



Titre: Gestion de la transformation 4.0 au sein des PME manufacturières
Title:

Auteur: Jonathan Brodeur
Author:

Date: 2022

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Brodeur, J. (2022). Gestion de la transformation 4.0 au sein des PME manufacturières [Thèse de doctorat, Polytechnique Montréal]. PolyPublie.
Citation: <https://publications.polymtl.ca/10791/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/10791/>
PolyPublie URL:

Directeurs de recherche: Robert Pellerin, & Isabelle Deschamps
Advisors:

Programme: Doctorat en génie industriel
Program:

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

Gestion de la transformation 4.0 au sein des PME manufacturières

JONATHAN BRODEUR

Département de mathématiques et de génie industriel

Thèse présentée en vue de l'obtention du diplôme de *Philosophiæ Doctor*

Génie Industriel

Décembre 2022

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

Cette thèse intitulée :

Gestion de la transformation 4.0 au sein des PME manufacturières

présentée par **Jonathan BRODEUR**

en vue de l'obtention du diplôme de *Philosophiæ Doctor*

a été dûment acceptée par le jury d'examen constitué de :

Christophe DANJOU, président

Robert PELLERIN, membre et directeur de recherche

Isabelle DESCHAMPS, membre et codirectrice de recherche

Mario BOURGAULT, membre

James DENFORD, membre externe

DÉDICACE

À mon épouse, Nathalie, pour son support inconditionnel dans cette aventure

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, je tiens à remercier mon directeur de recherche, Prof. Robert Pellerin, et ma co-directrice de recherche, Prof. Isabelle Deschamps. Leurs conseils et supports ont permis de rendre ce travail possible et de me dépasser.

Je remercie les membres du jury pour leurs temps et commentaires constructifs qui ont amélioré le positionnement et la qualité de ce travail de recherche.

Je voudrais également remercier les employés et gestionnaires du partenaire industriel sans qui ce projet de recherche n'aurait pas pu être réalisé. Par le fait même, j'aimerais remercier tous les experts ayant également contribué à cette recherche par leur participation leur partage de connaissance. Je ne peux malheureusement pas les nommer par respect de la confidentialité des données, de l'organisation et des personnes.

Je transmets également à mes employeurs des remerciements de m'avoir permis de travailler sur ce projet de recherche en parallèle à mes réalisations et mon avancement professionnel. Ce projet n'aurait pas pu être réalisé sans votre compréhension et votre ouverture.

Finalement, j'aimerais remercier mon épouse, Nathalie Boileau, sans qui ce projet n'aurait jamais pu être réalisé. Merci pour ta patience, tes encouragements et ton support à chaque moment difficile de cette aventure.

RÉSUMÉ

Les PME manufacturières se lancent de plus en plus dans une transformation numérique vers l'industrie 4.0 afin d'améliorer leur productivité et d'atteindre de nouveaux marchés. Cependant, celles-ci rencontrent plusieurs problématiques rendant difficile l'exécution et la gestion de cette transformation numérique, que ce soit par manque de ressources ou d'outils pour les aider. Plus spécifiquement, les gestionnaires de PME manufacturières se demandent comment lancer et gérer leur transformation numérique en prenant en compte leur contexte particulier, soit leur flexibilité et leur agilité, mais également leur manque de ressources, structure et de processus de gestion, en comparaison aux plus grandes entreprises. Pour résoudre ce défi, plusieurs chercheurs ont mis de l'avant différents éléments facilitant la gestion de la transformation numérique en PME, que ce soit par des techniques de portefeuilles de projets, la mise en place d'échelle de maturité ou encore l'identification de facteurs de succès critiques. Malheureusement, ces éléments sont pour la plupart très théoriques ou génériques et ne s'appliquent que peu souvent au contexte de la PME manufacturière.

Cette thèse vise donc à faciliter la gestion de la transformation numérique des PME manufacturières vers l'industrie 4.0. Cette étude a été effectuée en partenariat avec une PME industrielle du Grand Montréal, qui était alors en démarrage de transformation numérique et cherchait à déterminer comment lancer et gérer son virage vers l'industrie 4.0. La méthodologie de recherche adoptée fut divisée en deux phases. Tout d'abord, une recherche-intervention auprès du partenaire industriel a permis de mieux comprendre comment se déroulait la transformation numérique au sein d'une PME et comment les caractéristiques de celle-ci influencent sa façon de gérer sa transformation numérique et d'adopter différents outils et processus de gestion. Ensuite, une étude Delphi-Régulier a été effectuée auprès d'un panel de 19 experts en transformation numérique afin d'identifier et de valider des recommandations en vue de faciliter la gestion de la transformation numérique en PME.

Cette démarche a permis d'observer auprès du partenaire industriel comment son contexte et ses caractéristiques ont influencé sa façon de gérer sa transformation numérique. Plus particulièrement, nous avons observé quels ont été les outils et processus de gestion, ainsi que les modèles de gouvernance, qui ont été adoptés pour gérer cette transformation. Lors de cette recherche-intervention, nous avons pu constater que la PME adoptait d'abord un nombre restreint d'outils et de processus de gestion très simples lui permettant de démarrer sa transformation numérique, pour

ensuite faire évoluer rapidement ces outils et processus en fonction des bons et mauvais coups qu'elle a réalisés durant ses projets. Au fur et à mesure que cette approche de gestion évoluait, celle-ci se complexifiait, nécessitant d'apporter différents changements au sein de l'organisation. Ces changements ont permis à la PME d'obtenir la capacité et la maturité nécessaire pour exécuter et gérer des projets de transformation numériques de plus en plus complexes. Les résultats de l'étude Delphi-Régnier ont aussi permis de démontrer que cette approche de gestion n'était pas unique au partenaire industriel. Lors de cette étude, les experts ont également proposé différentes façons d'encadrer cette approche ainsi que des suggestions permettant de faciliter la gestion de la transformation numérique de la PME manufacturière.

