur la performance de l'algorithme. Aussi, dans leurs travaux, Niakan et al. (2016) mentionnent qu'un système de production possédant un haut degré de flexibilité et d'agilité est en mesure de mieux répondre à une demande changeante. Puisque la similarité des processus de production des différents produits favorise la mise en place d'un système adapté, ceux-ci mettent de l'avant la pertinence de faire l'usage des cellules dynamiques comme système de production pour être en mesure d'atteindre les exigences de l'industrie 4.0.

Drolet et al. (2008) se sont, quant à eux, penchés dans le cadre d'une étude de cas, sur la comparaison entre différents systèmes de production. Il a été question d'étudier les systèmes de production suivants : *job shop*, cellules classiques, cellules virtuelles et cellules dynamiques. À l'aide d'un design expérimental, les auteurs ont été en mesure de tirer des conclusions quant à la pertinence et la performance d'un système de production cellulaire dynamique. Sur les 12 facteurs de performance qui ont été ciblés dans le cadre de cette étude, les cellules dynamiques se sont avérées au-dessus des autres types de systèmes de production pour chaque facteur. Parmi ces 12 facteurs de performance, on retrouve, entre autres, le coût marginal total, le niveau moyen de travail en cours, le niveau maximal de travail en cours, le niveau moyen de retard et le niveau maximal de retard.

Dans une optique de quantifier les gains obtenus grâce aux cellules dynamiques, Gamache (2016) s'est intéressé aux effets des cellules dynamiques sur la performance des entreprises réseaux. En mettant l'accent entre autres sur la fiabilité des fournisseurs, le système de production, l'interdisciplinarité et la conception modulaire et ce, grâce à un design expérimental, l'auteur a été en mesure de conclure sur l'effet des cellules dynamiques. Celui-ci conclut sur la pertinence d'un tel système de production dans le contexte des entreprises réseaux. Par ailleurs, l'auteur confirme que les variables qui ont été étudiées permettent d'optimiser le temps de réaction, le nombre d'encours, le temps de passage et les ventes totales. Toutefois, l'auteur termine en proposant une ouverture pour de futures recherches axées davantage sur des facteurs qui ont dû être négligés dans le cadre de ses recherches. Parmi ces facteurs, l'on retrouve entre autres l'horizon de planification, l'ordonnancement de la production, l'étude d'un réseau plus élaboré et la sous-traitance.

Les auteurs s'entendent que pour pouvoir opérationnaliser et mettre en œuvre un design standardisé, il est nécessaire d'avoir un système manufacturier adapté. En raison de la structure variable engendrée par des produits modulaires, un aménagement fixe occasionne souvent d'importants désagréments. De ce fait, plusieurs auteurs ont abordé la notion de cellules dynamiques pour aller conjointement avec les modules reconfigurables (Gamache, 2016).

2.5. Modèle de recherche – Cadre conceptuel

Au cours des dernières années, le changement des habitudes de consommation et le développement des nouvelles technologies ont entraîné une modification des manières de consommer et la mondialisation de l'économie engendrant un élargissement et une modification du marché des PME québécoises. Il est possible de voir apparaître une demande de masse personnalisée de la part des clients.

Afin d'être en mesure de pouvoir compétitionner dans cette nouvelle ère, les entreprises sont forcées de repenser leur produit et leur système de production pour se doter de produits et de systèmes de flexibles, reconfigurables et plus intelligents, tout en offrant un service après-vente, par l'entremise d'une maintenance prédictive.

Ce nouveau contexte laisse place à l'arrivée de la quatrième révolution industrielle, soit l'interconnectivité des technologies présentes. L'industrie 4.0 permet également d'accroître l'agilité d'une entreprise, tout en gardant en tête que plus une entreprise est agile, plus elle est en mesure d'évoluer dans l'ère du 4.0 et ce, en étant capable d'en tirer des bénéfices notoires.

Enfin, il est possible de comprendre que l'agilité et l'industrie 4.0 sont des concepts cruciaux, permettant à la fois de répondre aux besoins engendrés par le contexte de demande de masse personnalisée, tout en facilitant la mise en place des outils du 4.0. La figure 2.2 schématisse les concepts étudiés et les situe les uns par rapport aux autres.

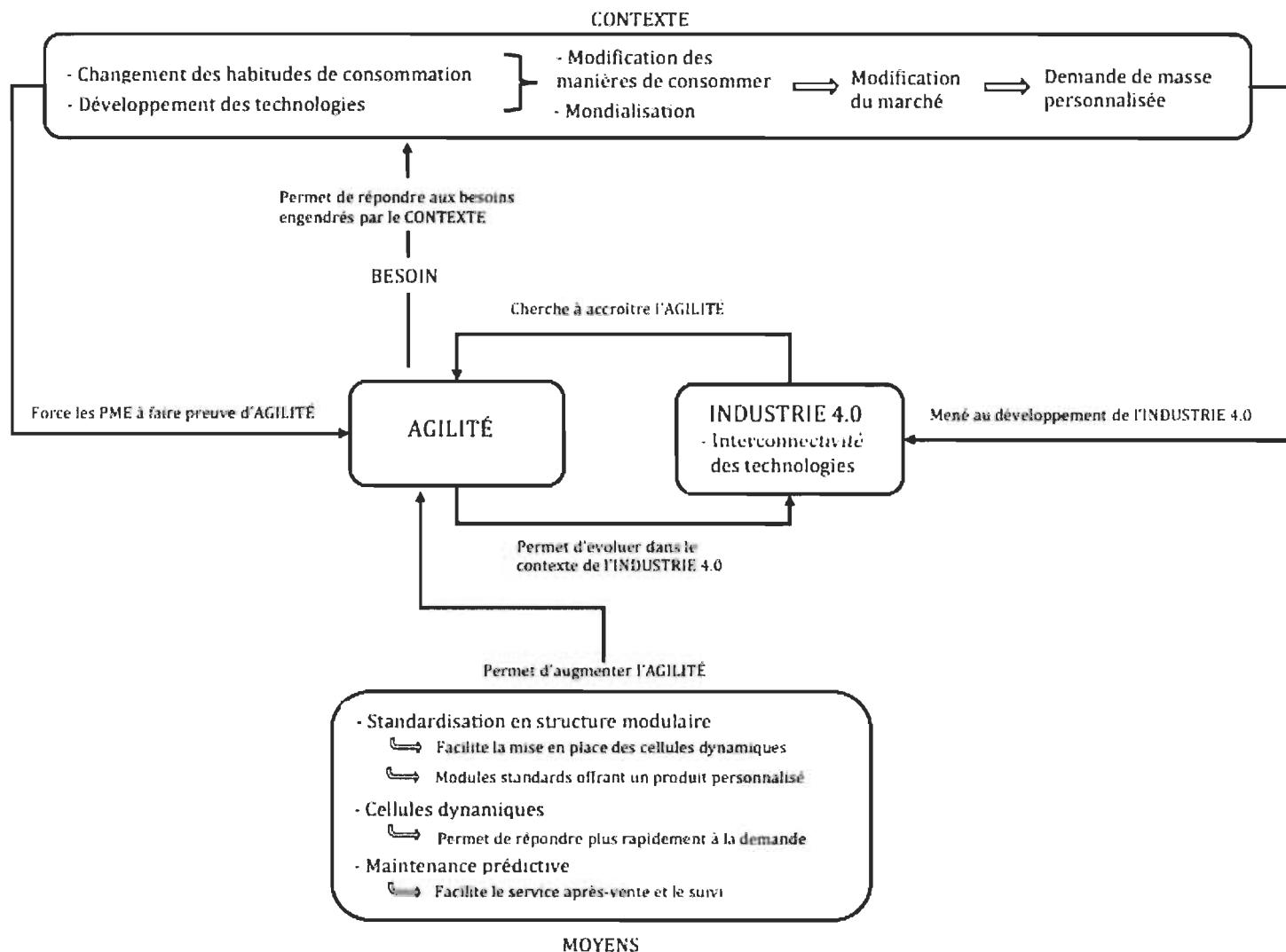


Figure 2.2 Cadre conceptuel de la recherche

CHAPITRE 3 - MÉTHODOLOGIE

Basés sur la matrice de la revue de la littérature présentée en annexe, les tableaux 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.5 et 3.6 résument les idées principales des auteurs. Les tableaux regroupent respectivement les variables dépendantes et indépendantes des différents auteurs en fonction de la standardisation, des cellules dynamiques et du modèle d'affaires et ce, afin de mieux cibler les variables abordées.

Tableau 3.1 Variables dépendantes en lien avec la standardisation en fonction des auteurs

Auteurs	Temps de reconfiguration	Performance	Temps de réaction	Temps de passage	Nombre d'en cours	Agilité manufacturière	Niveau d'inventaire
Gamache, S. (2016)	X	-	X	X	X	-	-
Egilmez, G. et al. (2019)	-	X	-	-	-	-	-
Yuan Z. et al. (2019)	X	-	X	-	-	X	X
Cohen, Y. et al. (2019)	-	X	-	-	-	-	-
Fréquence	2	2	2	1	1	1	1

Tableau 3.2 Variables indépendantes en lien avec la standardisation en fonction des auteurs

Auteurs	Similarité des produits	Conception modulaire	Séquence des opérations	Multi-disciplinarité
Gamache, S. (2016)	X	X	-	X
Egilmez, G. et al. (2019)	X	X	X	X
Yuan Z. et al. (2019)	X	-	-	-
Cohen, Y. et al. (2019)	X	X	X	-
Fréquence	4	3	2	2

Tableau 3.3 Variables dépendantes en lien avec les cellules dynamiques en fonction des auteurs

Auteurs	Coût total	Coût de production	Coût de maintenance	Coût de reconfiguration	Performance	Coût de panne	Temps de reconfiguration	Temps de passage
Bulgak, A.A. et al. (2009)	-	-	-	-	-	-	X	-
Drolet, J. et al. (2008)	-	-	-	-	X	-	-	X
Gamache, S. (2016)	-	-	-	-	-	-	X	X
Kia, R. et al. (2012)	X	X	-	-	-	-	-	-
Rheault, M. et al. (1996)	X	X	X	X	-	-	-	-
Rheault, M. et al. (1995)	X	X	X	X	-	X	-	-
Safaei, N. et al. (2009)	X	X	X	X	-	-	-	-
Sakhaii, M. et al. (2013)	X	X	-	X	X	X	X	-
Kia, R. et al. (2012)	X	-	-	-	-	-	-	-
Niakan, F. et al. (2016)	X	X	X	-	X	X	-	-
Bin W. et al. (2016)	X	-	-	-	X	-	-	-
Saboor, A. et al. (2019)	X	X	X	X	-	X	-	-
Fréquence	9	7	5	5	4	4	3	2

Tableau 3.4 Variables indépendantes en lien avec les cellules dynamiques en fonction des auteurs

Auteurs	Séquence des opérations	Aménagement inter/intra cellulaire	Capacité des machines	Système de production	Environnement turbulent	Volume de production	Planification de production	Multidisciplinarité	Affectation des employés	Fiabilité des machines
Bulgak, A.A. et al. (2009)	X	-	X	-	-	-	-	-	-	-
Drolet, J. et al. (2008)	X	X	X	X	X	-	X	-	-	-
Gamache, S. (2016)	-	-	-	X	-	X	X	X	X	-
Kia, R. et al. (2012)	X	X	X	-	-	X	-	-	-	-
Rheault, M. et al. (1996)	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Rheault, M. et al. (1995)	X	X	-	-	-	-	-	-	-	-
Safaei, N. et al. (2009)	-	X	-	-	-	-	-	-	-	-
Sakhaii, M. et al. (2013)	X	X	X	-	-	-	X	X	X	X
Kia, R. et al. (2014)	X	X	X	-	-	-	-	-	-	-
Niakan, F. et al. (2016)	-	-	X	-	X	-	-	X	X	-
Bin W. et al. (2016)	X	-	-	-	X	X	-	-	-	-
Saboor, A. et al. (2019)	-	-	-	X	-	-	-	-	-	-
Fréquence	8	6	6	3	3	3	3	3	3	1

Tableau 3.5 Variables dépendantes en lien avec le modèle d'affaires en fonction des auteurs

Auteurs	Performance	Agilité manufacturière	Efficacité	Flexibilité	Facilité de maintenance	Niveau de maturité
Sanchez A.M. et al. (2019)	-	X	X	X	-	-
Harris, G. et al. (2019)	X	X	X	X	-	X
Moeuf, A. et al. (2018)	X	X	X	X	-	-
El Hamdi, S. et al. (2018)	-	-	-	-	-	X
Mittal, S. et al. (2018)	-	-	-	-	-	X
Moeuf, A. et al. (2020)	X	X	-	-	-	-
Peukert, S. et al. (2020)	X	-	-	-	X	-
Cohen, Y. et al. (2019)	X	-	-	-	-	-
Gamache, S. (2017)	X	X	X	X	-	-
Bourezza, E.M. et al. (2020)	-	-	-	-	X	-
El-kaime, H. et al. (2021)	X	-	-	-	-	-
Shashi et al. (2020)	X	X	X	X	-	-
Erez, A.S. et al. (2020)	X	-	-	-	X	-
Nishi, T. et al. (2020)	X	X	X	X	--	-
Gamache, S. et al. (2020)	X	-	-	-	-	-
Fréquence	11	7	6	6	3	3

Tableau 3.6 Variables indépendantes en lien avec le modèle d'affaires en fonction des auteurs

Auteurs	Technologies du 4.0	Maintenance prédictive	Vente par catalogue
Sanchez A.M. et al. (2019)	-	-	-
Harris, G. et al. (2019)	-	-	-
Moeuf, A. et al. (2018)	X	-	-
El Hamdi, S. et al. (2018)	X	-	-
Mittal, S. et al. (2018)	X	-	-
Moeuf, A. et al. (2020)	X	-	-
Peukert, S. et al. (2020)	X	-	-
Cohen, Y. et al. (2019)	-	X	-
Gamache, S. (2017)	X	X	X
Bourezza, E.M. et al. (2020)	X	X	X
El-kaime, H. et al. (2021)	X	-	-
Shashi et al. (2020)	X	-	-
Erez, A.S. et al. (2020)	X	X	X
Nishi, T. et al. (2020)	X	-	X
Gamache, S. et al. (2020)	X	-	-
Rauch, E. et al. (2019)	X	-	-
Fréquence	13	4	4

En analysant les différentes variables présentes dans les articles ci-haut, il a été possible de les regrouper et de cibler celles qui seront étudiées en fonction des thèmes principaux de cette recherche. Dans le diagramme d'Ishikawa qui suit, il est possible de prendre connaissance des variables utilisées.

La figure 3.1 illustre le diagramme complet qui comprend quatre diagrammes d'Ishikawa. Le premier diagramme fait référence au produit, le deuxième fait

référence au procédé de production, le troisième fait référence au modèle d'affaires et enfin, le quatrième regroupe les trois premiers, qui font référence à la méthode générale qui cherche à modifier la performance de l'entreprise. La performance, quant à elle, reflète l'agilité de l'entreprise pouvant être mesurée par le temps de réaction, soit le délai entre le moment où la commande est reçue et le temps où la commande est prête à être expédiée.

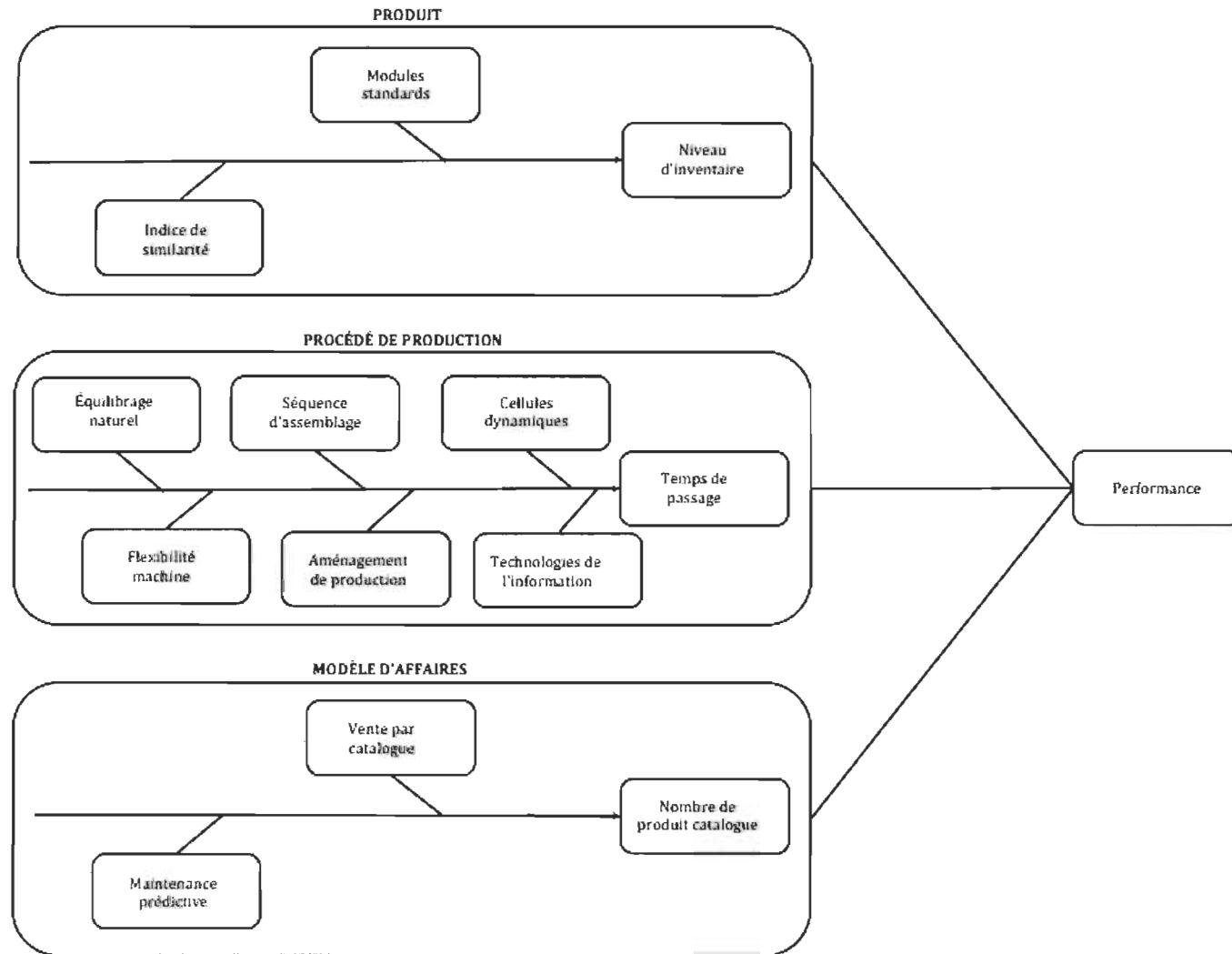


Figure 3.1 Diagramme d'Ishikawa

Premièrement, les modules standards et l'indice de similarité sont les facteurs ciblés qui sont étudiés afin de savoir à quel niveau ils ont un impact sur le niveau d'inventaire.

Deuxièmement, l'équilibrage naturel, la séquence d'assemblage, les cellules dynamiques, la flexibilité machine et l'aménagement de production seront les facteurs ciblés qui seront étudiés afin de savoir à quel niveau ils ont un impact sur le temps de passage.

Troisièmement, la maintenance prédictive et la vente par catalogue seront les facteurs ciblés qui seront étudiés afin de savoir à quel niveau ils ont un impact sur le nombre de produits catalogue.

Enfin, le niveau d'inventaire, le temps de passage et le nombre de produits catalogue seront les facteurs ciblés qui seront étudiés afin de savoir à quel niveau ils ont un impact sur la performance de l'entreprise. La performance étant mesurée par le temps de réaction.

La méthodologie utilisée dans le cadre de cette recherche est l'étude de cas pour valider la stratégie d'implantation. Par ailleurs, bien que l'efficacité des cellules dynamiques et la pertinence des modules reconfigurables aient été démontrées à l'aide de la revue de littérature ci-haut, il est intéressant, dans le cadre de la recherche, d'approfondir sur la manière de standardiser pour implanter avec succès des cellules dynamiques et ce, pour ultimement augmenter l'agilité des PME manufacturières.

3.1. Stratégie d'implantation globale

La stratégie d'implantation globale proposée dans le tableau 3.7 pour augmenter l'agilité d'une PME manufacturière québécoise en contexte de quatrième révolution industrielle passe par trois étapes interreliées. En augmentant l'agilité d'une PME, il est possible d'être en mesure de mieux répondre à une demande de masse personnalisée.

Il est question de standardiser le produit en structures modulaires afin de rendre le produit 4.0 et ce, en réalisant diverses études et analyses menant à une nouvelle conception standardisée. Puis, il est question de favoriser le flux physique linéaire et le flux d'information pour rendre le procédé de production 4.0 et ce, en implantant un système de gestion et une codification adaptée et en revoyant le système de production en place. Enfin, il est question d'adapter le modèle d'affaires pour rendre le processus de vente jusqu'au service après-vente 4.0 et ce, en mettant en place un modèle de marketing adapté et en priorisant la maintenance prédictive.

La stratégie d'implantation varie d'une PME manufacturière québécoise à l'autre en fonction du produit dont il est question mais également en fonction de l'état d'avancement de l'entreprise dans la marche à suivre.

Tableau 3.7 Stratégie d'implantation globale

Stratégie d'implantation globale		
<i>Objectif</i>	Marche à suivre	
Objectif	Offrir une méthode afin d'augmenter l'agilité d'une PME manufacturière québécoise et d'être en mesure de répondre à une demande de masse personnalisée cadrant dans l'ère de la révolution 4.0.	
Étape 1	Rendre le produit 4.0	<p>Standardisation et structure modulaire</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Révision du design afin d'obtenir un indice de similarité élevé. 2. Standardisation en structures modulaires par plateforme. 3. Obtention de modules facilement reconfigurables.
Étape 2	Rendre le procédé de production 4.0	<p>Favoriser le flux physique linéaire et le flux d'information</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Implantation d'un système ERP. 2. Mise en place d'une codification adaptée aux structures modulaires. 3. Implantation d'une gestion des stocks Kanban. 4. Mise en place de cellules de travail dynamiques.
Étape 3	Adapter le modèle d'affaires au 4.0	<p>Instaurer la vente en ligne et le service après-vente</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Mise en place d'un marketing axé sur la vente par catalogue en ligne. 2. Utilisation de capteurs facilitant la maintenance prédictive.

3.2. Implantation en entreprise

En partenariat avec Mitacs-Accélération, l'Université du Québec à Trois-Rivières et une entreprise québécoise se spécialisant dans le domaine de la machinerie agricole, Rovibec Agrisolutions Inc., il a été possible de réaliser un stage de deux ans en entreprise. Ce stage en entreprise a permis d'avoir un cheminement hybride entre la théorie et la pratique. Au fil de ces deux années, il a été possible de non seulement développer la stratégie d'implantation, mais également de la mettre en œuvre afin d'augmenter l'agilité de l'entreprise pour mieux répondre à une demande de masse personnalisée.

Grâce à l'implication des différents partenaires, il a été possible de rendre le produit et le procédé de production 4.0 et d'offrir une stratégie d'implantation pour rendre le processus de vente jusqu'au service après-vente 4.0. En travaillant de pair avec l'équipe de recherche et développement, de production, de logistique et de direction chez Rovibec Agrisolutions Inc, il a été possible de mettre en place l'entièreté du projet et d'y apporter les corrections nécessaires en cours de route.

CHAPITRE 4 - RENDRE LE PRODUIT 4.0

4.1. Mise en contexte

L'augmentation de l'agilité d'une PME manufacturière québécoise dans le contexte de la 4^e révolution industrielle passe, entre autres, par l'adaptation du produit pour le rendre 4.0. Bien entendu, cette étape est nécessaire dans un contexte de produits transformés. Rendre un produit issu du secteur primaire prêt pour la réalité du 4.0 est plus complexe. Il s'agit ici de cibler un produit qui peut se prêter à des modifications dans les étapes de conception, de fabrication et d'expédition.

Pour rendre un produit 4.0, les auteurs démontrent l'intérêt de standardiser des modules en concevant des designs avec des fonctions indépendantes pouvant être unies à l'aide d'interface de connexion permettant l'obtention de produits variés pouvant répondre à une demande personnalisée. En remplaçant certains modules fonctionnels, il est possible d'obtenir une structure différente, issue de modules standards.

Par ailleurs, en standardisant en structures modulaires par plateforme, il est possible d'obtenir un design avec un indice de similarité élevé facilement reconfigurables et connectables permettant d'augmenter l'agilité d'une PME manufacturière et d'être en mesure de répondre à une demande de masse personnalisée cadrant dans l'ère de la révolution 4.0.

4.2. Démarche pour obtenir un produit 4.0

4.2.1. Collecte des données

Afin de bien comprendre les produits et la fréquence de vente de ceux-ci, il est intéressant d'effectuer une collecte de données sur les ventes des dernières années. Les résultats représentent les ventes effectuées de 2015 à 2018.

4.2.2. Analyse des quatre dernières années

Plusieurs types de convoyeurs existent chez Rovibec. Parmi ceux-ci, on retrouve les convoyeurs à courroie (CC), les convoyeurs à balle (CB), les super convoyeurs (CD), les convoyeurs à chaîne (CCH) et enfin, les convoyeurs nourrisseurs (CN). Il est question de déterminer sur quel convoyeur il est le plus judicieux d'effectuer un travail de standardisation. Le tableau 4.1 et la figure 4.1 démontrent le nombre de convoyeurs qui ont été vendus au cours des quatre dernières années.

Tableau 4.1 Vente des convoyeurs dans les quatre dernières années

Année	Somme de CC	Somme de CB	Somme de CD	Somme de CCH	Somme de CN
2015	115	23	0	0	27
2016	180	32	31	0	47
2017	165	4	27	0	46
2018	186	17	31	22	70
Total général	646	76	89	22	190
Pourcentage (%)	63	7	9	2	19

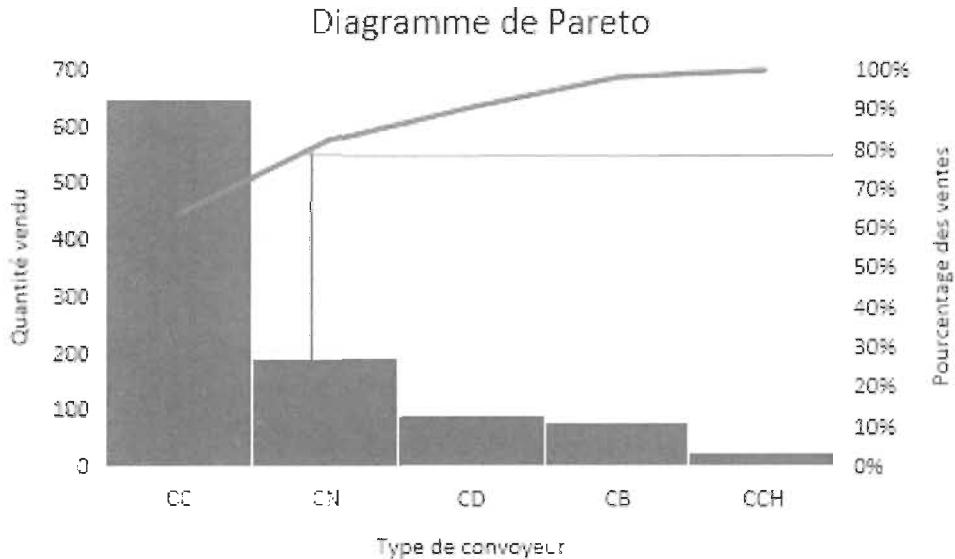


Figure 4.1 Diagramme de Pareto de la vente des convoyeurs

En concordance avec la Loi de Pareto, il est possible de constater que deux types de convoyeurs représentent 80 % des ventes. Il est question d'effectuer un travail de standardisation sur ces deux convoyeurs, soit les CC et les CN. Il est important de noter que dans cette situation, puisque le prix des convoyeurs est comparable, il n'est pas question d'inclure la composante monétaire. On tient seulement compte de la quantité de convoyeurs vendus au cours des dernières années pour établir les produits judicieux à standardiser.

4.2.2.1. Convoyeur à courroie (CC)

L'analyse qui suit permet de déterminer de façon détaillée chacune des options qui représentent plus de 80 % des ventes reliées aux CC. Il est question de s'attarder aux différents modèles de CC présents. Le tableau 4.2 et la figure 4.2 démontrent le nombre de CC qui ont été vendus au cours des quatre dernières années.

Tableau 4.2 Vente des CC dans les quatre dernières années

Année	CC18	CC18LP	CC24	CC36	Total général
2015	43	29	39	4	115
2016	51	40	78	11	180
2017	74	37	47	7	165
2018	69	44	64	9	186
Total général	237	150	228	31	646
Pourcentage (%)	37	23	35	5	

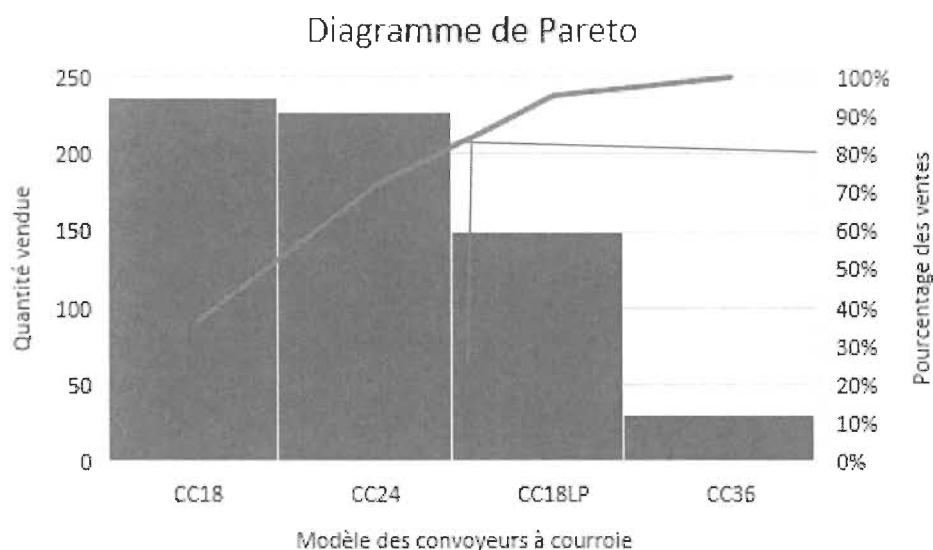


Figure 4.2 Diagramme de Pareto des modèles de convoyeurs à courroie

En concordance avec la Loi de Pareto, il est possible de constater que les CC de type CC18 et CC24 représentent 80 % des ventes. Cependant, puisque le CC18LP offre une particularité que seul ce modèle peut offrir, ce modèle sera conservé afin de venir répondre à un besoin particulier des clients.

D'une seconde part, il est question d'options plus spécifiques. Chaque option est analysée de manière à cibler les options qui sont vendues plus de 80 % du temps, toute proportion gardée. Il s'agit des mécanismes d'entraînements, des sections de convoyeurs, des angles, des déviateurs, des attaches mécaniques, des jupes pour section ouverte, des jupes et couvercles pour section fermée, des trémies, des adaptateurs pour sac de silo et enfin, des options supplémentaires, comme l'indique le tableau 4.3.

Tableau 4.3 Options présentes plus de 80 % du temps dans les ventes chez les CC

OPTIONS	DÉTAILS	PLUS DE 80 %
Mécanisme d'entraînement	Simple série 70	X
	Simple série 80	X
	Simple série 80 – gros rouleau	
	Double série 80 – gros rouleau	
Section de convoyeur en acier galvanisé	Section 2,5'	
	Section 4'	
	Section 5'	
	Section 8'	
	Section 10'	X
Angle	Concave	X
	Convexe	
Déviateur mécanique	À levier avec vérin	X
	À levier manuel	
Attaché mécanique	Acier	X
	Acier inoxydable	
Jupe pour section ouverte	Jupe 5'	
	Jupe 10'	X

Tableau 4.3 Options présentes plus de 80 % du temps dans les ventes chez les CC
(suite)

	Jupe 5'	
Jupe et couvercle pour section fermée	Jupe 10'	X
	Couvercle de 5'	
	Couvercle de 10'	X
	27" (courroie standard)	X
	27" (courroie palettes)	
	Allongée 48" (courroie standard)	
	Allongée 48" (courroie palettes)	
	36" pour tête double	
Trémis	36" ent. double (courroie standard)	
	36" ent. double (courroie palettes)	
	Centrale 41" avec fixation	
	Transition de couvert	
	Couvercle du déflecteur	
	Adapt. sac de silo 12"	X
	Couvercle sac de silo 10"	
	Couvercle sac de silo 12"	X
Adaptateur pour sac de silo	Trémie centrale 41" sac 10"	
	Trémie centrale 41" sac 12"	
	Adapteur sortie sac de silo 12"	
	Adapteur de sortie sac de silo 12" ext. brosse	

Tableau 4.3 Options présentes plus de 80 % du temps dans les ventes chez les CC
(suite)

Options à installer sur la tête d' entraînement	Déflecteur de déversement	X
	Grattoir pour courroie lisse	X
	Brosse rotative pour nettoyer la courroie (série 70)	X
	Brosse rotative pour nettoyer la courroie (série 80)	
	Brosse rotative pour nettoyer la courroie gros rouleau (série 80)	
	Dalle de déversement avec aimant	

Cette analyse permet de cibler les options les plus fréquemment vendues en ce qui a trait aux convoyeurs à courroie. Il est plus facile d'éliminer des options rarement vendues et ce, pour faciliter l'étape de la standardisation.

4.2.2.2. Convoyeur nourrisseur (CN)

L'analyse qui suit permet de déterminer de façon détaillée chacune des options qui représentent plus de 80 % des ventes reliées aux CN. Il est question de s'attarder aux différents modèles de CN présents. Le tableau 4.4 et la figure 4.3 démontrent le nombre de CN qui ont été vendus au cours des quatre dernières années.

Tableau 4.4 Vente des CN dans les quatre dernières années

Année	CN 18"	CN 18" LP	CN 24"	Total général
2015	8	18	1	27
2016	8	27	12	47
2017	18	24	4	46
2018	32	29	9	70
Total général	66	98	26	190
Pourcentage (%)	35	52	13	

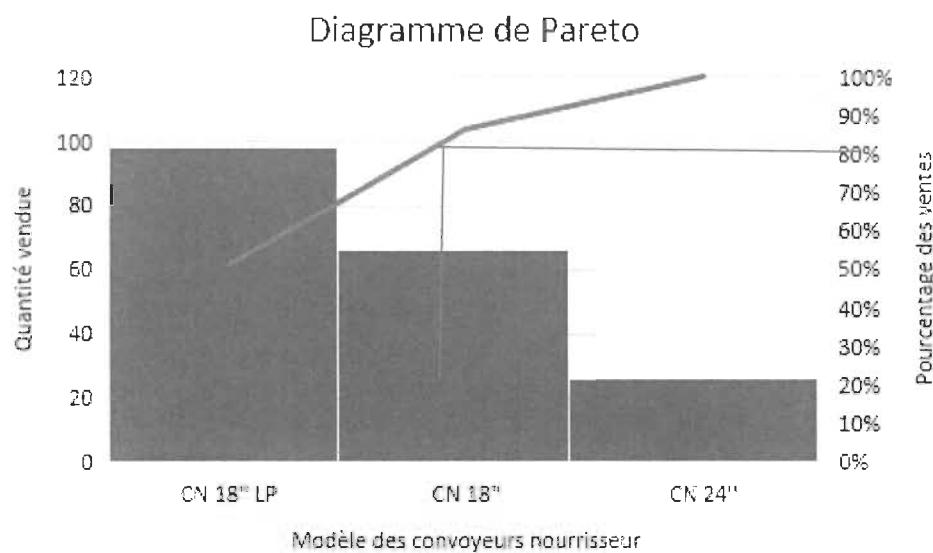


Figure 4.3 Diagramme de Pareto des modèles de convoyeurs nourrisseurs

En concordance avec la Loi de Pareto, il est possible de constater que les CN de type CN18LP et CC18 représentent 80 % des ventes. Cependant, puisque le CC24 offre une particularité que seul ce modèle peut offrir, ce modèle sera conservé afin de venir répondre à un besoin particulier des concessionnaires.

D'une seconde part, il est question d'options plus spécifiques. Chaque option est analysée de manière à cibler les options qui sont vendues plus de 80 % du temps,

toute proportion gardée. Il s'agit des mécanismes d'entraînement, la description des moteurs associés à chaque caractéristique, des charrues, des sélecteurs de déversement, des rouleaux, la description des rouleaux associés aux convoyeurs, des câbles, des déviateurs mécaniques et des dalles de déchargement, comme l'indique le tableau 4.5.

Tableau 4.5 Options présentes plus de 80 % du temps dans les ventes chez les CN

	OPTIONS	DÉTAILS	PLUS DE 80 %
Mécanisme d'entraînement	Charrue mobile déviateur gauche et droit (courroie 1 ou 2 direct.)		X
	Charrue fixe gauche ou droit (courroie 1 direct.)		
	Charrue mobile déviateur gauche et droit (courroie 1 direct.)		
	Charrue mobile déviateur gauche ou droit (courroie 2 direct.)		
	Sélecteur de déversement mécanique gauche/droit		
	Sélecteur de déversement vérin élect. gauche/droit		X
	Petit rouleau		
Câble	Gros rouleau		X
	Câble d'acier plastifié (vendu au pied)		
Déviateur mécanique et dalle de déchargement	Fixe avec vérin élect. (latéral)		
	Fixe à levier manuel (latéral)		X
	Fixe à levier avec vérin élect. (vertical)		
	Fixe à levier manuel (vertical)		
	Dalle de déchargement côté gauche		X
	Dalle de déversement côté droit		X

Cette analyse permet de cibler les options les plus fréquemment vendues en ce qui a trait aux convoyeurs nourrisseurs. Il est plus facile d'éliminer des options rarement vendues et ce, pour faciliter l'étape de la standardisation.

4.2.2.3. Non conformes

En plus d'analyser les options vendues, il est important d'analyser les non conformes survenus en lien avec les convoyeurs étudiés au cours des quatre dernières années. Sur l'ensemble des convoyeurs analysés au cours des dernières années, 45 non conformes sont survenus. Parmi ces non conformes, différents secteurs ont été touchés. La figure 4.4 illustre les secteurs des non conformes au cours des quatre dernières années.

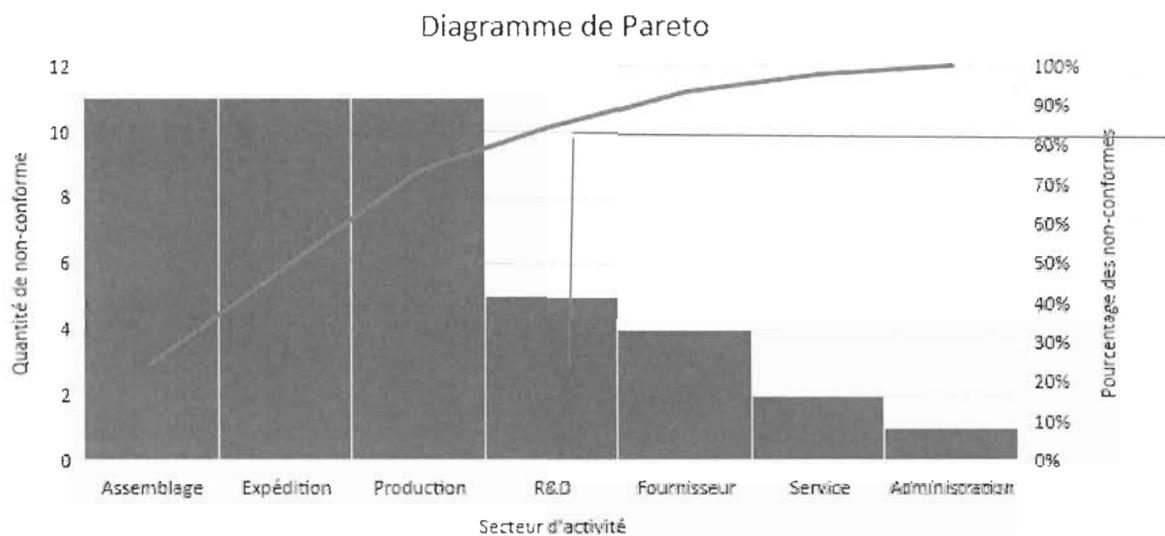


Figure 4.4 Diagramme de Pareto des non conformes

Sur l'ensemble des non conformes, les secteurs responsables de plus de 80 % des non conformes sont les secteurs de l'assemblage, l'expédition, la production et la R-

D. Cette donnée décrit parfaitement le besoin de standardiser en modules facilement reconfigurables pour faciliter l'assemblage et l'expédition et ce, tout en simplifiant la fabrication des composantes afin de réduire le nombre de non conformes et rester compétitif. Cela décrit aussi le besoin de mettre en place davantage de contrôle qualité sur la ligne.

4.2.3. Rencontre avec l'équipe de direction et les concessionnaires

À la suite de l'analyse des différents types de convoyeurs et de leurs options, il est important de faire une rencontre avec l'équipe de direction et les concessionnaires. Il est question de voir avec l'équipe de direction jusqu'où elle est prête à aller pour standardiser le produit.

4.2.4. Étude de conception

Pour standardiser en structures modulaires facilement reconfigurables et connectables, il est important de comprendre la nature du produit et ce dont il est composé. Il est primordial de bien comprendre le produit et de le décortiquer en modules fonctionnels. Une étude de conception des deux différents types de convoyeurs permet de statuer sur la nature des différents modules à standardiser. Les différents modules pour chaque convoyeur permettent de plus facilement déterminer les différentes plateformes à mettre en place en lien avec les cellules dynamiques à implanter à la suite de la standardisation.

Dans un premier temps, pour les convoyeurs à courroie, huit modules ressortent. Pour effectuer une standardisation en structures modulaires, il est judicieux de subdiviser les convoyeurs à courroie selon les modules suivants : tête d'entraînement, section, jupe, trémie, option de grattoir, option de brosse rotative, pied d'entraînement, motorisation et couvercle, tels que présenté à la figure 4.5.

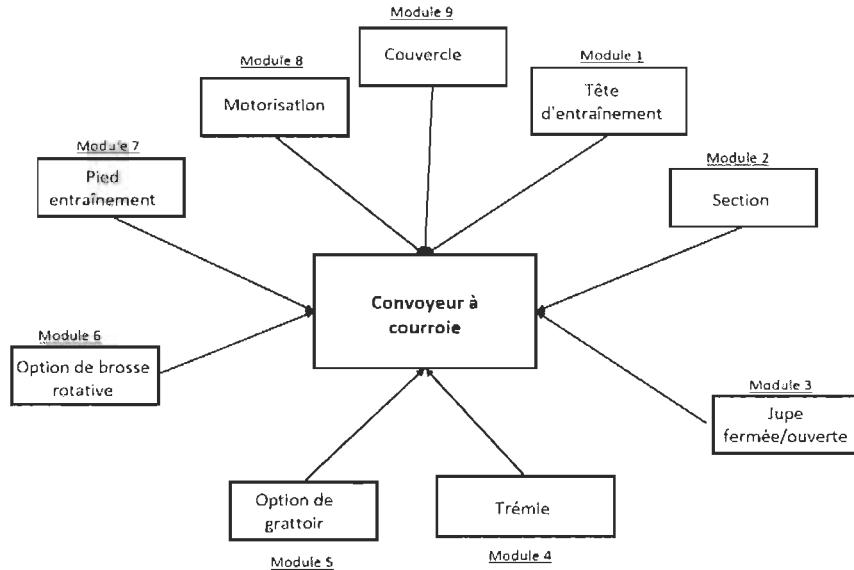


Figure 4.5 Plateforme 1

Dans un second temps, pour les convoyeurs nourrisseurs, quatre modules ressortent. Pour effectuer une standardisation en structures modulaires, il est judicieux de subdiviser les convoyeurs nourrisseurs selon les modules suivants : charrue, dalle de déversement, motorisation et déviateur, tels que présenté à la figure 4.6.

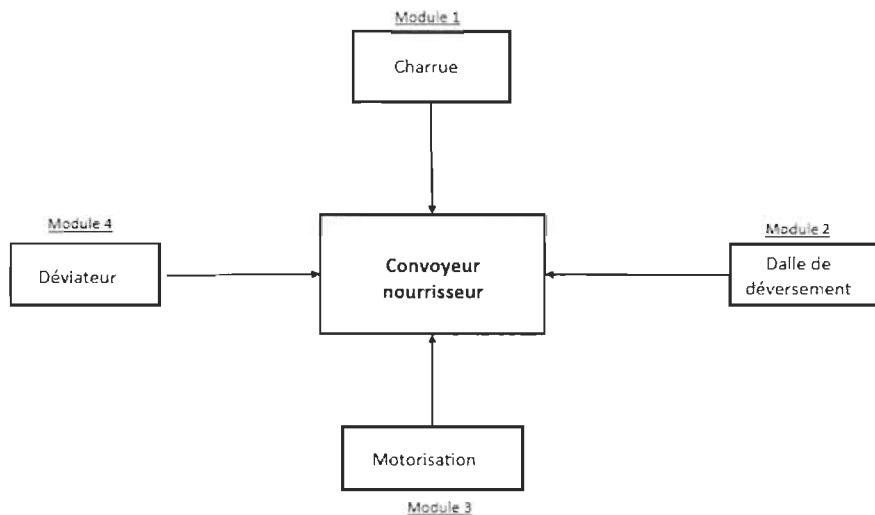


Figure 4.6 Plateforme 2

4.2.5. Conception

À la suite de l'étude de l'entièreté des convoyeurs, de leurs options et de la façon de subdiviser les modules, le travail de conception permet de concrétiser les modules. Cette étape est réalisée rigoureusement afin de pouvoir tenir compte du plus grand nombre de contraintes possibles. Lors de la conception, il faut non seulement garder en tête les différentes structures modulaires qu'on cherche à obtenir, mais il faut également considérer la fonctionnalité des structures, la compatibilité avec les modèles anciens et la mécanique des divers produits.

4.2.6. Assemblage et tests

Au fur et à mesure que la conception avance, il est important de lancer les produits en production, les assembler et les tester. En les assemblant soi-même, on est souvent confronté à des aspects auxquels on n'aurait pas pensé. Les structures sont faites dans l'optique de répondre plus facilement et rapidement à une demande de masse personnalisée. Les structures doivent être faites en ce sens. Celles-ci doivent être simples à assembler, tout en limitant le nombre de pièces gauches/droites pour

limiter le nombre de non conformes. De plus, la boulonnerie doit être rapide et simple à installer. Par ailleurs, il est privilégié de concevoir des détrompeurs, soit *Poka-Yoke*, afin d'éviter des erreurs d'assemblage à l'aide de dispositifs mécaniques.

Dans le cadre de cette étude, l'assemblage des composantes permet de cerner des problèmes de conception, de les corriger et d'améliorer le produit.

4.2.7. Modification du manuel d'assemblage et du bon de commande

À la suite de la conception des structures modulaires, il est essentiel de faire le suivi au niveau des manuels d'assemblage et des bons de commande afin de conserver une traçabilité et de préparer les employés aux changements imminents. En faisant la mise à jour complète des manuels d'assemblage, cela permet aux employés de suivre les modifications apportées au niveau du design.

Par ailleurs, la modification du bon de commande est également une étape cruciale. Pour que le concept de structures modulaires s'applique avec succès, cela débute à l'étape de la commande. Il faut transposer les modifications faites afin de faciliter la commande pour le client. En adaptant le bon de commande aux structures modulaires, cela permet à l'entreprise de plus facilement répondre à la demande et ce, en mettant en place un système de production de cellules dynamiques. Le client a dans l'idée qu'il commande un produit personnalisé et bien unique à sa réalité. Toutefois, il est seulement question pour l'entreprise de faire un amalgame de différents modules, permettant de réduire les temps entre le moment où la commande est lancée et le moment de la réception du produit.

Dans le cadre de cette étude, la modification du manuel d'assemblage et du bon de commande permet de plus facilement décortiquer les composantes de chaque

module, de mettre en lumière l'utilité de ces structures et de constater la réduction du nombre de composantes et de composants variables dans les commandes.

En établissant la quantité de composantes initiales et la quantité de composantes actuelles, il est possible de calculer le pourcentage de réduction des composantes. Voici ci-dessous le détail des nouveaux modules.

4.3. Résultats terrain

4.3.1. Convoyeur à courroie

Module 1. Tête d'entraînement

Il y avait initialement six modèles différents de tête d'entraînement en fonction du mécanisme d'entraînement (série 70 simple, série 80 simple, série 80 gros, série 80 double gros), de la largeur (18", 24" et 36") et de la hauteur du convoyeur (profil bas ou standard).

Dorénavant, il y a seulement deux modèles de tête d'entraînement, soit une réduction de 67 % des composantes.

Module 2. Sections

Il y avait initialement 20 modèles de sections différents en fonction de la largeur (18", 24" et 36") et de la hauteur du convoyeur (profil bas ou standard).

Dorénavant, il y a seulement quatre modèles de sections, soit une réduction de 80 % des composantes.

Module 3. Jupe fermée/ouverte

Il y avait initialement quatre modèles de jupes différents en fonction de la spécificité (ouverte ou fermée) et de la longueur du convoyeur (5' ou 10').

Dorénavant, il y a seulement deux modèles de jupes, soit une réduction de 50 % des composantes.

Module 4. Trémie

Il y avait initialement 21 modèles de trémies différents en fonction de la largeur du convoyeur (18" ou 24"), de la longueur de la trémie (27", 36" ou 48") et du type de courroie (standard ou à palette).

Dorénavant, il y a seulement deux modèles de trémies, soit une réduction de 90 % des composantes.

Module 5. Option de grattoir

Il y avait initialement trois modèles de grattoirs différents en fonction de la largeur du convoyeur (18", 24" ou 36").

Dorénavant, il y a seulement deux modèles de grattoirs, soit une réduction de 33 % des composantes.

Module 6. Option de brosse rotative

Il y avait initialement quatre modèles de brosses rotatives différents en fonction de la largeur du convoyeur (18", 24" ou 36") et des spécificités de la tête d'entraînement.

Dorénavant, il y a seulement deux modèles de brosses rotatives, soit une réduction de 50 % des composantes.

Module 7. Pied d'entraînement

Il y avait initialement quatre modèles de pied d'entraînement différents en fonction de la largeur du convoyeur (18", 24" ou 36") et des spécificités de l'entraînement.

Dorénavant, il y a seulement deux modèles de pied d'entraînement, soit une réduction de 50 % des composantes.

Module 8. Motorisation

En ce qui a trait à la motorisation, tous les types de moteur qui étaient initialement utilisés pourront encore l'être. La tête d'entraînement a été conçue pour recevoir, sur un seul modèle de tête, tous les mêmes moteurs qu'auparavant.

Module 9. Couvercle

Il y avait initialement quatre modèles de couvercles différents en fonction de la largeur du convoyeur (18" ou 24") et la longueur du convoyeur (5' ou 10').

Dorénavant, il y a seulement deux modèles de couvercles, soit une réduction de 50 % des composantes.

Les figures 4.7, 4.8 et 4.9 illustrent les modules des convoyeurs à courroie comme il est possible de les apercevoir dans les manuels d'assemblage.

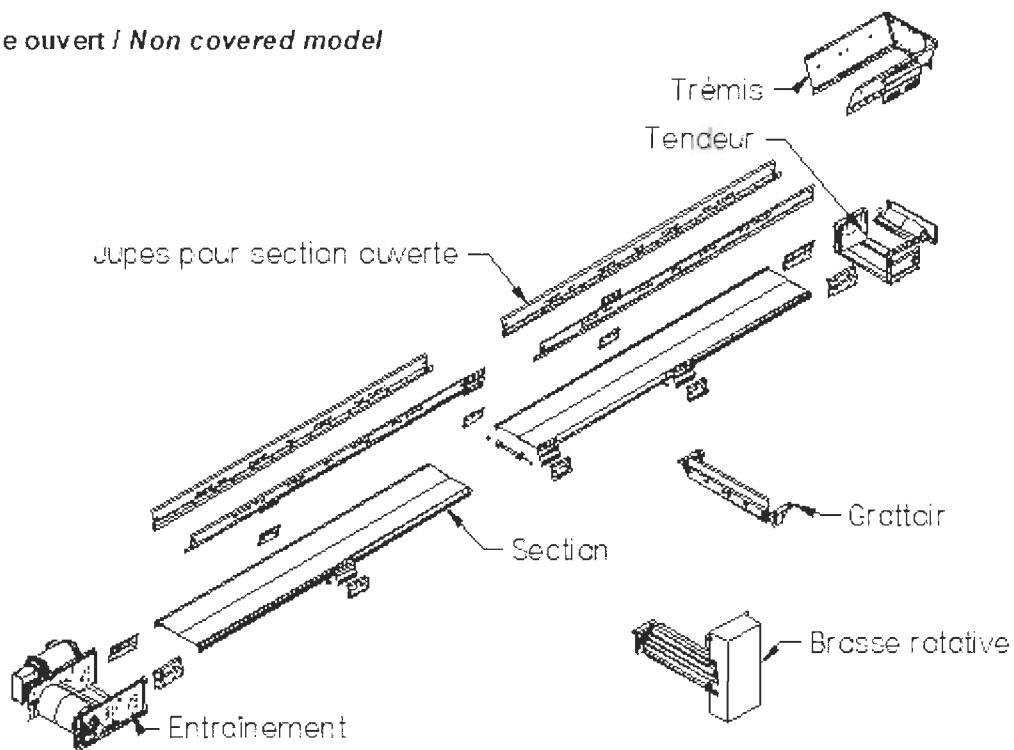
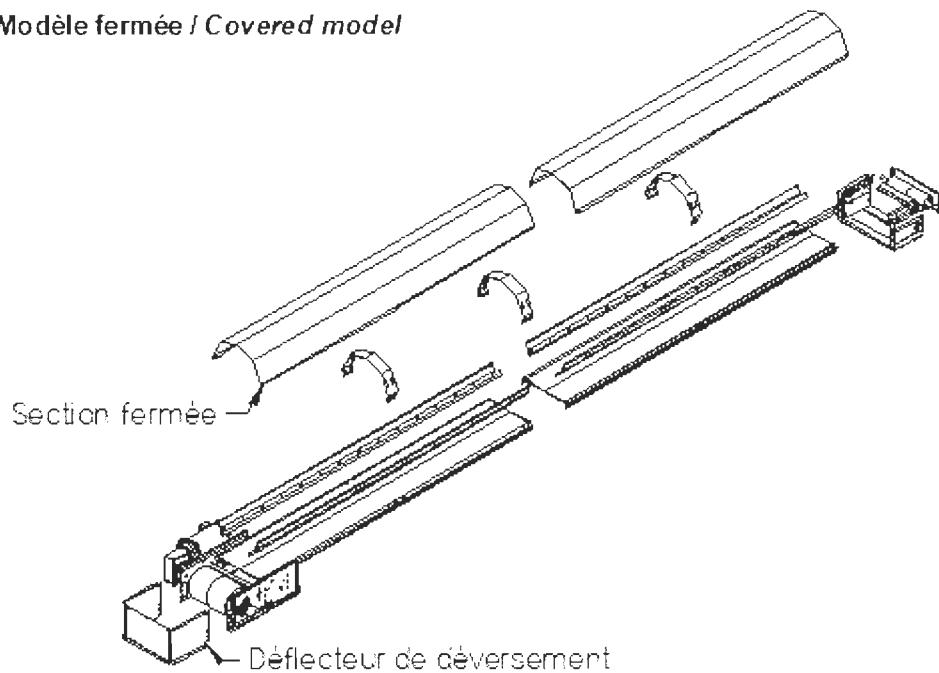
Modèle ouvert / Non covered model**Modèle fermée / Covered model**

Figure 4.7 Modules du convoyeur à courroie 18" LP

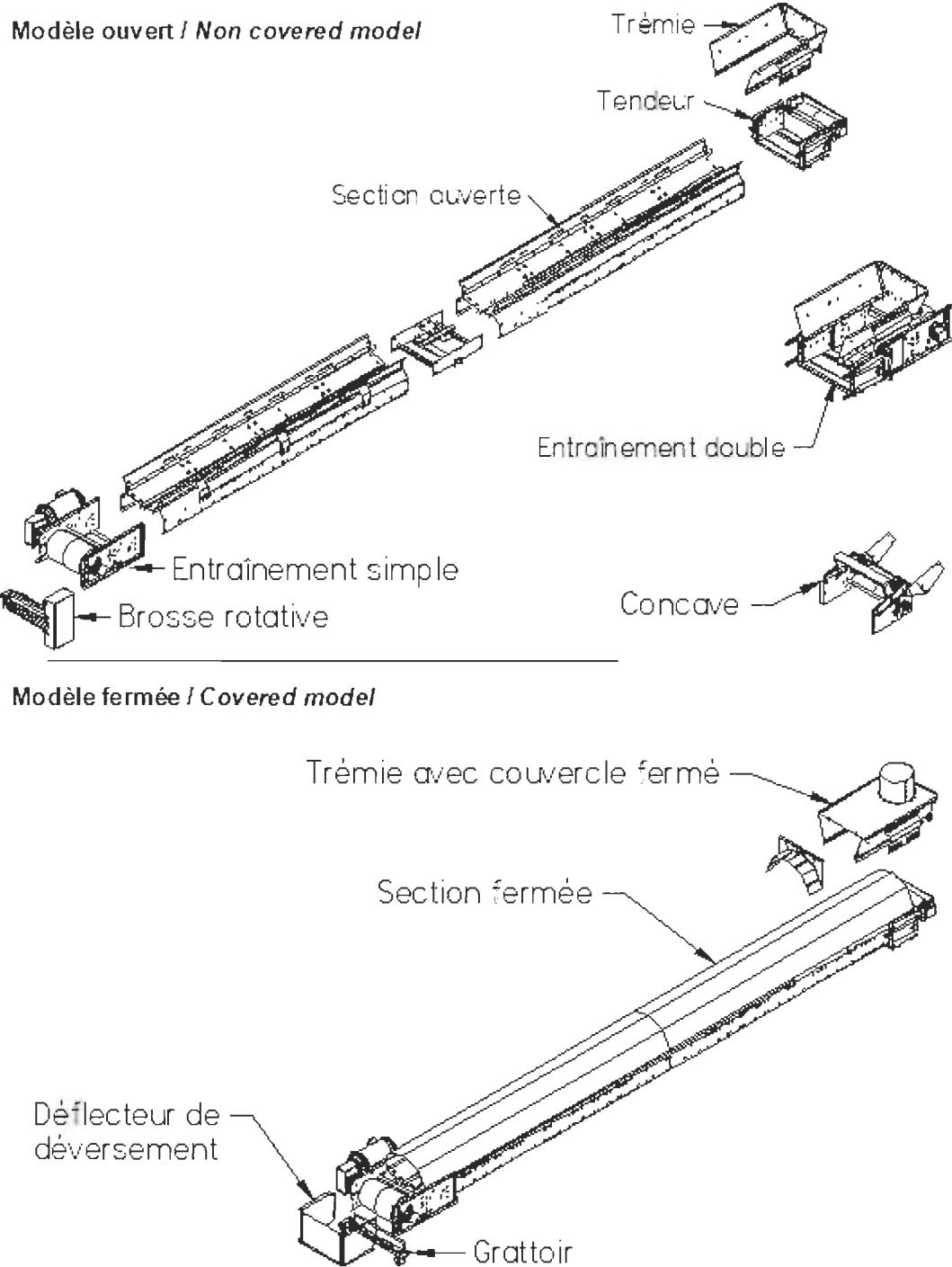


Figure 4.8 Modules du convoyeur à courroie 18"

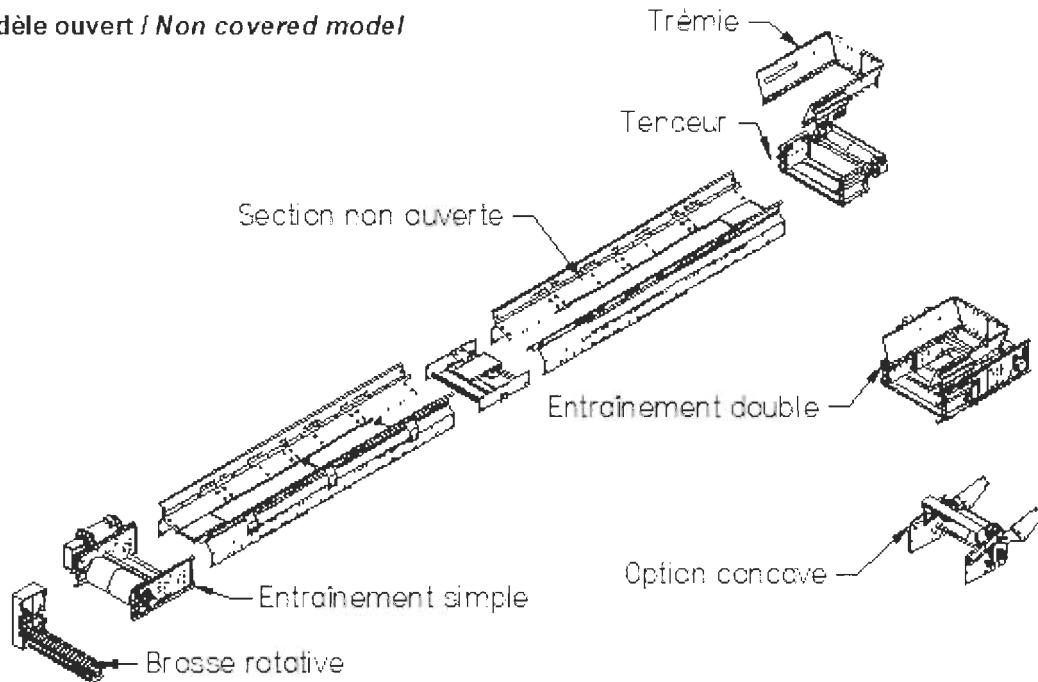
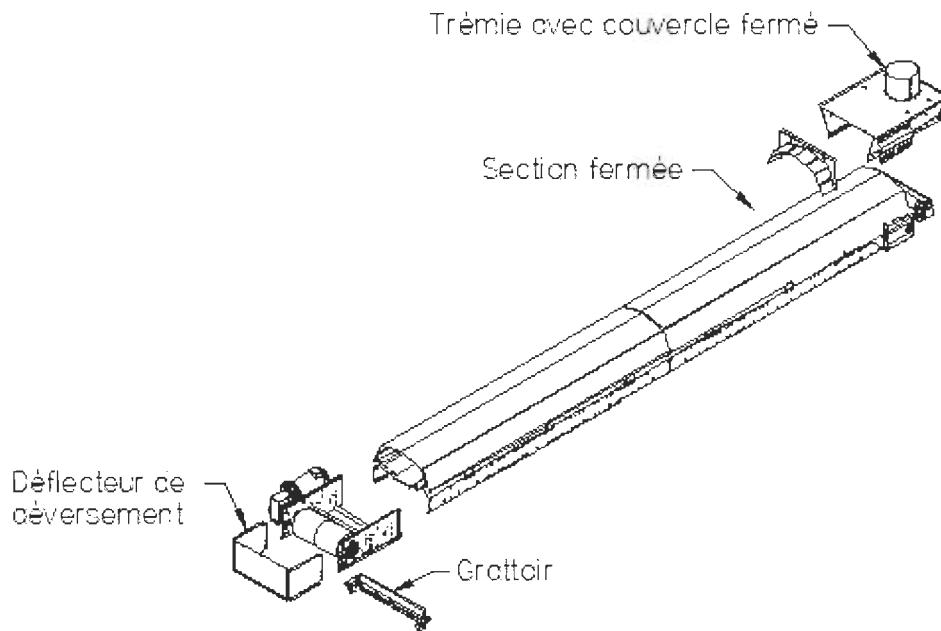
Modèle ouvert / Non covered model**Modèle fermée / Covered model**

Figure 4.9 Modules du convoyeur à courroie 24"

Le tableau 4.6 indique le détail des résultats de standardisation pour les convoyeurs à courroie.

Tableau 4.6 Standardisation des convoyeurs à courroie

Assemblage	Avant	Après	Pourcentage de réduction	Notes
Tête d'entraînement	6	2	67 %	Un seul modèle de tête, mais deux longueurs de tube (18"-24").
Tendeur	4	2	50 %	Un seul modèle de tête, mais deux longueurs de pattes (18"-24").
Section	20	4	80 %	10', 10' ajustable, 10' LP, 10' LP ajustable.
Jupe	4	2	50 %	10' ajustable.
Couvercle	4	2	50 %	10' ajustable.
Trémie	21	2	90 %	Bracket ajustable (18"-24"), longueur 48" et 36" ajustable à 27".
Brosse	4	2	50 %	Longueur de la brosse à 18"-24".
Grattoir	2	2	0 %	Longueur du caoutchouc à 18" et 24".
Total	60	18	70 %	

4.3.2. Convoyeur nourrisseur

Module 1. Charrue

Il y avait initialement sept modèles de charrues différents en fonction de la largeur du convoyeur (18", 24") et des spécificités recherchées par le client.

Dorénavant, il y a seulement deux modèles de charrues, soit une réduction de 71 % des composantes.

Module 2. Dalle de déversement

Il y avait initialement six modèles de dalles de déversement différents en fonction de la largeur du convoyeur (18", 24") et des spécificités de la charrue.

Dorénavant, il y a seulement deux modèles de dalles de déversement, soit une réduction de 66 % des composantes.

Module 3. Motorisation

En ce qui a trait à la motorisation, tous les types de moteur qui étaient initialement utilisés pourront encore l'être. La tête d'entraînement a été conçue pour recevoir, sur un seul modèle de tête, tous les mêmes moteurs qu'auparavant.

Module 4. Déviateur

Il y avait initialement six modèles de déviateurs différents en fonction de la largeur du convoyeur (18", 24") et des spécificités de l'entraînement.

Dorénavant, il y a seulement trois modèles de déviateurs, soit une réduction de 50 % des composantes.

Les figures 4.10, 4.11 et 4.12 illustrent les modules des convoyeurs à courroie comme il est possible de les apercevoir dans les manuels d'assemblage.

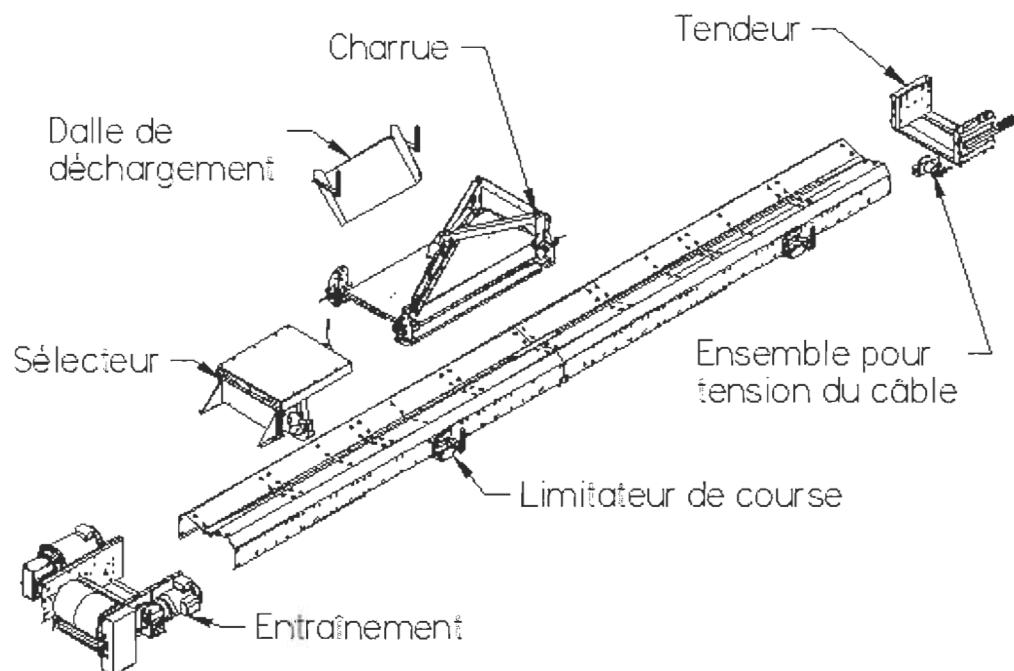


Figure 4.10 Modules du convoyeur nourrisseur 18"

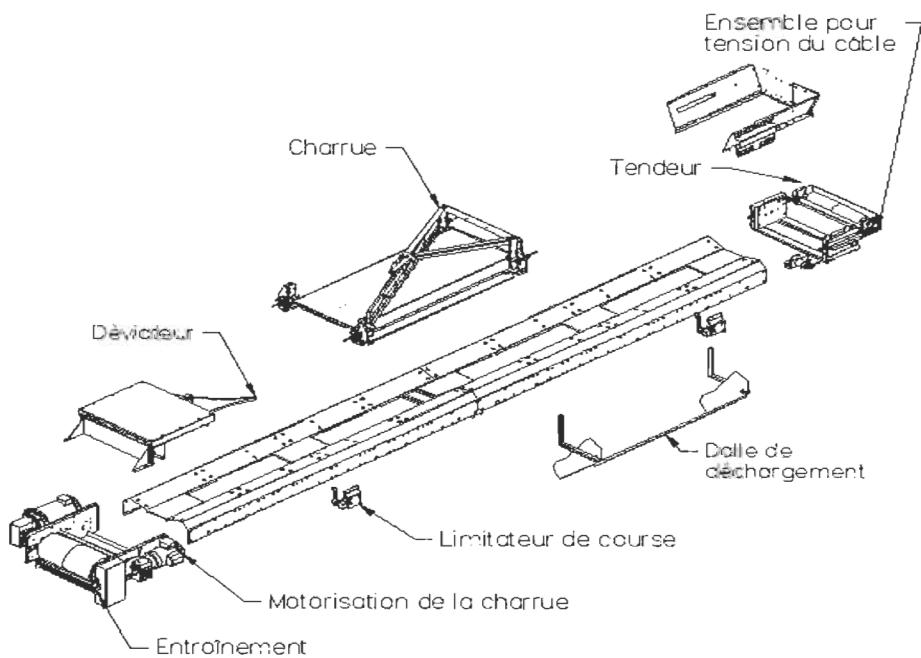


Figure 4.11 Modules du convoyeur nourrisseur 24"

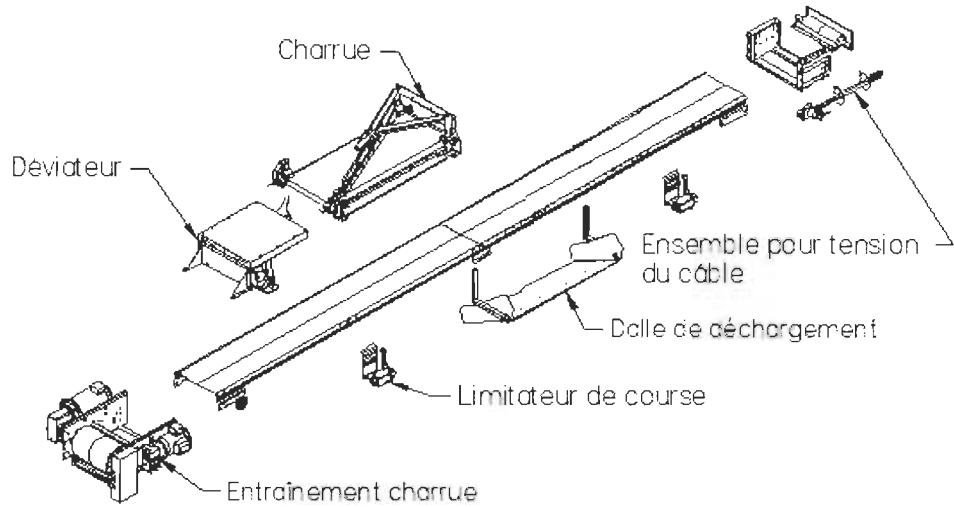


Figure 4.12 Modules du convoyeur nourrisseur 18" LP

Le tableau 4.7 indique le détail des résultats de standardisation pour les convoyeurs nourrisseurs.

Tableau 4.7 Standardisation des convoyeurs nourrisseurs

Assemblage	Avant	Après	Pourcentage de réduction	Note
Charrue	7	2	71 %	Un modèle à essayer chez un client pour confirmer.
Déviateur	6	3	50 %	Retiré de l'inventaire.
Dalle de déchargement	6	2	67 %	Une seule faisant à gauche et droite (18"-24").
Total	19	7	63 %	

Les structures modulaires ont permis de réduire de 70 % les composantes reliées aux convoyeurs à courroie et ont permis de réduire de 63 % les composantes reliées aux convoyeurs nourrisseurs.

4.4. Conclusion

L'augmentation de l'agilité d'une PME manufacturière québécoise dans le contexte de la 4^e révolution industrielle passe, entre autres, par l'adaptation du produit pour le rendre 4.0.

L'objectif de ce chapitre était de répondre à l'objectif secondaire n° 2 : « Rendre le produit 4.0 » en standardisant en structures modulaires par plateforme. Pour y arriver, il importe de bien connaître l'historique et les caractéristiques du produit, par l'entremise de collecte de données, d'analyse des données et d'étude de conception. À la suite de quoi, il est possible de réviser la conception, de réaliser de nouvelles conceptions puis d'évaluer les nouvelles structures. Lorsque les tests sont concluants, il est nécessaire de faire le suivi des modifications afin de mettre à jour les bons de commandes, les manuels d'assemblage et les listes d'expédition.

Dans ce cas-ci, le travail de standardisation des modules a permis de réduire de 70 % les composantes reliées aux convoyeurs à courroie et a permis de réduire de 63 % les composantes reliées aux convoyeurs nourrisseurs. Non seulement il est question de réduire le nombre de composantes, mais également de réduire par le fait même le niveau d'inventaire, le risque de non conformes, le temps d'assemblage des modules et ce, tout en augmentant la facilité d'assemblage.

Enfin, il y a actuellement une période de temps cruciale entre la commande client et l'expédition en usine. En ayant des modules standards déjà prêts ou assemblés en parallèle, il est possible de réduire le temps de réaction. Cela évite aussi de devoir faire de la recherche et du développement en cours de route, ce qui augmente les délais de livraison. Les modules standards permettent également de réduire le temps de réaction pour augmenter l'agilité de l'entreprise, rendant le produit prêt pour la réalité de l'industrie 4.0.

CHAPITRE 5 - RENDRE LE PROCÉDÉ DE PRODUCTION 4.0

5.1. Mise en contexte

L'augmentation de l'agilité d'une PME manufacturière québécoise dans le contexte de la 4^e révolution industrielle passe aussi par l'adaptation du procédé de production pour le rendre 4.0.

Afin d'améliorer le flux d'information et le flux physique d'une PME manufacturière, il est important d'implanter un logiciel ERP, d'utiliser une codification adaptée aux nouvelles structures modulaires, d'utiliser une méthode de gestion des stocks comme la méthode Kanban, par exemple, puis de mettre en place des cellules dynamiques afin de rendre le procédé de production 4.0. Un processus de production qui contient ces éléments aura, comme le démontre la revue de la littérature qui a été réalisée, une agilité supérieure et sera donc plus à même de répondre à une demande dynamique.

Bien que la nature du procédé de production dit « 4.0 » peut changer en fonction de la gamme de produits offerts et de la variation de la demande d'une entreprise à l'autre, il importe tout de même d'avoir un procédé permettant d'être agile et réactif à cette demande dynamique. Dans le cas qui nous intéresse, il est donc important de rendre le procédé de production 4.0 en tenant compte du contexte de l'entreprise.

5.2. Démarche pour obtenir un procédé de production 4.0

Afin de favoriser le flux physique linéaire et d'optimiser le flux d'information pour rendre le procédé de production 4.0, la mise en place de moyens d'application cadrant avec les besoins et le contexte de l'entreprise partenaire est nécessaire. La figure 5.1 démontre que le procédé de production doit être adapté aux besoins et à

la réalité de l'entreprise. Les moyens d'application mis en place permettent d'obtenir un procédé agile face à la demande dynamique.

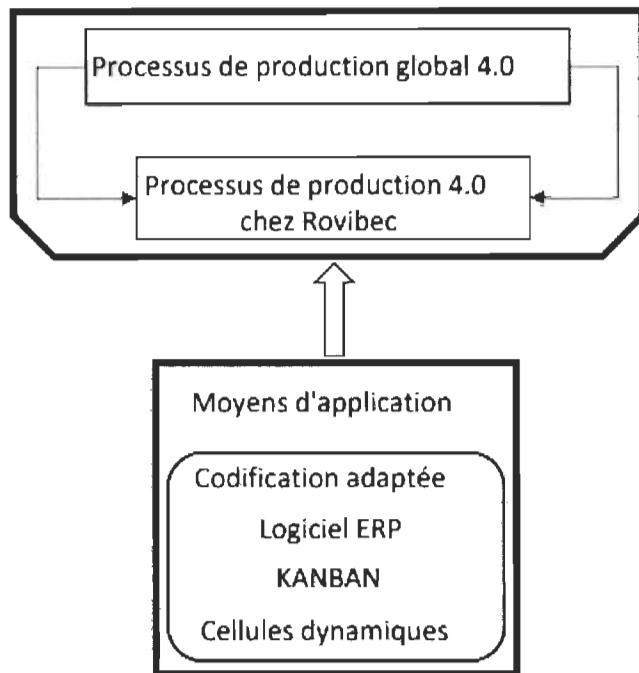


Figure 5.1 Démarche pour atteindre un procédé de production 4.0

5.2.1. Implantation d'un système ERP

5.2.1.1. Analyse de la situation initiale de l'entreprise

Aucun système ERP adapté au besoin n'est en place. La planification et l'ordonnancement de la production sont faits manuellement en général. La multiplication des fichiers Excel et des bases de données non connectés augmente les tâches à non-valeur ajoutée d'environ 40 %. Pour les fichiers Excel qui sont interconnectés, ceux-ci alourdissent le processus et augmentent les délais de traitement de l'information. Il y a aussi une augmentation du risque potentiel de faire une erreur de retranscription. Le système comptable n'est pas non plus intégré à un

système ERP adapté. Le système en place n'est pas adapté pour gérer des modules standards. Il importe donc de faire l'implantation d'un système qui peut supporter les structures modulaires.

5.2.1.2. Stratégie d'implantation déployée

L'auteur Gamache (2019) propose, pour accroître la performance numérique d'une entreprise, un plan numérique. Un des projets prioritaires dans ce plan est la restructuration de la nomenclature et la connectivité des systèmes. L'implantation d'un système ERP permet donc d'accroître la connectivité des systèmes. Une étude des différents systèmes ERP a été faite. À la suite de cette étude pour choisir un système étant le mieux adapté à la réalité et aux besoins de l'entreprise, Rovibec a arrêté son choix d'un logiciel ERP sur Orchestra de Concept Industriels. Le tableau 5.1 présente la raison du choix du logiciel et le tableau 5.2 explique le pointage.

Tableau 5.1 Choix du système ERP (Source : Rovibec)

Résultat d'évaluation des différents systèmes	Odoo	Espilia et Arima	Concepts industriels
Prérequis hardware	Bon	Faible	Excellent
CRM	Faible	Faible	Faible
Comptabilité	Excellent	Excellent	Excellent
Approvisionnement	Bon	Excellent	Excellent
Intégration des commandes	Passable	Bon	Excellent
Ordonnancement	Bon	Excellent	Excellent
Optimisation de la main-d'œuvre	Passable	Excellent	Bon
Planification	Bon	Excellent	Excellent
Gestion des assemblages multiniveaux	Faible	Bon	Excellent
Gestion des sous-traitants	Passable	Excellent	Excellent
Distribution	Passable	Excellent	Excellent
Coût du logiciel	N/A	Faible	Bon
Résultat	42 %	69 %	86 %

Tableau 5.2 Explication du pointage

Résultat	Pointage
Faible	0
Passable	1
Bon	2
Excellent	3

L'implantation est actuellement en cours et va bon train. Cependant, ce ne sont pas tous les modules qui sont actuellement intégrés au sein de l'entreprise. Les modules suivants seront mis en place prochainement :

- intégration de la planification et de l'ordonnancement en capacité finie;
- intégration de la commande client;
- intégration d'un module de prévision au niveau des ventes;
- intégration d'un module RH : dossier des employés, rapport CNESST;
- intégration d'un module de paie en lien avec les *punchs*;
- intégration d'un module de service : appel de service, suivi de maintenance;
- intégration d'un module R-D : déclaration des temps par projet;
- intégration d'une interface pour déclarer les ordres de fabrication en production;
- intégration d'un module des achats;
- intégration d'un module de maintenance prédictive;
- intégration d'un module de gestions des garanties.

Le tableau 5.3 a été réalisé par l'ingénierie industrielle responsable de l'implantation au sein de l'entreprise partenaire. Il décrit les étapes d'implantation du logiciel ERP. Certaines étapes sont sujettes à des changements en fonction de l'avancement de l'implantation et des potentielles embûches qui pourraient être rencontrées.

Tableau 5.3 Implantation ERP

Marches à suivre	Détails
Étape 1 Ménage des données	<ul style="list-style-type: none"> • Articles inactifs • Doublons • Non utilisés • Corrections • Standardisation des descriptions • Clients-fournisseurs-employés
Étape 2 Remplissage des <i>templates</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Fait en parallèle de l'étape 1 • Ménage se fait en fonction des <i>templates</i> • Transfert de données
Étape 3 Planification détaillée complète du projet	<ul style="list-style-type: none"> • Planification complète des étapes à venir • Planification réalisée avec l'intégrateur
Étape 4 Revue des processus	<ul style="list-style-type: none"> • Minimisation de la personnalisation • Amélioration des processus • Standardisation des processus
Étape 5 Formation	<ul style="list-style-type: none"> • Théorique global • Théorique précis par personne • Pratique
Étape 6 Utilisation partielle du logiciel	<ul style="list-style-type: none"> • Validation que tout fonctionne au niveau comptable • Révision du fonctionnement des processus
Étape 7 Migration complète	<ul style="list-style-type: none"> • Transfert complet
Étape 8 Suivi	<ul style="list-style-type: none"> • Support • Correctif • Ajustement

5.2.2. Mise en place d'une codification adaptée aux structures modulaires

5.2.2.1. Stratégie d'implantation déployée

Comme mentionné pour l'implantation d'un système ERP, la restructuration de la codification des modules est une partie nécessaire à réaliser afin d'accroître la performance numérique d'une entreprise. L'implantation d'un système permettant une plus grande connectivité force à revoir la codification, d'autant plus à la suite du

travail de standardisation en modules. La codification doit être adaptée aux modules standards.

Une nomenclature des composants fabriqués et des assemblages qui est adaptée aux structures modulaires permet de plus facilement comprendre et d'effectuer le suivi des structures en place. Il est aussi important de permettre une traçabilité avec la nomenclature des composants initialement en place. Pour ce faire, la méthode expliquée ci-dessous a été utilisée. La figure 5.2 illustre la codification en place.

A	B		C		D		E
XX	XX	-	XXXX	-	XX	-	X

Figure 5.2 Codification des structures modulaires

A : Équipement

CC : Convoyeur à courroie

CN : Convoyeur nourrisseur

CVLP : Convoyeur *low profil*

CS : Convoyeur soigneur (ancienne version du convoyeur nourrisseur)

B : Modèle (pièces ou assemblages communs à plusieurs modèles sur un équipement)

41 : standardisation du convoyeur 18"

51 : standardisation du convoyeur 24"

01 : standardisation en commun aux deux convoyeurs

C : Type de composant ou d'assemblage

1000 à 1999 : métal en feuille

2000 à 2999 : usinage

0000 à 0299 : assemblage majeur

0300 à 0499 : assemblage soudé

0500 à 0799 : assemblage mécanique

D : Révision du dessin

Une incrémentation à partir de 00 a lieu lorsqu'il y a révision des dessins.

E : Composants fabriqués à l'extérieur, transformés à l'interne par la suite

Les composants externes fabriqués en sous-traitance sont identifiés.

En se basant sur la nomenclature des pièces et des assemblages, il est possible de mettre en place une codification adaptée aux structures modulaires. Les tableaux 5.4 et 5.5 démontrent l'appartenance de chaque assemblage aux différents modules.

Tableau 5.4 Codification des convoyeurs à courroies

Pièces	Modules								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
CC41-0602_00	1	0	0	0	0	0	0	0	0
CC51-0602_00	1	0	0	0	0	0	0	0	0
CC01-1013_00	0	1	0	0	0	0	0	0	0
CC01-1014_00	0	1	0	0	0	0	0	0	0
CVLP009	0	1	0	0	0	0	0	0	0
CVLP-1000_00	0	1	0	0	0	0	0	0	0
CC01_0380_00	0	0	1	0	0	0	0	0	0
CC41-0333_00	0	0	0	1	0	0	0	0	0
CC51-0333_00	0	0	0	1	0	0	0	0	0
CC41-0343_00	0	0	0	1	0	0	0	0	0
CC51-0343_00	0	0	0	1	0	0	0	0	0

Tableau 5.4 Codification des convoyeurs à courroies (suite)

Pièces	Modules								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
CC41-0301_00	0	0	0	0	1	0	0	0	0
CC51-0301_00	0	0	0	0	1	0	0	0	0
CC41G410	0	0	0	0	0	1	0	0	0
CC51G410	0	0	0	0	0	1	0	0	0
CC41-0311_00	0	0	0	0	0	0	1	0	0
CC51-0311_00	0	0	0	0	0	0	1	0	0
CC41-0704_00	0	0	0	0	0	0	0	1	0
CC51-0704_00	0	0	0	0	0	0	0	1	0
CC41-0705_00	0	0	0	0	0	0	0	1	0
CC51-0705_00	0	0	0	0	0	0	0	1	0
CC41-0413_00	0	0	0	0	0	0	0	0	1
CC51-0413_00	0	0	0	0	0	0	0	0	1
CVLP-0413_00	0	0	0	0	0	0	0	0	1

Tableau 5.5 Codification des convoyeurs nourrisseurs

Pièces	Modules			
	1	2	3	4
CS41-0179_00	1	0	0	0
CS51-0179_00	1	0	0	0
CS41-0180_00	1	0	0	0
CS51-0180_00	1	0	0	0
CS41-0181_00	1	0	0	0
CS51-0181_00	1	0	0	0
CS41-0182_00	1	0	0	0
CS51-0182_00	1	0	0	0
CVLP-0400_00	1	0	0	0
CVLP-0401_00	1	0	0	0
CVLP-0402_00	1	0	0	0
CVLP-0403_00	1	0	0	0
CS41-0359_00	0	1	0	0
CS51-0359_00	0	1	0	0
CN4G430	0	0	1	0

Tableau 5.5 Codification des convoyeurs nourrisseurs (suite)

Pièces	Modules			
	1	2	3	4
CN4LPG430	0	0	1	0
CN5G530	0	0	1	0
CN4G435	0	0	1	0
CN4LPG435	0	0	1	0
CN5G535	0	0	1	0
CS40-0185_00	0	0	0	1
CS50-0185_00	0	0	0	1
CS40-0187_00	0	0	0	1
CS50-0187_00	0	0	0	1
CVLP-0348_00	0	0	0	1
CVLP-0351_00	0	0	0	1

Cette codification permet de reconnaître l'appartenance de chaque module et permet de maintenir une traçabilité avec la nomenclature initialement en place. Il est possible de conclure qu'aucun assemblage et/ou pièce n'appartient à des modules différents. Chaque module possède des structures modulaires propre à ses fonctions. Il est également possible de constater qu'il y a très peu d'assemblage pour chaque module et ce, dans l'optique de réduire au maximum la variabilité des pièces et d'être en mesure de les rendre standard.

5.2.3. Méthode Kanban

5.2.3.1. Analyse de la situation initiale de l'entreprise

La méthode de gestion des stocks en place est la méthode Kanban. Cette méthode permet aux employés de déclencher la production des pièces lorsque le niveau minimum est atteint au niveau du stockage tablette. Il y a donc toujours des pièces sur les tablettes pour faire l'assemblage des différents convoyeurs. La méthode

Kanban permet d'être agile car elle permet de répondre rapidement à la demande sans être dépendant de la production.

5.2.3.2. Stratégie d'implantation déployée

Dans le cadre de cette étude, les différents niveaux de Kanban ont été identifiés. Le niveau 1 représente un Kanban de matière première, soit une pièce simple. C'est le niveau qui est actuellement en place chez Rovibec. Il s'agit de lancer la commande des pièces lorsque le niveau minimum est atteint. Le niveau 2 représente un Kanban en sous-assemblage, soit un assemblé mécano-soudé de différentes pièces. Il s'agit de lancer la commande d'un sous-assemblage lorsque le niveau minimum est atteint. Le niveau 3 représente un Kanban en modules, soit l'assemblage des modules standardisés prêts à être expédiés chez le client. Enfin, le niveau 4 représente un Kanban d'un produit fini assemblé. Voici le type de Kanbans en fonction des différents niveaux. Le tableau 5.6 détaille le niveau des Kanbans.

Tableau 5.6 Niveau des Kanbans

Niveau	Type de Kanban
1	Matière première
2	Sous-assemblage
3	Module
4	Produit fini

Les niveaux 1 et 2 ont trait à la fabrication, tandis que les niveaux 3 et 4 ont trait à l'assemblage. En augmentant le niveau du type de Kanban utilisé, il est possible de réduire le temps de réaction à la suite d'une commande client. La réduction du temps de réaction permet d'accroître l'agilité d'une PME manufacturière. Cependant, le contexte de la personnalisation de masse engendre un produit fini qui est personnalisé aux besoins des clients. En ayant une grande variété d'agencement de

produits finis possible en raison de la personnalisation, ce n'est pas applicable de se rendre au niveau 4 et d'avoir des Kanbans de produit fini dans ce contexte. La figure 5.3 schématise le niveau des types de Kanban.

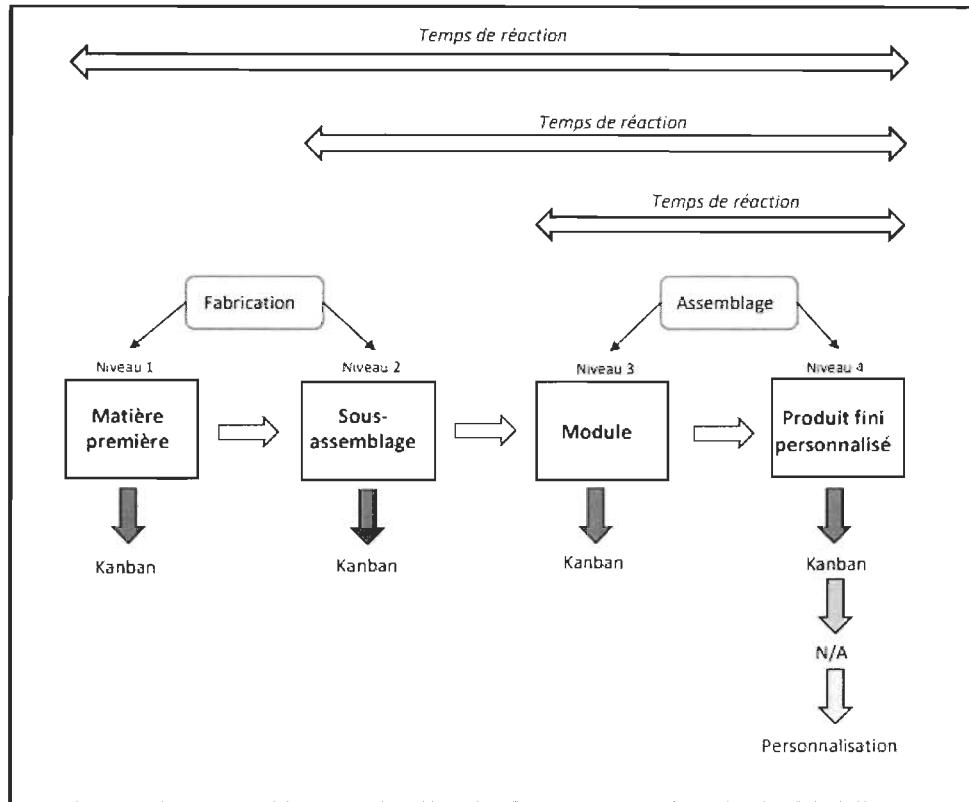


Figure 5.3 Niveau des types de Kanban

L'implantation du type de Kanban de niveau 3 est celle qui est privilégiée chez Rovibec. L'objectif de production étant d'être en mesure d'avoir deux semaines de modules stock d'avance en production, il importe de se rendre en régime permanent pour pouvoir travailler sur des commandes qui ne sont pas encore vendues. De cette manière, en ayant des modules déjà prêts à être envoyés, le temps de réaction est réduit au maximum et cela permet d'accroître l'agilité d'une PME.

Par ailleurs, en connaissant les prévisions des ventes, il est possible de prévoir la demande et ainsi déterminer le niveau d'inventaire optimal qu'on doit avoir pour répondre rapidement sans trop stocker. Les Kanbans du niveau 3 permettent également de réduire considérablement le temps de passage, comme on peut le voir au tableau 5.7.

Tableau 5.7 Réduction du temps de passage au niveau 3

Type de convoyeur	Temps de passage (h) : Kanban niveau 1	Temps de passage (h) : Kanban niveau 3	Pourcentage de réduction
Convoyeur à courroie	8,1	3,83	53 %
Convoyeur nourrisseur	5,5	1,75	68 %

En implantant les types du Kanban de niveau 3, il est possible de réduire de 53 % le temps de passage des convoyeurs à courroie et de 68 % le temps de passage des convoyeurs nourrisseurs. En réduisant le temps de passage et le nombre de pièces à manutentionner en raison de la réduction de l'inventaire des pièces, l'agilité d'une PME augmente de façon significative.

5.2.4. Mise en place de cellules dynamiques

5.2.4.1. Analyse de la situation initiale de l'entreprise

Sans nécessairement le savoir, des cellules de travail mobiles étaient déjà en place. L'analyse des flux de production et des diagrammes de préséance des convoyeurs, comme l'illustre sur les figures 5.4, 5.5, 5.6 et 5.7 et les tableaux 5.8 et 5.9, a permis de conclure qu'il s'agit d'une usine où il y a transformation de la matière première (découpe, pliage, usinage, soudure, peinture) déclenchée par des Kanbans, qui alimentent ensuite une zone d'assemblage en cellules de travail.

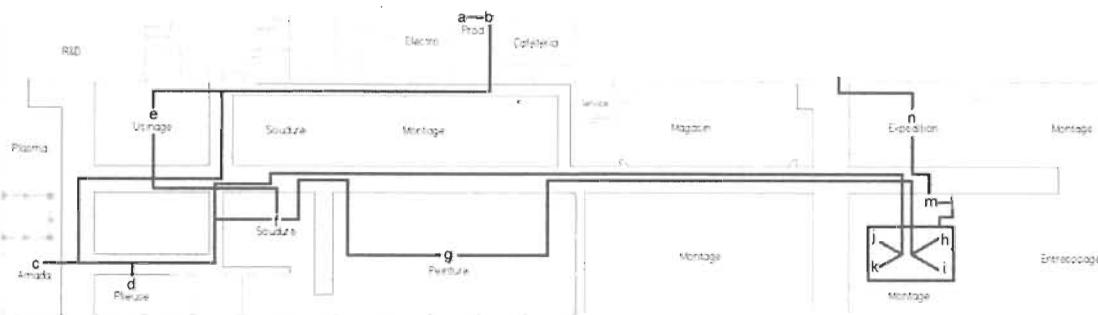


Figure 5.4 Diagramme du flux de production des convoyeurs à courroie

Tableau 5.8 Prédécesseurs des convoyeurs à courroie

Tâches	Activité	Temps (heure)	Prédécesseurs immédiats
a	Traitement de la commande	0,20	—
b	Lancement des pièces	0,08	a
c	Découpe	2,50	b
d	Pliage	2,00	c
e	Usinage	0,75	b
f	Soudure	2,08	d, e
g	Peinture	1,33	f
h	Assemblage de la tête d'entraînement	1,83	g
i	Assemblage du pied	0,50	g
j	Préassemblage des jupes	1,33	d
k	Préassemblage des trémies	0,17	d
l	Installation de la palette de transport	1,33	h, i, j, k
m	Inspection	1,25	l
n	Chargement de la palette	1,25	m

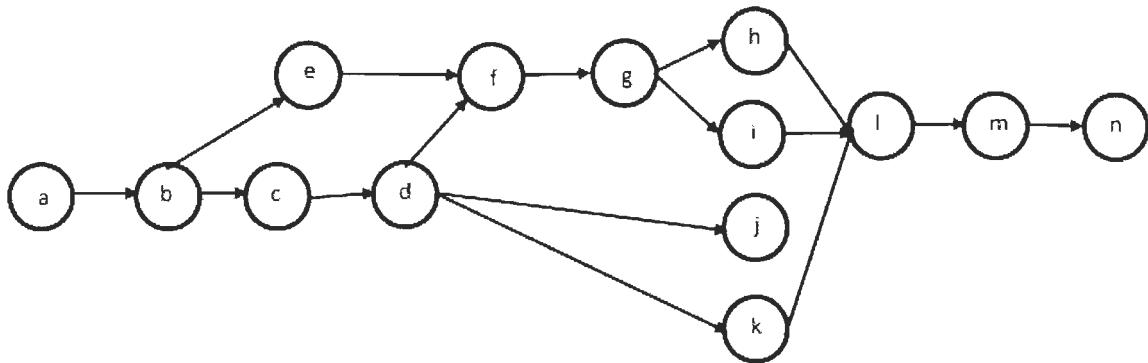


Figure 5.5 Diagramme de présence des convoyeurs à courroie

Il est possible de constater que les tâches H-I-J-K peuvent être faites en parallèle. Il s'agit des tâches d'assemblage. C'est donc à ce niveau que les cellules dynamiques peuvent être intéressantes.

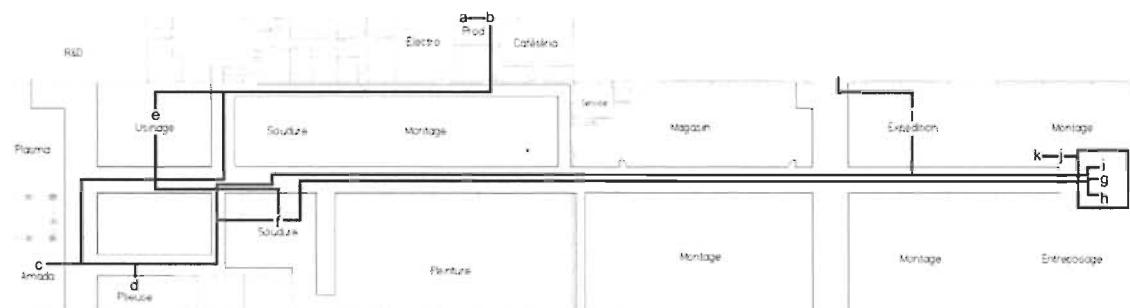


Figure 5.6 Diagramme du flux de production des convoyeurs nourrisseurs

Tableau 5.9 Prédécesseurs des convoyeurs nourrisseurs

Tâches	Activité	Temps (heure)	Prédécesseurs immédiats
a	Traitement de la commande	0,20	-
b	Lancement des pièces	0,08	a
c	Découpe	1,75	b
d	Pliage	1,25	c
e	Usinage	1,75	b
f	Soudure	1,25	d, e
g	Assemblage du chariot	2,50	f
h	Assemblage du déviateur	1,00	f
i	Préassemblage de la dalle de déversement	0,25	d
j	Installation de la palette de transport	0,67	g, h, i
k	Inspection	0,33	j
l	Chargement de la palette	0,75	k

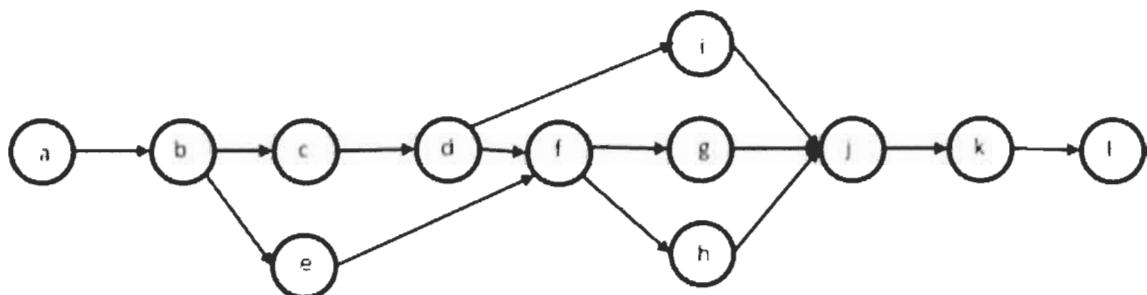


Figure 5.7 Diagramme de préséances des convoyeurs nourrisseurs

Au même titre que pour les convoyeurs à courroie, il est possible de constater que les tâches I-G-H peuvent être faites en parallèle. Il s'agit des tâches d'assemblage. C'est donc à ce niveau que les cellules dynamiques peuvent être intéressantes, pour l'assemblage des modules en parallèle.

5.2.4.2. Stratégie d'implantation déployée

En analysant les temps d'opération par modules pour chaque convoyeur, on constate que le poste de travail qui demande le plus de temps est l'assemblage (4,27 heures pour les convoyeurs à courroie et 3,75 heures pour les convoyeurs nourrisseurs). Par ailleurs, tel que mentionné plus haut, c'est également le secteur de travail qui réalise des tâches en parallèle, contrairement au reste des tâches qui sont faites en série. Les tableaux 5.10 et 5.11 présentent le détail des temps par secteur en fonction des modules.

Tableau 5.10 Temps d'opération par module des convoyeurs à courroie

Secteurs de travail	Temps total (h) : module 1	Temps total (h) : module 2	Temps total (h) : module 3	Temps total (h) : module 4	Temps total (h) : module 5	Temps total (h) : module 6	Temps total (h) : module 7	Temps total (h) : module 8	Temps total (h) : module 9	Temps total (h)
Traitement de la commande				0,2						0,28
Programmation des lots				0,08						
Découpe	0,56	0,08	0,05	0,24	0,08	0,13	0,09	–	0,07	
Pliage	0,27	0,07	0,03	0,37	0,17	0,22	0,20	–	0,12	
Usinage	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05	0,15	–	0,00	6,01
Soudure	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,08	–	0,00	
Peinture	0,53	0,00	0,00	0,00	0,00	0,08	0,37	–	0,00	
Assemblage	1,83	0,00	1,33	0,17	0,33	0,11	0,50	–	0,00	4,27
Installation de la palette de transport				1,33						
Inspection				1,25						3,83
Chargement de la palette				1,25						
Temps de passage (heures)	8,30	4,26	5,52	4,89	4,69	4,70	6,50	4,10	4,30	–

La somme du temps d'opération pour le secteur de l'assemblage pour les convoyeurs à courroie est de 4,27 heures. Par ailleurs, la somme du temps pour la préparation de la matière première est de 6,01 heures et pour la préparation à l'expédition est de 3,83 heures.

Tableau 5.11 Temps d'opération par module des convoyeurs nourrisseurs

Secteurs de travail	Temps total (h) : module 1	Temps total (h) : module 2	Temps total (h) : module 3	Temps total (h) : module 4	Temps total (h)
Traitement de la commande	0,2				0,28
Programmation des lots	0,08				
Découpe	0,75	0,10	–	0,31	
Pliage	0,79	0,05	–	0,20	
Usinage	0,30	0,47	–	0,40	4,99
Soudure	0,85	0,07	–	0,15	
Peinture	0,18	0,17	–	0,20	
Assemblage	2,50	0,25	–	1,00	3,75
Installation de la palette de transport			0,67		
Inspection			0,33		1,75
Chargement de la palette			0,75		
Temps de passage (heures)	7,40	3,14	2,03	4,29	–

La somme du temps d'opération pour le secteur de l'assemblage pour les convoyeurs nourrisseurs est de 3,75 heures. Par ailleurs, la somme du temps pour la préparation de la matière première est de 4,99 heures et pour la préparation à l'expédition est de 1,75 heures.

En s'attardant au secteur de l'assemblage, il a été question séparer les modules en fonction du pourcentage de vente des options comme on le voit dans les tableaux

5.12, 5.13, 5.14 et 5.15. Un premier poste tient compte des modules qui sont vendus 100 % du temps, puis un second tient compte du reste des modules.

Tableau 5.12 Temps d'assemblage par module des convoyeurs à courroie

Tâche	Durée (sec)	Pourcentage de vente
Module 1	6588	100 %
Module 2	0	100 %
Module 7	1800	100 %
Module 8	0	100 %

Tableau 5.13 Temps d'assemblage par module des convoyeurs à courroie

Tâche	Durée (sec)	Pourcentage de vente
Module 3	4788	94 %
Module 4	612	85 %
Module 5	1188	28 %
Module 6	396	23 %
Module 9	0	19 %

Tableau 5.14 Temps d'assemblage par module des convoyeurs nourrisseurs

Tâche	Durée (sec)	Pourcentage de vente
Module 1	9000	100 %
Module 3	0	100 %

Tableau 5.15 Temps d'assemblage par module des convoyeurs nourrisseurs

Tâche	Durée	Pourcentage de vente
Module 2	900	0,47
Module 4	3600	0,07

En ayant comme objectif de faire 250 convoyeurs par année et considérant qu'on désire consacrer la moitié du temps par semaine à l'assemblage de ceux-ci, soit 1000 heures par année, il est possible de connaître le temps de cycle qui provient du temps *takt*. Le temps de cycle est de 14 400 secondes par convoyeur, soit 4 heures.

$$\text{Temps consacré} = \frac{40 \text{ heures}}{1 \text{ semaine}} \times \frac{50 \text{ semaines de travail}}{1 \text{ an}} \times 0,5$$

$$\text{Temps consacré} = 1000 \text{ heures/an}$$

$$TC = \frac{1000 \text{ heures}}{1 \text{ an}} \times \frac{1 \text{ an}}{250 \text{ convoyeurs}} \times \frac{60 \text{ minutes}}{1 \text{ heure}} \times \frac{60 \text{ secondes}}{1 \text{ minute}}$$

$$TC = 14400 \text{ secondes/convoyeur}$$

Puisque les étapes d'assemblage peuvent être réalisées en parallèle, il n'y a pas de préséance pour l'assemblage des modules. En simulant la mise en production de chaque module en même temps et en tenant compte que deux postes sont disponibles en fonction du pourcentage de vente des modules, on obtient les résultats des tableaux 5.16 et 5.17 pour les convoyeurs à courroie. La mention « 1 » signifie que la tâche est effectuée à la station en question, et inversement avec la mention « 0 ».

Tableau 5.16 Simulation pour le poste #1 des convoyeurs à courroie ayant un pourcentage de vente de 100 %

	Station d'assemblage 1	Station d'assemblage 2
Coût	1	10
Module 1	1	0
Module 2	1	0
Module 7	1	0
Module 8	1	0
	8 388	0
Respect TC	<=	<=
	14 400	14 400

Tableau 5.17 Simulation pour le poste #2 des convoyeurs à courroie ayant un pourcentage de vente inférieur à 100 %

	Station d'assemblage 1	Station d'assemblage 2
Coût	1	10
Module 3	1	0
Module 4	1	0
Module 5	1	0
Module 6	1	0
Module 9	1	0
	6 984	0
Respect TC	<=	<=
	14 400	14 400

Il est donc possible de réaliser l'entièreté des modules, en respectant le temps de cycle, en ayant seulement une station par poste d'assemblage (poste #1 et poste #2), nécessitant la présence d'un employé à chaque station. En effet, la mention « 1 » signifie que la tâche est effectuée à la station en question, et inversement avec la mention « 0 ».

En simulant la commande de chaque module en même temps et en tenant compte que deux postes sont disponibles en fonction du pourcentage de vente des modules, on obtient les résultats des tableaux 5.18, 5.19 et 5.20 pour les convoyeurs nourrisseurs.

Tableau 5.18 Simulation pour le poste #1 des convoyeurs nourrisseurs ayant un pourcentage de vente de 100 %

-	Station d'assemblage 1	Station d'assemblage 2
Coût	1	10
Module 1	1	0
Module 3	1	0
	9 000	0
Respect TC	<=	<=
	14 400	14 400

Tableau 5.19 Simulation pour le poste #2 des convoyeurs nourrisseurs ayant un pourcentage de vente inférieur à 100 %

-	Station d'assemblage 1	Station d'assemblage 2
Coût	1	10
Module 2	1	0
Module 4	1	0
	4 500	0
Respect TC	<=	<=
	14 400	14 400

Tableau 5.20 Simulation d'un poste pour les convoyeurs nourrisseurs

-	Station d'assemblage 1	Station d'assemblage 2
Coût	1	10
Module 1	1	0
Module 2	1	0
Module 3	1	0
Module 4	1	0
	13 500	0
Respect TC	<=	<=
	14 400	14 400

Il est donc possible de réaliser l'entièreté des modules, en respectant le temps de cycle, en ayant seulement un poste avec une station, nécessitant la présence d'un employé seulement.

5.3. Conclusion

Le tableau 5.21 décrit l'avancement des différents moyens d'application pour accroître l'agilité au sein de l'entreprise entre la situation initiale et la situation actuelle.

Tableau 5.21 Niveau des moyens d'application

Procédé de production 4.0		
Moyens d'application	Situation initiale	Situation actuelle
Codification adaptée	Pas adaptée	En place
Logiciel ERP	Inexistant	En cours d'implantation
Kanban	Niveau 1	Niveau 3
Cellules dynamiques	Assemblage en série	Assemblage en parallèle

L'implantation terrain du projet lié à ce mémoire a permis de constater que certains moyens d'application d'un procédé 4.0 avaient été mis en place avant même que le produit soit 4.0. **Il est donc possible de travailler le produit et le procédé en parallèle afin d'accélérer l'implantation du 4.0 dans une PME manufacturière.** En effet, la méthode de gestion des stocks Kanban peut être intégrée à la production sans nécessairement avoir des structures modulaires standards. Les Kanbans de niveau 3 (modules) permettent d'avoir un procédé de production agile permettant de mieux faire face aux exigences du 4.0. Enfin, le modèle de production de cette entreprise se prêtait déjà à des cellules dynamiques.

L'objectif de ce chapitre était de répondre à l'objectif secondaire n° 3 : « Rendre le procédé de production 4.0 » en favorisant le flux physique linéaire et le flux d'information. Pour y arriver, il faut mettre en place une codification adaptée aux structures modulaires préalablement faites en conception. À la suite de quoi, il est possible réviser la méthode de gestion des stocks utilisés et de mettre en place des cellules de travail dynamiques. En parallèle de ces étapes, il est également possible de faire l'implantation d'un système ERP.

Dans ce cas-ci, le travail de codification des modules standards a permis de faciliter la traçabilité et le suivi des modules. Le travail d'implantation d'un système ERP permettra de réaliser les tâches de planification en capacité finie. L'implantation de Kanbans de niveau 3 permet de réduire significativement le temps de passage. Puis, le travail d'implantation des cellules dynamiques a permis de réaliser les tâches d'assemblage sur un seul poste de travail.

L'amélioration du flux physique linéaire autant que le flux d'information au niveau de la production permet d'augmenter l'agilité de l'entreprise, la rendant ainsi plus prêt pour la réalité de l'industrie 4.0.

CHAPITRE 6 - ADAPTER LE MODÈLE D'AFFAIRES AU 4.0

6.1. Mise en contexte

L'augmentation de l'agilité d'une PME manufacturière québécoise dans le contexte de la 4^e révolution industrielle passe enfin par l'adaptation du processus de vente jusqu'au service après-vente pour le rendre 4.0.

Dans le cadre de cette recherche, le modèle d'affaires est décrit comme étant ce qui a trait à la vente et au service après-vente. Pour être en mesure d'adapter un modèle d'affaires au 4.0, cela passe entre autres par le développement d'un modèle marketing axé sur la vente par catalogue en ligne, l'usage de capteurs permettant la maintenance prédictive et le suivi accru du service après-vente.

Dans leurs travaux, Bourezza et Mousrij (2021) mettent l'accent sur l'importance de non seulement avoir un système de maintenance en place afin de contrôler les outils de production en place, mais également de pouvoir générer des informations permettant la détection des pannes pour agir en temps réel. L'accès aux informations de contrôle en milieu industriel est un atout essentiel pour améliorer le service et la maintenance des équipements.

Pour ce qui est du marketing axé sur la vente par catalogue en ligne, il permet de voir venir les opportunités d'affaires et ainsi être plus réactif face à la demande et face à la concurrence.

6.2. Démarche pour adapter le modèle d'affaires au 4.0

Pour adapter un modèle d'affaires au 4.0, il faut chercher à augmenter l'agilité et l'interconnectivité du service de vente et du service après-vente, comme l'illustre la figure 6.1. La vente en ligne mise en place par le biais du e-commerce et la maintenance prédictive mise en place par le biais de capteurs ajoutés sur les modules permettent de réduire significativement le temps de réaction, autant au niveau de la production qu'au niveau du suivi après l'installation chez le client.

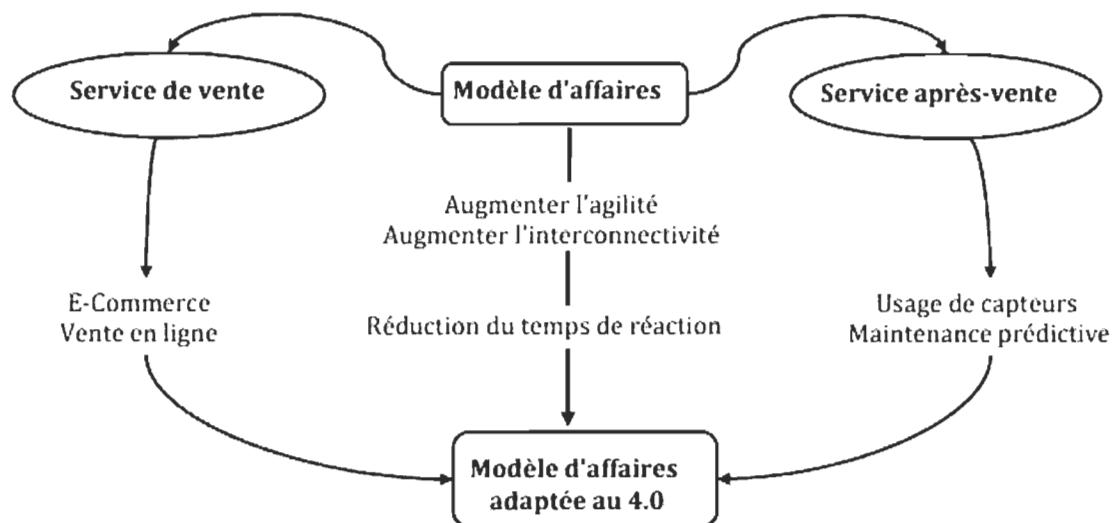


Figure 6.1 Démarche pour adapter le modèle d'affaires au 4.0

6.2.1. Modèle de marketing adapté

6.2.1.1. Analyse de la situation initiale de l'entreprise

Les commandes sont passées à l'aide d'un fichier Excel qui est envoyé directement au client via un concessionnaire. Certains clients remplissent le bon de commande de façon manuelle sur papier tandis que d'autres le font directement sur le fichier

via un ordinateur. Une fois le bon de commande dûment rempli, celui-ci est acheminé au bureau de logistique chez Rovibec pour traitement. Lorsque les bons de commande sont remplis manuellement, la personne responsable de l'intégration doit retranscrire la commande dans son fichier, ce qui occasionne un travail à valeur non ajoutée et ce qui augmente le risque d'erreur humaine. Lorsque les bons de commande sont remplis directement sur le fichier via un ordinateur, la personne responsable de l'intégration vérifie la commande puis la traite.

Aussi, des mises à jour du bon de commande sont faites environ deux fois par année, avec des ajouts de produits, des modifications de produits ou des produits qui sont supprimés. Lors des mises à jour, la nouvelle version est acheminée aux concessionnaires qui la retransmettent aux clients. Une des sources de non conformes réside dans la mauvaise gestion des bons de commande à jour et des différentes versions qui circulent entre les clients.

6.2.1.2. Stratégie d'implantation déployée

Il a fallu adapter le bon de commande initial en fonction des modules. Ce travail a permis de simplifier significativement les bons de commande. Il est possible de voir sur les figures 6.2, 6.3 et 6.4 un exemple du bon de commande adapté pour les convoyeurs à courroie 24".

**24 BELT CONVEYOR - CONVOYEUR**

Son de commande
Order Form
Fax : +1 819 293 6070

CANADA - USA

Détail de l'équipement :			
Concessionnaire :			
Client :			
Adresse, ville, code postal :			
Téléphone du client :			
Langue du manuel d'opérateur :	Français		
# Commande Concessionnaire :			
#Pièce	Description	Quantité	Prix de détail
Total (CAD)			

MÉCANISME D'ENTRAÎNEMENT				
LE MÉCANISME D'ENTRAÎNEMENT AJOUTE 2' (0.6 M) DE LONG AU CONVOYEUR				
- TÊTE D'ENTRAÎNEMENT = 14" (356 MM)				
- BASE = 10" (254 MM)				
INCLUANT: - TÊTE D'ENTRAÎNEMENT, BASE ET TRÉMIE STANDARD				
- 1 ATTACHE MÉCANIQUE EN ACIER POUR COURROIE				
- 1 TRÉMIE 36" POUR ENTRAÎNEMENT DOUBLE SÉRIE BD - GROS ROULEAU				
NOTE: LONGUEUR HORS TOUT DU CONVOYEUR = NOMBRE DE SECTION + ANGLES + MÉCANISME D'ENTRAÎNEMENT				
NOTE: TOUTES LES SECTIONS DE CONVOYEUR SONT LIVRÉES EN ACIER GALVANISÉ				
CC51-0704_00	MECANISME D'ENTRAINEMENT SIMPLE SERIE BD - GROS ROULEAU ***RECOMMANDÉ POUR LONGUEUR DE CONVOYEUR 50' (15,2 M) À 199' (60,7 M)*** ***MOTEUR 3 HP OU 5 HP NON-INCLUS***			
CC51-0705_00	MECANISME D'ENTRAINEMENT DOUBLE SERIE BD - GROS ROULEAU ***RECOMMANDÉ POUR LONGUEUR DE CONVOYEUR 200' (61 M) À 300' (91 M) MAX*** ***MOTEUR 3 HP OU 5 HP NON-INCLUS***			

SECTIONS DE CONVOYEUR EN ACIER GALVANISÉ				
***UNE SECTION INCLUS 2 CÔTÉS				
CC51-0411_00	SECTION 10 PI AJUSTABLE (3 M) VENDUE EN PAIRE			
CC51-0410_00	SECTION 10 PI (3 M) VENDUE EN PAIRE			

Figure 6.2 Bon de commande des convoyeurs à courroie 24"

**24 BELT CONVEYOR - CONVOYEUR**

Bon de commande
Order Form
Fax +1 819 293 6070

CANADA - USA

MOTEUR ÉLECTRIQUE

SI VOUS COMMANDEZ UN MÉCANISME D'ENTRAÎNEMENT DOUBLE, VOUS DEVEZ COMMANDER 2 MOTEURS

LA PUISSEANCE DU MOTEUR SUGGÉRÉE EST VALIDE POUR UN CONVOYEUR :

A) AYANT UNE PENTE INFÉRIEURE À 10% (1:10)

B) OPÉRANT À UNE TEMPÉRATURE AMBIANTE DE 5°C (41°F) OU PLUS (INTÉRIEUR)

AUGMENTEZ LA PUISSEANCE DU MOTEUR SI LA PENTE EST SUPÉRIEURE À 10% OU SI LA TEMPÉRATURE AMBIANTE PEUT DESCENDRE SOUS 5°C (41°F) (EXTÉRIEUR)

MOTEUR 240 VOLT 60 HZ - SÉRIE 60

QA024	MOTEUR 3 HP,U.1-1/8 (C FLANGE SEUL, PAS DE BASE) ***LONGUEUR DE CONVOYEUR MAXIMUM (USAGE INTÉRIEUR): 150' (45.7 M)*** ***LONGUEUR DE CONVOYEUR MAXIMUM (USAGE EXTÉRIEUR): 75' (22.9 M)***				
QA025	MOTEUR 5 HP,U.1-1/8,FR.184TC,C-FLANGE ***LONGUEUR DE CONVOYEUR MAXIMUM (USAGE INTÉRIEUR): 250' (76.2 M)*** ***LONGUEUR DE CONVOYEUR MAXIMUM (USAGE EXTÉRIEUR): 150' (45.7 M)***				

MOTEUR 600 VOLT 60 HZ - SÉRIE 80

QA025	MOTEUR 3 HP 600 VOLT 1800 RPM FR 182 ***LONGUEUR DE CONVOYEUR MAXIMUM (USAGE INTÉRIEUR): 150' (45.7 M)*** ***LONGUEUR DE CONVOYEUR MAXIMUM (USAGE EXTÉRIEUR): 75' (22.9 M)***				
QA0136	MOTEUR 5 HP, U.1 1/8, FR.182T 600V C FL. ***LONGUEUR DE CONVOYEUR MAXIMUM (USAGE INTÉRIEUR): 250' (76.2 M)*** ***LONGUEUR DE CONVOYEUR MAXIMUM (USAGE EXTÉRIEUR): 150' (45.7 M)***				

JUPES POUR SECTION OUVERTE

CC51-0412_00	JUPE 10 PI (3 M) AJUSTABLE POUR SECTION OUVRETE (PAIRE) *VENDEE EN PAIRE AVEC SUPPORTS ET BOULONS	→ 10' (3 M) AJUSTABLE → CC01-0380_00			
--------------	--	---	--	--	--

Figure 6.3 Bon de commande des convoyeurs à courroie 24" (suite)

**24 BELT CONVEYOR - CONVOYEUR**

Bon de commande
Order Form
Fax. +1 819 293 8070

CANADA - USA

ENSEMBLE DE COUVERCLE POUR SECTION FERMÉE	
	-> 10' (3 M) AJUSTABLE -> CCS1-1003_00
CCS1-0413_00	ENSEMBLE DE COUVERCLE DE 10 PI (3 M) AJUSTABLE *VENDU AVEC SUPPORTS ET BOULONS
TRÉMIES	
	-> CCS1-0333_00
	-> CCS1-0343_00
CCS1-0333_00	TREMIE STANDARD 27 PO (685.8 MM) - 36 PO (914.4 MM) AJUSTABLE
CCS1-0343_00	TREMIE ALLONGÉE 48 PO (1219 MM) AVEC FIXATIONS
OPTIONS À INSTALLER SUR LA TÊTE D'ENTRAÎNEMENT	
	-> CCS1-0482_00
	-> CCS1-0301_00
	-> CCS1G410
CCS1-0482_00	DEFLECTEUR DE SORTIE ASSEMBLÉ
CCS1-0301_00	GRATTOIR POUR COURROIE LISSE
CCS1G410	BROSSE ROTATIVE
OPTIONS	
NDO1152	HOUILE SYNTHÉTIQUE SH 320 EN CONTENANT DE 4 LITRES
GARANTIE PROLONGÉE	
PRIX NET	
GAR02-CONV	GARANTIE PIÈCES ET MAIN D'OEUVRE 2 ANS - CONV. **EXCLUANT LES PIÈCES D'USURE DONT LES BATTERIES

Figure 6.4 Bon de commande des convoyeurs à courroie 24" (suite)

Puis, avec l'implantation d'un logiciel ERP adapté, il est possible de se diriger vers un bon de commande en ligne. Le e-commerce permet de réduire le temps de réaction en permettant de réagir en temps réel. Lorsque le client enregistre sa commande, celle-ci est immédiatement acheminée au bureau de la logistique pour être ordonnancée et être placée en production. Aussi, en ayant des modules standards et accès à un visuel en trois dimensions des composantes, il est possible pour le client de visualiser sa commande et de la créer directement sur internet.

Par ailleurs, avec les plateformes de service de visioconférence, il est possible de compléter la commande et d'offrir une assistance technique à distance avec l'équipe des ventes ou l'équipe d'ingénierie au besoin.

Avec le e-commerce, il est également possible de rendre disponible en temps réel les versions à jour des produits. Une seule version est donc disponible à la fois pour les clients et les concessionnaires. Également, la vente en ligne permet de savoir lorsqu'un potentiel client magasine sur le site. En ajoutant l'option de clavardage directement en ligne, cela augmente la proximité entre l'acheteur et le vendeur et cela permet un meilleur service client. Cela permet aussi de voir venir les opportunités d'affaires en suivant en temps réel les potentiels clients.

6.2.2. Maintenance prédictive

6.2.2.1. Analyse de la situation initiale de l'entreprise

Actuellement, aucune maintenance prédictive n'est réalisée sur les équipements une fois qu'ils sont installés chez le client. Il faut donc garantir un service après-vente et des techniciens disponibles pour les clients lors de bris mécaniques ou de pannes. En ayant des clients autant en Amérique du Nord, en Europe et qu'au Japon, cela force l'entreprise à réagir vite lorsqu'un problème survient. Cependant, il n'est pas

toujours possible de déployer des techniciens rapidement. L'équipe de service doit donc toujours être à l'affût d'un problème qui pourrait survenir.

Par ailleurs, lors d'une panne ou un bris, différentes demandes provenant du département de service viennent modifier la planification de la production pour palier un besoin urgent chez un client.

6.2.2.2. Stratégie d'implantation déployée

Afin de pouvoir réagir avant que le bris mécanique n'apparaisse, l'utilisation de capteurs intégrés aux modules est primordiale. Pour permettre la maintenance prédictive des différents appareils une fois l'installation chez le client terminée, il faut être en mesure d'avoir accès aux données des modules en temps réel.

En se basant sur les travaux de Cimini et al. (2021), il est possible de constater que Rovibec est une entreprise avec une stratégie de servicisation « innovatrice » qui cherche à accroître la capacité de ses produits et à offrir conjointement le service qui va avec. Comme il est possible de le voir sur le tableau AII.1, l'entreprise tente de mettre en place une stratégie « solutionniste » en optimisant la capacité des produits et en vendant une solution complète à un besoin.

Pour se diriger vers une stratégie davantage axée sur la maintenance prédictive monitorée par des données, il faut être en mesure de cibler les paramètres critiques à étudier. La méthode d'analyse des modes de défaillances, de leurs effets et de leur criticité (AMDEC) permet d'analyser les possibles défaillances, leurs causes et leurs effets sur le mécanisme, comme l'indique la figure 6.5. L'AMDEC permet d'opérationnaliser le service après-vente de maintenance prédictive offert avec le produit. En sachant de quelles manières les fonctions des convoyeurs peuvent être altérées, il est plus facile de savoir quels paramètres il faut surveiller. Aussi, il est

plus facile de tenir compte des perspectives d'avenir du produit en ayant un plan clairement défini quant à la maintenance qui doit être faite et à quelle fréquence elle doit être réalisée.

Une AMDEC a été réalisée pour les convoyeurs à courroie et pour les convoyeurs nourrisseurs en fonction des différents modules qui comportent des équipements nécessitant une analyse. On y retrouve les modules qui sont concernés par l'analyse, l'équipement dont il est question et la fonction réalisée par l'équipement. On y trouve aussi le mode de défaillance, les conséquences engendrées et le moyen de détection. Enfin, on y voit dans les tableaux 6.1 et 6.2 le calcul de criticité, si cela est satisfaisant ou non, et des recommandations à mettre en place. Le calcul de criticité est réalisé de la manière suivante :

Criticité (C)

Gravité (G) : 0 à 10

Fréquence (F) : 0 à 10

Probabilité de non-détection (D) : 0 à 10

$$C = G \times F$$

F	Fréquence	G	Gravité	D	Probabilité de non-détection
10	Permanent	10	Mort d'homme	10	Aucune détection possible
5	Fréquent	5	Conséquences financières et/ou matérielles	5	Système de détection en place, mais pas infaillible
1	Invraisemblable	1	Pas grave	1	Système de détection infaillible

Figure 6.5 Critères d'évaluation de la criticité pour les valeurs extrêmes et centrales

Tableau 6.1 AMDEC pour les convoyeurs à courroie

Module	Équipement	Fonction	Mode de défaillance	Conséquence	Moyen de détection	Calcul de criticité				Satisfait ou non	Recommandation
						G	F	D	C		
1	Rouleau	Transmission du mouvement à la courroie.	Fonctionnement dégradé. Défaillance en fonctionnement.	Arrêt de la courroie.	Usure	2	1	3	6	Indésirable	Ajout de capteurs pour vérifier les paramètres critiques (quantité de tours, température).
7	Rouleau	Transmission du mouvement à la courroie.	Fonctionnement dégradé. Défaillance en fonctionnement.	Arrêt de la courroie.	Usure	2	1	3	6	Indésirable	Ajout de capteurs pour vérifier les paramètres critiques (quantité de tours, température).
8	Réducteur	Réduire la vitesse du moteur. Augmenter le couple.	Fonctionnement dégradé. Défaillance en fonctionnement.	Arrêt de fonctionnement de la machine.	Fuite	2	2	3	12	Inacceptable	Ajout de capteurs pour vérifier les paramètres critiques (vibration, température, niveau d'huile).
8	Moteur électrique	Transformer l'énergie électrique en énergie mécanique. Engendrer la rotation du rouleau.	Fonctionnement dégradé. Défaillance en fonctionnement.	Arrêt de fonctionnement de la machine.	Fuite	2	2	3	12	Inacceptable	Ajout de capteurs pour vérifier les paramètres critiques (vibration, température, niveau d'huile).

Tableau 6.2 AMDEC pour les convoyeurs nourrisseurs

Module	Équipement	Fonction	Mode de défaillance	Conséquence	Moyen de détection	Calcul de criticité				Satisfait ou non	Recommandation
						G	F	D	C		
3	Réducteur	Réduire la vitesse du moteur. Augmenter le couple.	Fonctionnement dégradé. Défaillance en fonctionnement.	Arrêt de fonctionnement de la machine.	Fuite	2	2	3	12	Inacceptable	Ajout de capteurs pour vérifier les paramètres critiques (vibration, température, niveau d'huile).
3	Moteur	Transformer l'énergie électrique en énergie mécanique. Engendrer la rotation du rouleau.	Fonctionnement dégradé. Défaillance en fonctionnement.	Arrêt de fonctionnement de la machine.	Fuite	2	2	3	12	Inacceptable	Ajout de capteurs pour vérifier les paramètres critiques (vibration, température, niveau d'huile).

L'intégration de capteurs permettra d'effectuer la lecture des données comme la vibration, la température, le niveau d'huile, la quantité de tours des différents équipements. En ciblant les valeurs critiques des composantes assujetties à de la maintenance, il est possible d'envoyer un technicien sur place pour effectuer l'entretien des équipements avant même l'apparition d'une panne ou d'un bris tout en évitant des entretiens préventifs qui n'auraient pas été nécessaires. Une seule équipe pourra faire à la fois l'installation, mais aussi la maintenance.

Ces capteurs permettent non seulement l'acquisition de données en temps réel pour réduire considérablement le temps de réaction lors d'un bris ou d'une panne mais également d'accroître la performance des équipements en étant conscient des paramètres d'utilisation sur le terrain. En déployant une équipe de maintenance en amont des potentiels bris, il est possible de garantir un service après-vente de qualité et de mieux prévoir la répartition des techniciens au travers le monde. Par ailleurs, il est possible d'inclure ce service au moment de la vente.

Enfin, les pièces de service qui doivent être envoyées lors de la maintenance peuvent être gérées à part de la production, directement avec les fournisseurs. Cette façon de faire permet de réduire les imprévus au niveau de la production en raison des demandes de services.

6.2.3. Conclusion

Pour adapter le modèle d'affaires au 4.0, cela passe nécessairement par une révision du processus du service client, autant au niveau de la vente, qu'au niveau du suivi après la vente. L'objectif de ce chapitre était de répondre à l'objectif secondaire n° 4 : « adapter le modèle d'affaires au 4.0 » en améliorant la vente et le service après-vente. Pour y arriver, il faut développer un modèle de e-commerce et prioriser la maintenance prédictive.

Dans ce cas-ci, la transition des bons de commande via un fichier Excel vers une commande directement en ligne permet de réduire considérablement le temps de réaction et voir venir les opportunités d'affaires. L'intégration de capteurs sur les modules permet également de réduire le temps de réaction lors d'un bris et d'accroître le service offert.

L'amélioration du service de vente et du service après-vente permet de réduire le temps de réaction et d'augmenter l'agilité de l'entreprise, la rendant ainsi plus compétitive dans un environnement 4.0.

CHAPITRE 7 - CONCLUSION

7.1. Difficultés rencontrées

Au cours de cette étude, bon nombre de difficultés ont été rencontrées. Certaines de ces difficultés provenaient du domaine technique et d'autres du domaine humain.

7.1.1. Rendre le produit 4.0

D'un point de vue technique, la partie design des structures fût plutôt complexe. La grande quantité de pièces et d'assemblage répertoriés pour chaque type de convoyeur a compliqué la tâche. Afin de pouvoir répondre aux demandes grandissantes des clients, plusieurs petits ajouts ou modifications ont été faits en cours de route. Avec les années, la liste de ces petits ajouts et/ou modifications a pris de l'ampleur et était devenue très difficile à suivre. De plus, certaines modifications avaient été faites pour un client uniquement, mais n'avaient pas été modifiées sur le design initial, ce qui engendre un manque d'uniformité dans les différents assemblages, créant un grand risque d'erreur lors de la mise en route de commandes. Il était difficile, lors de la conception, de comprendre exactement la raison du pourquoi de chaque design. Il a fallu étudier l'entièreté des options et des modifications présentes afin de s'assurer de standardiser, tout en conservant la fonctionnalité des composantes. Un gros travail de compréhension et de tests a été nécessaire pour obtenir des structures modulaires à jour.

D'un point de vue technique encore une fois, la conception et la modification des différentes composantes a été un défi à plusieurs moments. En raison de la complexité de certaines pièces et de certains assemblages, il a fallu faire attention de bien considérer chaque composante pour pouvoir concevoir des modules connectables, adéquats et efficaces. Par ailleurs, une grande quantité d'erreurs lors

de l'assemblage survient en raison du grand nombre de modèles offerts. En réduisant et en simplifiant les modèles, cela permet de réduire le nombre de non conformes. Cependant, pour y arriver, il faut prévoir, lors de la conception, la mise en place de « go no go » pour simplifier l'assemblage.

De façon plus générale, la standardisation de composantes en structures connectables et reconfigurables demande une excellente compréhension des produits et des fonctions offertes par ces produits. Bien qu'il puisse avoir l'air simple de standardiser un produit, il faut que ces produits soient aussi compatibles avec les anciens.

D'un point de vue humain, une grande difficulté a été rencontrée. Au fil des années, beaucoup de connaissances et d'expertises ont été acquises par les ouvriers en place. Une grande partie de ses connaissances ne sont ni partagées, ni répertoriées par écrit. Lorsqu'un employé quitte, il part avec son savoir, ses connaissances et son expertise. Dans plusieurs situations, il a fallu chercher à comprendre pourquoi certaines modifications avaient été faites, sans toutefois obtenir de réponse parce que les personnes concernées ne sont désormais plus en fonction. Cette problématique a forcé l'équipe en place à mettre les anciens documents à jour et d'en informer les personnes en place, pour permettre un transfert des connaissances.

7.1.2. Rendre le procédé de production 4.0

D'un point de vue plus technique, la codification adaptée aux modules a été complexe à mettre en place. Elle est faite en fonction de l'appartenance des pièces aux différentes machines. Elle permet aussi une traçabilité des pièces. Cependant, puisque la codification des pièces se fait à l'étape de la recherche et développement, cela engendre parfois des anomalies entre les étapes de conception et les étapes de production. Par ailleurs, il a fallu conserver une traçabilité avec les codifications

existantes. Il a été nécessaire de prendre en considération ce qui était déjà en place et de réaliser un travail de codification en tenant en compte de plusieurs contraintes imposées par la nomenclature elle-même.

Pour ce qui est de l'implantation des cellules dynamiques, d'un point de vue technique, il a fallu tenir compte des prévisions de vente mais aussi du temps alloué dans une semaine à l'assemblage des convoyeurs. Étant un produit qui a changé d'importance au cours des deux dernières années, en partie en raison de la pandémie, il a fallu s'ajuster au niveau de la formation des cellules en fonction de la demande.

Enfin, encore une fois d'un point de vue technique, l'implantation d'un logiciel ERP demande une grande préparation et engendre de nombreux défis. Les formations, les ajustements et la gestion des problèmes qui surviennent demandent une quantité de temps qui doit être prévu avant l'implantation, sans quoi le projet se voit être décalé dans le temps et peut engendrer des imprévus financiers qui peuvent être critiques pour le succès de l'implantation. La gestion des modules standards n'est pas toujours simple au niveau des recettes de fabrication. Il faut un logiciel ERP capable de gérer ces modules standards.

D'un point de vue humain, le plus grand enjeu est sans aucun doute la résistance au changement de la part des employés. L'implantation d'un nouveau logiciel, une modification de l'aménagement de travail et le changement des façons de faire poussent certains employés à être plus réfractaires aux changements. Il faut donc prendre le temps nécessaire pour bien expliquer les changements à venir mais aussi, expliquer le désir et la vision de l'entreprise de s'améliorer pour le bien de tous.

Pour ce qui est du suivi des modifications, cela a aussi occasionné plusieurs difficultés. En effet, un certain manque de rigueur envers les nouvelles façons de faire

engendre des gains moins importants et parfois même, l'absence d'amélioration. Il est donc primordial de faire un suivi rigoureux directement sur le plancher pour s'assurer que le tout se déroule comme prévu.

7.1.3. Adapter le modèle d'affaires au 4.0

D'un point de vue technique, la transition vers une plateforme Web amène son lot de défis. Plusieurs ajustements doivent être faits initialement, puis un travail de sensibilisation à la nouvelle plateforme de commande doit être fait auprès de clients moins habitués à ces technologies.

D'un point de vue humain, une certaine réticence provient de la direction lorsque vient le temps de changer une formule qui fonctionne pour se diriger vers de l'inconnu. Cependant, la transition vers des méthodes permettant de réduire le temps de réaction et d'augmenter l'aspect concurrentiel de l'entreprise se fait rapidement sentir et diminue les craintes face aux changements des habitudes.

7.2. Facteurs de succès

Au terme de cette étude, plusieurs éléments ressortent comme étant des facteurs de succès. Les figures 7.1 et 7.2 établissent le pont entre les obstacles rencontrés au cours de cette recherche et les facteurs de succès humains et techniques à mettre en place pour surmonter les obstacles.

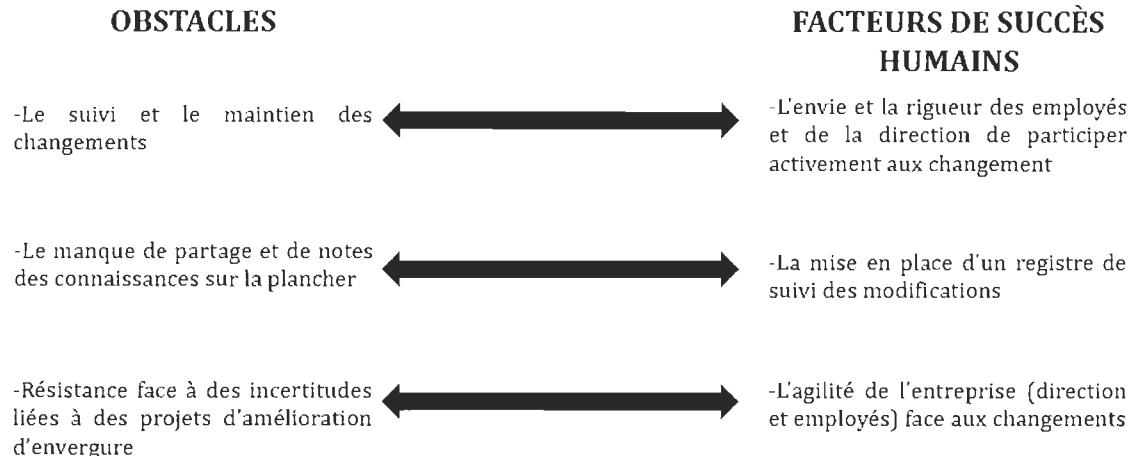


Figure 7.1 Facteurs de succès humains

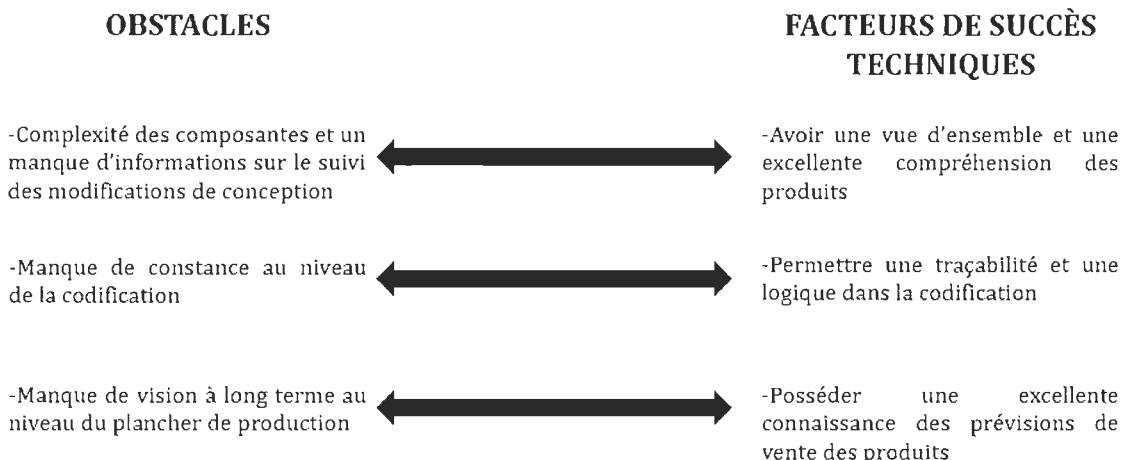


Figure 7.2 Facteurs de succès techniques

Parmi les différents facteurs de succès mis de l'avant, certains sont essentiels aux succès de la mise en place de la stratégie d'implantation du 4.0 dans une PME manufacturière québécoise.

- **L'envie des employés et de la direction de participer activement aux changements :** il a été étonnant de constater l'envie des employés de voir

quelqu'un s'attarder à la conception des convoyeurs. Il est fréquent d'entendre qu'un des plus grands freins au changement provient de la réticence des employés. Ici, les employés voulaient s'impliquer dans ce changement et en faire partie.

- **La rigueur et l'agilité de l'entreprise face aux changements :** il faut absolument maintenir les changements, continuer d'améliorer le produit, le processus et le modèle d'affaires et s'adapter continuellement à la concurrence afin de pouvoir être compétitif dans un environnement 4.0.
- **Posséder une excellente connaissance des produits, des historiques et des prévisions de vente :** la révision de la conception se fait beaucoup plus facilement et surtout, plus efficacement en connaissant bien le produit. Il est aussi plus facile de voir venir les différents problèmes et de les régler avant qu'ils ne surviennent et de prévoir la stratégie à mettre en place.

7.3. Développements futurs

Cette recherche a permis de proposer une stratégie d'implantation du 4.0 dans les PME manufacturières québécoises en adaptant le produit, le procédé et le modèle d'affaires. Cette stratégie a permis de réduire significativement le temps de réaction, d'accroître l'agilité, la connectivité et ultimement la performance de l'entreprise pour être en mesure de compétitionner dans le contexte de la quatrième révolution industrielle. Par ailleurs, cette recherche a permis de conclure qu'il est possible de travailler en parallèle à la fois sur le produit, sur le procédé et sur le modèle d'affaires, pour en tirer davantage de bénéfices rapidement.

Le travail qui a été fait dans cette étude a permis de standardiser des modules facilement reconfigurables d'un type de produit bien précis, soit les convoyeurs. Toutefois, il ne faut pas simplement se limiter à un seul produit. Chaque produit au sein des entreprises devrait pouvoir être standardisé en modules afin d'être amené

à la révolution 4.0. Ce travail offre ainsi une stratégie d'implantation du 4.0 dans les PME manufacturières québécoises en se déclinant en 3 étapes principales : rendre le produit, le procédé et le modèle d'affaires 4.0. Cette stratégie permet aussi de développer l'agilité des PME.

Il serait aussi intéressant d'étudier la possibilité d'utiliser des cobots pour les étapes de soudure et de la peinture pour augmenter la performance et la profitabilité d'une entreprise manufacturière.

RÉFÉRENCES

- Abdul-Nour, G., Gamache, S. et Nouri, K. (2017). 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 *Cellular Manufacturing Systems: Recent Developments, Analysis and Case Studies* (p. 3-35). <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85044691290&partnerID=40&md5=a45d9f61e85716013cfa5855cfdbb67/>.
- Blanchet, M. (2016). Industrie 4.0 Nouvelle donne industrielle, nouveau modèle économique. *Outre-Terre*, 46, 62-85.
- Bourezza, E. M. et Mousrij, A. (2021). Towards a platform to implement an intelligent and predictive maintenance in the context of industry 4.0. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 1193, 33-44. https://doi.org/10.1007/978-3-030-51186-9_3
- Cimini, C., Adrodegari, F., Paschou, T., Rondini, A. et Pezzotta, G. (2021). Digital servitization and competence development: A case-study research [Article]. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 32, 447-460. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2020.12.005>
- Clercq, M.D., Vats, A. et Biel, A. (2018). *Agriculture 4.0: The future of farming technology*.
- Cohen, Y., Naseraldin, H., Chaudhuri, A. et Pilati, F. (2019). Assembly systems in Industry 4.0 era: a road map to understand Assembly 4.0 [Article]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 105(9), 4037-4054. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04203-1/>.
- Drolet, J., Marcoux, Y. et Abdulsour, G. (2008). Simulation-based performance comparison between dynamic cells, classical cells and job shops: A case study [Conference Paper]. *International Journal of Production Research*, 46(2), 509-536. <https://doi.org/10.1080/00207540601138312/>.

- Egilmez, G., Erenay, B. et Süer, G. A. (2019). Hybrid cellular manufacturing system design with cellularisation ratio: An integrated mixed integer nonlinear programming and discrete event simulation approach [Article]. *International Journal of Services and Operations Management*, 32(1), 1-24. <https://doi.org/10.1504/IJSOM.2019.097036/>.
- Gamache, S. (2016). *Effet des cellules dynamiques sur la performance des entreprises réseaux* [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* [Université du Québec à Chicoutimi].
- Genest, M. C. et Gamache, S. (2020). Prerequisites for the implementation of industry 4.0 in manufacturing SMEs. Dans. Procedia Manufacturing. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85099807963&doi=10.1016%2fj.promfg.2020.10.170&partnerID=40&md5=98f313fed7d2b7c989a8a34d4045f638/>.
- Goldman, S. L., Nagel, R. N., Preiss, K. et Iacocca, L. (1995). *Agile competitors and virtual organizations: Strategies for enriching the customer*.
- Greene, T. J. et Cleary, C. M. (1985). IS CELLULAR MANUFACTURING RIGHT FOR YOU? Dans. Proceedings - Fall Industrial Engineering Conference (Institute of Industrial Engineers). <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0022324614&partnerID=40&md5=a1d2be8a810ac8108e27e8b22f48562b/>.
- Group, B. C. (2021). Study of 900 digital transformations: Only 30% are successful.
- Harris, G., Yarbrough, A., Abernathy, D. et Peters, C. (2019). Manufacturing Readiness for Digital Manufacturing [Article]. *Manufacturing Letters*, 22, 16-18. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2019.10.002/>.
- Hayes, R. H. et Pisano, G. P. (1994). Beyond World-Class: The New Manufacturing Strategy. (cover story) [Article]. *Harvard Business Review*, 72(1), 77-87. <http://proxy.uqtr.ca/login.cgi?action=login&u=uqtr&db=ebsco&ezurl=http://se>

- arch.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=bth&AN=9403231742&site=ehost-live/.
- Irani, S. (1993). Some new insights on the design of cellular manufacturing systems. Dans. 2nd Industrial Engineering Research Conference Proceedings.
- Kia, R., Khaksar-Haghani, F., Javadian, N. et Tavakkoli-Moghaddam, R. (2014). Solving a multi-floor layout design model of a dynamic cellular manufacturing system by an efficient genetic algorithm [Article]. *Journal of Manufacturing Systems*, 33(1), 218-232. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2013.12.005/>.
- Kohler, D. et Weisz, J.-D. (2019). La France doit s'inspirer du projet « Industrie 4.0 » allemand. *Le Monde*.
- Kusiak, A. et Heragu, S. S. (1987). Group technology [Article]. *Computers in Industry*, 9(2), 83-91. [https://doi.org/10.1016/0166-3615\(87\)90002-9/](https://doi.org/10.1016/0166-3615(87)90002-9/).
- Mittal, S., Khan, M. A., Romero, D. et Wuest, T. (2018). A critical review of smart manufacturing & Industry 4.0 maturity models: Implications for small and medium-sized enterprises (SMEs) [Review]. *Journal of Manufacturing Systems*, 49, 194-214. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2018.10.005/>.
- Moeuf, A., Pellerin, R., Lamouri, S., Tamayo-Giraldo, S. et Barbaray, R. (2018). The industrial management of SMEs in the era of Industry 4.0 [Article]. *International Journal of Production Research*, 56(3), 1118-1136. <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1372647/>.
- Montreuil, B., Lefrançois, P., Venkatadri, U., Université, L. et Faculté des sciences de, l. a. (1991). *Holographic layout of manufacturing systems*. Faculté des sciences de l'administration, Université Laval.
- Niakan, F., Baboli, A., Moyaux, T. et Botta-Genoulaz, V. (2016). A bi-objective model in sustainable dynamic cell formation problem with skill-based worker assignment [Article]. *Journal of Manufacturing Systems*, 38, 46-62. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2015.11.001/>.
- Nishi, T., Matsuda, M., Hasegawa, M., Alizadeh, R., Liu, Z. et Terunuma, T. (2020). Automatic construction of virtual supply chain as multi-agent system using

- enterprise e-catalogues [Article]. *International Journal of Automation Technology*, 14(5), 713-722. <https://doi.org/10.20965/ijat.2020.p0713/>.
- Rajamani, D., Singh, N. et Aneja, Y. P. (1992). A model for cell formation in manufacturing systems with sequence dependence [Article]. *International Journal of Production Research*, 30(6), 1227-1235. <https://doi.org/10.1080/00207549208942953/>.
- Ramudhin, A. et Rochette, R. (1991). Just-in-time practices in a unstable environment: A simulation study. Dans A. Satir (dir.), *Just-in-time manufacturing systems: Operational planning and control issues*. Elsevier.
- Rauch, E., Dallasega, P. et Unterhofer, M. (2019). Requirements and Barriers for Introducing Smart Manufacturing in Small and Medium-Sized Enterprises [Article]. *IEEE Engineering Management Review*, 47(3), 87-94, article n° 8778720. <https://doi.org/10.1109/EMR.2019.2931564/>.
- Rheault, M., Drolet, J. R. et Abdulnour, G. (1995). Physically reconfigurable virtual cells: A dynamic model for a highly dynamic environment [Article]. *Computers and Industrial Engineering*, 29(1-4), 221-225. [https://doi.org/10.1016/0360-8352\(95\)00075-C/](https://doi.org/10.1016/0360-8352(95)00075-C/).
- Rheault, M., Drolet, J. R. et Abdulnour, G. (1996). Dynamic cellular manufacturing system (DCMS) [Article]. *Computers and Industrial Engineering*, 31(1-2), 143-146. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0030270894&partnerID=40&md5=d4d9c51d350462306f62ba913f1e0faf/>.
- Safaei, N. et Tavakkoli-Moghaddam, R. (2009). Integrated multi-period cell formation and subcontracting production planning in dynamic cellular manufacturing systems [Article]. *International Journal of Production Economics*, 120(2), 301-314. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2008.12.013/>.
- Sakhaei, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., Bagheri, M. et Vatani, B. (2013). A robust optimization approach for an integrated dynamic cellular manufacturing system and production planning with unreliable machines [Article]. *Applied*

- Mathematical Modelling*, 40(1), 169-191. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2015.05.005/>.
- Schumacher, A. A. A., Erol, S. et Sihn, W. (2016). *A Maturity Model for Assessing Industry 4.0 Readiness and Maturity of Manufacturing Enterprises*. United Kingdom.
- Shashi, Centobelli, P., Cerchione, R. et Ertz, M. (2020). Agile supply chain management: Where did it come from and where will it go in the era of digital transformation? [Article]. *Industrial Marketing Management*, 90, 324-345. <https://doi.org/10.1016/j.indmarman.2020.07.011/>.
- Torrès, O. (1999). *Les PME*. Flammarion Paris.
- Zhang, Y., Deng, Y., Wang, Y., Chen, P., Yan, B., Zou, X., Zheng, Y., Wu, S. et Zhu, H. (2019). Functional Structure Modeling and Assembly Practice of Ditching Fertilizer Based on Standardized Module Design. Dans. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85070567613&doi=10.1088%2f1757-899X%2f573%2f1%2f012113&partnerID=40&md5=fb6f6024aa87a8090854c34613e75da3/>.
- Zombre, U. (2019). Le secteur agricole au Québec : quelques grandes tendances à la lumière des quatres derniers recensements de l'agriculture. *BioClips Actualité Bioalimentaire*, 27(28), 1-2.

ANNEXE I

Tableau de la revue de la littérature

Tableau AI.1 Matrice de la revue de la littérature

Identification (titre, auteur, publication, année)	Objectif	Variable dépendante (mesure de performance)	Variable indépendante	Méthodologie utilisée	Conclusion
Integrated cellular manufacturing systems design with production planning and dynamic system reconfiguration. Bulgak, A.A. et al., <i>European Journal of Operational Research</i> , 2009.	Analyser le modèle des cellules dynamiques.	Temps de décision de reconfiguration.	Séquence d'opérations, capacité de la machine, division des lots.	Programme non linéaire à nombres entiers mixtes.	Décisions de conception des cellules dynamiques peuvent être traitées dans le modèle proposé.
Simulation-based performance comparison between dynamic cells, classical cells and job shops: A case study. Drolet, J. et al., <i>International Journal of Production Research</i> , 2008.	Comparer DCMS, CC et JS à différents niveaux de turbulence.	Dix-sept variables dépendantes reliées à la mesure de performance.	Treize variables indépendantes reliées à la turbulence.	Design expérimental, Taguchi, simulation.	Les DCMS sont généralement plus efficientes que les cellules classiques.
Effet des cellules dynamiques sur la performance des entreprises réseaux. Gamache, S., Université du Québec à Trois-Rivières, 2016.	Déterminer l'effet des cellules dynamiques sur la performance des entreprises réseaux.	Nombre d'encours, quantité de commandes sortantes, temps de passage, temps de réaction pour répondre à une demande.	Fiabilité des fournisseurs, l'interdisciplinarité, la conception modulaire, le système d'alimentation, le système de production, le nombre d'employés.	Design expérimental couplé à la simulation Monte-Carlo.	L'interdisciplinarité, la présence d'une structure modulaire, une production en cellules dynamiques, un nombre d'employés suffisant, un système d'alimentation en kanban et une fiabilité des fournisseurs permettent d'optimiser le temps de réaction, le nombre d'encours, le temps de passage et les ventes totales.
Solving a group layout design model of a dynamic cellular manufacturing system with alternative process routings, lot splitting and flexible reconfiguration by simulated annealing. Kia, R. et al., <i>Computers & Operations Research</i> , 2012.	Réduire le coût total de manutention et les frais généraux.	Coût total.	Séquence d'opérations, temps de traitement, volume de production, capacité de la machine, disposition intra et intercellulaire.	Linéarisation Lingo, recuit simulé.	Tient compte des dispositions.

Tableau AI.1 Matrice de la revue de la littérature (suite)

Identification (titre, auteur, publication, année)	Objectif	Variable dépendante (mesure de performance)	Variable indépendante	Méthodologie utilisée	Conclusion
Les cellules dynamiques : un concept pour PME. Rheault, M. et al., 3 ^e Congrès international francophone de la PME (CIFPME 96), 1996.	Minimiser le coût marginal de manutention et de configuration.	Coût marginal de manutention et de configuration.	Les temps d'opération, les temps de mise en course, les temps de déplacement des postes, les séquences d'opération.	Problème d'assignation quadratique (PAQ) résolution avec un algorithme.	L'algorithme du coût marginal minimal de configuration des cellules dynamiques est une base solide permettant la concrétisation du concept (cellule dynamique).
Les systèmes manufacturiers cellulaires dynamiques. Rheault, M. et al., Université du Québec à Trois-Rivières, 1999.	Réduire le coût marginal total de toutes les manutentions de produits et de postes de travail.	Coût marginal.	Échanges interzones, disposition des postes de travail.	Algorithme du coût marginal minimal, PAQ.	Cet algorithme suggère toujours le meilleur aménagement économique possible pour un horizon donné compte tenu de la configuration actuelle.
Integrated multi-period cell formation and subcontracting production planning in dynamic cellular manufacturing systems. Safaei, N. et al., <i>International Journal of Production Economics</i> , 2009.	Réduire les mouvements inter et intracellulaires, la reconfiguration, les coûts d'inventaire.	Coût de production et de reconfiguration des cellules.	Mouvement inter et intracellulaire et inventaire.	Modèle mathématique intégré.	Modèle proposé est vérifié par des exemples numériques.
A robust optimization approach for an integrated dynamic cellular manufacturing system and production planning with unreliable machines. Sakhaei, M. et al., <i>Applied Mathematical Modelling</i> , 2013.	Réduire les coûts de panne, de relocalisation, de formation.	Coûts de panne, de relocalisation, de formation, d'inventaire.	Disposition intercellulaire, fiabilité de la machine, affectation, planification de la production.	Approche d'optimisation, programme linéaire à nombres mixtes intégrés.	Approche développée pour trouver une solution optimale.
Hybrid cellular manufacturing system design with cellularization ratio: An integrated mixed integer nonlinear programming and discrete event simulation approach. Egilmez, G. et al., <i>International Journal of Services and Operations Management</i> , 2019.	Déterminer les avantages significatifs pour les décisions de conception.	Performance du système manufacturier.	Indice de similarité, rapport de cellularisation, configuration du processus.	Modélisation mathématique.	Un indice de similarité élevé permet une meilleure formation cellulaire.

Tableau AI.1 Matrice de la revue de la littérature (suite)

Identification (titre, auteur, publication, année)	Objectif	Variable dépendante (mesure de performance)	Variable indépendante	Méthodologie utilisée	Conclusion
Solving a multi-floor layout design model of a dynamic cellular manufacturing system by an efficient genetic algorithm. Kia, R. et al., <i>Journal of Manufacturing Systems</i> , 2014.	Atteindre une solution de conception optimale.	Formation cellulaire et aménagement.	Reconfiguration flexible, machines inactives, disposition d'installation.	Modèle de programmation à nombre mixte.	L'efficacité est prouvée.
A bi-objective model in sustainable dynamic cell formation problem with skill-based worker assignment. Niakan, F. et al., <i>Journal of Manufacturing Systems</i> , 2016.	Réduire les coûts et les pertes de production.	Coût de production et de pertes.	Affectation des employés, critères environnementaux et sociaux.	MOSA.	L'algorithme est performant.
Agile production, innovation and technological cooperation: Overlapping priorities of manufacturing firms. Sanchez, A.M. et al., <i>Baltic Journal of Management</i> , 2019.	Analyser la relation entre la fabrication agile et la flexibilité de production.	Agilité manufacturière.	Capacité de gestion et flexibilité de production.	Méthodes quantitatives et qualitatives.	Les entreprises hautement agiles utilisent plus intensivement des facilitateurs agiles.
Functional structure modeling and assembly practice of ditching fertilizer based on standardized module design. Zhang, Y. et al., <i>IOP Conference Series: Materials Science and Engineering</i> , 2019.	Combiner les standardisations et les designs modulaires pour l'application d'une machine.	Facilité de fabrication et de maintenance.	Indice de similarité.	Modélisation de la structure fonctionnelle.	Structure épurée et maintenance facilitée.
Dynamic manufacturing cells and SME network: Key success factors. Gamache, S. et Abdul-Nour, G., <i>IFAC-PapersOnLine</i> , 2016.	Évaluer les effets de l'utilisation de DCMS et conception modulaire sur performance du réseau.	Ventes totales, délais.	Fiabilité du fournisseur, multidisciplinarité, structure modulaire, système d'approvisionnement, de production, nombre d'employés.	Design expérimental et simulation.	La multidisciplinarité, la structure modulaire, DCMS, Kanban, fiabilité élevée permet d'optimiser la performance des PME.

Tableau AI.1 Matrice de la revue de la littérature (suite)

Identification (titre, auteur, publication, année)	Objectif	Variable dépendante (mesure de performance)	Variable indépendante	Méthodologie utilisée	Conclusion
Dynamic cellular manufacturing system (DCMS). Rheault, M., Drolet J.R. et Abdul-Nour, G., <i>Computers & Industrial Engineering</i> , 1996.	Réduire le coût global du transfert des charges unitaires et des déplacements des postes de travail.	Flexibilité et efficacité.	Environnement turbulent et aménagement.	Design expérimental et simulation.	DCMS offre la flexibilité et l'efficacité.
Configuration and operation architecture for dynamic cellular manufacturing product – service system. Wu, B. et al., <i>Journal of Cleaner Production</i> , 2016.	Améliorer la durabilité des opérations et la reconfigurabilité des DCMS.	Durabilité.	Performance économique et sociale.	Design expérimental.	DCM-PSS peut être implémenté en temps réel.
Manufacturing readiness for digital manufacturing. Harris, G. et al., <i>Manufacturing Letters</i> , 2019.	Déterminer la raison de la faible adoption des capacités numériques des PME.	Niveau de maturité manufacturier.	Interconnexion, impact d'une communication inefficace.	Entrevue.	Déficience des PME à la sensibilisation de la fabrication numérique.
Physically reconfigurable virtual cells: A dynamic model for a highly dynamic environment. Rheault, M. et al., <i>Computers & Industrial Engineering</i> , 1995.	Minimiser le coût de transfert des charges unitaires et le coût des déplacements.	Coût total.	Système de production, séquence d'opération.	Design expérimental.	Émergence d'un nouveau système de production : DCMS.
The industrial management of SMEs in the era of Industry 4.0. Moeuf, A. et al., <i>International Journal of Production Research</i> , 2018.	Déterminer les avancées couvrant les différents enjeux de l'industrie 4.0 en lien avec les PME.	Performance de l'entreprise.	Outils du 4.0.	Revue de la littérature.	Les PME n'exploitent pas suffisamment les outils du 4.0
Disposition of Moroccan SME manufacturers to industry 4.0 with the implementation of ERP as a first step. El Hamdi, S., <i>6th International Conference on Enterprise Systems</i> , 2018.	Mettre en lumière la relation entre le 4.0 et un système ERP.	Niveau de maturité manufacturier.	IoT, réseau sans fil, Big Data.	Design expérimental.	L'implantation d'un ERP facilite la direction.

Tableau AI.1 Matrice de la revue de la littérature (suite)

Identification (titre, auteur, publication, année)	Objectif	Variable dépendante (mesure de performance)	Variable indépendante	Méthodologie utilisée	Conclusion
A critical review of smart manufacturing & Industry 4.0 maturity models: Implications for small and medium-sized enterprises (SMEs). Mittal, S. et al., <i>Journal of Manufacturing Systems</i> , 2018.	Examiner les modèles de l'industrie 4.0 en tenant compte des exigences des PME.	Niveau de maturité vers le 4.0	Vision, feuille de route, planification stratégique.	Revue de la littérature des modèles de maturité des PME.	Un faible nombre de PME dans le contexte 4.0 reflète les exigences et les défis des PME.
Flexible cell formation and scheduling of robotics coordinated dynamic cellular manufacturing system: A gateway to industry 4.0. Saboor, A. et al., <i>International Conference on Robotics and Automation in industry</i> , 2019.	Améliorer la réactivité des cellules dynamiques.	Coût total.	Reconfiguration cellulaire.	Modèle conceptuel pour un environnement de production automatisé.	Facilite la prise de décision pour accepter et exécuter les commandes.
Identification of critical success factors, risks and opportunities of industry 4.0 in SMEs. Moeuf, A. et al., <i>International Journal of Production Research</i> , 2020.	Identifier les risques, les opportunités et les facteurs critiques de succès du 4.0 en ce qui concerne la performance des PME.	Performance de l'entreprise.	Expertise, connaissance du 4.0, planification stratégique, facteurs de succès.	Étude Delphi.	Le manque d'expertise et une planification stratégique à court terme sont les principaux risques des PME.
Process model for the successful implementation and demonstration of SME-based industry 4.0 showcases in global production networks. Peukert, S. et al., <i>Production Engineering</i> , 2020.	Proposer un modèle permettant d'exploiter les potentiels de l'industrie 4.0.	Qualité des produits, performance logistique.	Potentiels problèmes en raison du 4.0.	Approche holistique, étude de cas.	Met en lumière le potentiel du 4.0.
Assembly systems in Industry 4.0 era: A road map to understand Assembly 4.0. Cohen, Y. et al., <i>International Journal of Advanced Manufacturing Technology</i> , 2019.	Comprendre et explorer l'impact des nouvelles technologies du 4.0.	Productivité, profitabilité.	Design du produit, processus de fabrication, système d'assemblage, flexibilité, séquence d'assemblage, planification, maintenance des machines.	Étude de cas, design expérimental.	Identification des opportunités de recherche et des défis pour les systèmes d'assemblage.

Tableau AI.1 Matrice de la revue de la littérature (suite)

Identification (titre, auteur, publication, année)	Objectif	Variable dépendante (mesure de performance)	Variable indépendante	Méthodologie utilisée	Conclusion
Toward industry 4.0: Studies and practices in Quebec SMEs. Gamache, S. et al., Actes de l' <i>International Conference on Computers and Industrial Engineering</i> , 2017.	Dresser un portrait des PME québécoises afin de comprendre leurs forces et leurs faiblesses.	Agilité, efficacité, performance.	Technologies numériques, automatisation, approches orientées vers le service.	Revue de la littérature et analyse d'une base de données.	Un partage de connaissances et l'adoption de politiques et d'investissements permettraient de mieux développer le secteur manufacturier au Québec.
Methodology for implementation of industry 4.0 technologies in supply chain for SMEs. El-kaime, H. et Elhaq, S.L., <i>International Conference on Artificial Intelligence and Industrial Applications</i> , 2021.	Définir l'industrie 4.0 et ses impacts sur l'optimisation de la chaîne d'approvisionnement des PME.	Performance.	Technologies numériques du 4.0.	Revue de la littérature et guide pilote pour une stratégie vers le 4.0.	Offre une méthodologie d'implantation du 4.0.
Agile supply chain management: Where did it come from and where will it go in the era of digital transformation? Shashi et al., <i>Industrial Marketing Management</i> , 2020.	Développer une stratégie permettant d'obtenir une chaîne d'approvisionnement agile.	Agilité, performance.	Technologies 4.0, demande.	Revue de la littérature.	Offre des avenues de recherches futures pour contribuer à accroître l'agilité.
Towards a plateforme to implement an intelligent and predictive maintenance in context of industry 4.0. Bourezza, E.M. et al., <i>Advances in intelligent Systems and Computing</i> , 2020.	Présenter une démarche de mise en œuvre d'une plateforme de maintenance en lien avec les principes du 4.0.	Temps de décision, temps de réaction.	Système de gestion de la maintenance, maintenance intelligente, panne des machines.	Plateforme d'acquisitions et conditionnement de données.	Permet de choisir la procédure appropriée.
The problem of selection with the fuzzy axiomatic design of MEMS based sensors in industry 4.0 predictive maintenance process. Erez, A.S. et al., <i>Advances in Intelligent Systems and Computing</i> , 2020.	Étudier la méthode de conception des capteurs des machines industrielles.	Justesse de la méthode.	Maintenance préventive, capacité des capteurs.	Design expérimental, modélisation des paramètres.	Les paramètres de la base des capteurs sont optimisés.

Tableau AI.1 Matrice de la revue de la littérature (suite)

Identification (titre, auteur, publication, année)	Objectif	Variable dépendante (mesure de performance)	Variable indépendante	Méthodologie utilisée	Conclusion
Automatic construction of virtual supply chain as multi-agent system using enterprise e-catalogues. Nishi, T. et al., <i>International Journal of Automation Technology</i> , 2020.	Étudier la nécessité d'avoir des chaînes de production virtuelles.	Flexibilité, temps d'intégration.	Catalogues électroniques, type de détaillants.	Méthode de configuration générale d'une chaîne de production virtuelle.	Les modèles sont implantés à titre d'essai.
Evaluation of the influence parameters of Industry 4.0 and their impact on the Quebec manufacturing SMEs: The first findings. Gamache, S. et al., <i>Cogent Engineering</i> , 2020.	Évaluer et identifier les moyens les plus efficaces de faciliter la numérisation pour une PME manufacturière.	Performance numérique.	Technologies du 4.0.	Questionnaires, entrevues.	Mélange entre les connaissances du milieu universitaire et du terrain pour y arriver.
Requirements and barriers for introducing smart manufacturing in small and medium-sized enterprises. Rauch, E. et al., <i>IEEE Engineering Management Review</i> , 2019.	Identifier les prérequis et les barrières au 4.0 en milieu de PME.	Niveau de maturité vers le 4.0.	Concepts, solutions et technologies du 4.0.	Ateliers d'experts, entrevues.	Importance du support de la direction dans les actions vers le 4.0.

ANNEXE II

Tableau AII.1 Modèle de servicisation numérique de Cimini et al. (2021)

		Populated digital servitization model				
		Smart servitization strategies				
		Product-centered		Ecosystem-centered		
Smart product capabilities	Monitoring	Embedded innovator	Solutionist	Aggregator	Synergist	
		<ul style="list-style-type: none"> Data visualisation tools for machinery [82]. Condition monitoring and reliability systems of bearings [83]. Monitoring systems on mechanical equipment [84]. 	<ul style="list-style-type: none"> Condition monitoring supporting consultancy service about maintenance strategies [83]. Monitoring of clients' operations [85]. Complete remote monitoring of manufacturing processes [86]. 	<ul style="list-style-type: none"> Online parts supply system [83]. Documentation connected to e-business systems for spare part ordering [87]. 	<ul style="list-style-type: none"> Network hardware and software to interconnect production machine with all relevant data sources along the production process and cloud storage [88]. 	
		Control	<ul style="list-style-type: none"> Reporting tool for construction machines [82]. Monthly control reports about product data [89]. 	<ul style="list-style-type: none"> Remote monitoring of product data and maintenance operations data for improving coordination in maintenance activities of turbines [89]. 	<ul style="list-style-type: none"> Installed base data available on a centralised cloud system [87]. Cloud-based support for information sharing and remote support [55]. 	<ul style="list-style-type: none"> Cloud platform-based repository to access field device data [8].
		Optimization	<ul style="list-style-type: none"> Condition-based and preventive maintenance of hydraulic motors [89]. 	<ul style="list-style-type: none"> Synchronisation of provider activity cycle and customer activity cycle based on operational-level knowledge [82]. 	<ul style="list-style-type: none"> Analytics based on data from multiple machines, allowing health and operation condition optimization [87]. Smart scheduling of maintenance personnel [87]. Analytics for predictive maintenance [90]. Self-awareness of machines, thanks to machine-to-machine health comparison [91]. Self-maintenance machines, based on Cyber-Physical Systems [91]. 	<ul style="list-style-type: none"> Decision support system for plant optimization [88]. Predictive techniques sharing in an ecosystem of different actors, such as suppliers, technology providers, research centers and systems integrators [8].
Autonomy						<ul style="list-style-type: none"> Product lifecycle management based on cloud manufacturing systems [92,93]. Synchronization and reconfiguration using Internet-based service platform for production logistics [94].