La thèse dans son ensemble fournit plusieurs recommandations visant à faciliter la gestion de la transformation numérique en PME manufacturière. Nos recommandations mettent de l'avant des phases, étapes, actions et livrables permettant à la PME de lancer et de gérer sa transformation numérique tout en assurant des apprentissages lui permettant d'améliorer la gestion de sa transformation numérique au fur et à mesure de ses projets. Ces recommandations sont basées sur les observations effectuées en entreprise, sur plusieurs facteurs de succès critiques et bonnes pratiques pertinentes ressorties de la littérature scientifique, ainsi que sur les réponses et commentaires du panel d'experts lors de l'étude Delphi-Régnier. Ces recommandations sont particulièrement intéressantes pour les praticiens qui pourront s'en servir comme gabarit détaillant la séquence d'étapes et de livrables leur permettant de lancer une transformation numérique dans leur entreprise, tout en assurant que celle-ci apprenne et améliore de façon continue son approche de gestion. De façon générale, cette thèse permet d'obtenir une meilleure compréhension de l'influence du contexte d'une PME manufacturière sur la gestion de sa transformation numérique.

Les conclusions de cette recherche restent cependant limitées au cas étudié et à son contexte organisationnel spécifique. De futures études serviraient à vérifier l'impact réel de ces recommandations et de les améliorer en les testant auprès d'un plus grand nombre de PME manufacturières.

ABSTRACT

Manufacturing SMEs are increasingly embarking on a digital transformation towards Industry 4.0 to improve their productivity and reach new markets. However, they face several problems that make it difficult to execute and manage this digital transformation, whether due to a lack of resources or tools to help them. More specifically, managers of manufacturing SMEs are wondering how to launch and manage their digital transformation taking into account their particular context, i.e., their flexibility and agility, but also their lack of resources, structure, and management processes, compared to larger companies. To solve this challenge, several researchers have put forward different elements that facilitate the management of digital transformation in SMEs, whether through project portfolio techniques, the implementation of a maturity scale, or the identification of critical success factors. Unfortunately, most of these elements are too theoretical or generic and rarely applied to the SME manufacturing context.

Therefore, this thesis aims to facilitate managing the digital transformation of manufacturing SMEs towards Industry 4.0. This study was conducted in partnership with an industrial SME in the Greater Montreal area. This SME was in the early stages of its digital transformation and was seeking to determine how to launch and manage its transition to Industry 4.0. The research methodology adopted was divided into two phases. First, an intervention-research with the industrial partner allowed to understand better how the digital transformation was taking place within an SME and how its characteristics influence its way of managing its digital transformation and adopting different management tools and processes. Next, a Delphi-Régner study was conducted with a panel of 19 digital transformation experts to identify and validate recommendations to facilitate digital transformation management in SMEs.

These research methodologies allowed us to observe with the industrial partner how its context and characteristics as an SME influenced how it managed its digital transformation. More specifically, we observed which management tools and processes, as well as the governance model, were adopted by the SME to manage this transformation. During this research-intervention, we observed that the SME adopted a minimum of elementary management tools and processes that allowed it to start its digital transformation and quickly evolve these tools and processes according to the good and bad moves it made during its projects. As this management approach evolved, it became more complex, requiring different organizational changes. These changes then enabled the SME to gain

the capability and maturity to execute and manage increasingly complex digital transformation projects. The results of the Delphi-Régnier study also demonstrated that this management approach was not unique to the industrial partner. During this study, the experts also proposed different ways to frame this approach as well as suggestions to facilitate the management of the manufacturing SME's digital transformation.

The thesis, as a whole, provides several recommendations to facilitate the management of digital transformation in manufacturing SMEs. Our recommendations put forward phases, steps, actions, and deliverables allowing the SME to launch and manage its digital transformation while ensuring learning curves allowing it to improve the management of its digital transformation as its projects progress. These recommendations are based on observations made in companies, several critical success factors and relevant best practices from the scientific literature, as well as the responses and comments of the expert panel during the Delphi-Régnier study.

These recommendations are of particular interest to practitioners who can use them as a template detailing the sequence of steps and deliverables that will allow them to launch a digital transformation in their company while ensuring that it learns and continuously improves its management approach. Overall, this thesis provides a better understanding of how the context of the manufacturing SME affects the management of its digital transformation and proposes different avenues to facilitate this management.

However, the conclusions of this research remain limited to the case studied and its specific organizational context. Future studies would verify the real impact of these recommendations and improve them by testing them with a larger number of manufacturing SMEs.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE.....	III
REMERCIEMENTS	IV
RÉSUMÉ.....	V
ABSTRACT	VII
TABLE DES MATIÈRES	IX
LISTE DES TABLEAUX.....	XIV
LISTE DES FIGURES.....	XV
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	XVI
LISTE DES ANNEXES.....	XVII
CHAPITRE 1 INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 2 REVUE DE LA LITTÉRATURE.....	4
2.1 Meilleures pratiques en transformation 4.0.....	4
2.1.1 Étude de cas jusqu'à présent d'application du 4.0	4
2.1.2 Les facteurs de succès critiques de l'Industrie 4.0	6
2.2 Échelle de maturité « 4.0 ».....	7
2.2.1 Dimensions de la maturité 4.0 et types de modèle	10
2.2.2 Rôle des échelles de maturité 4.0	11
2.3 Modèle et outil de gestion de portefeuille de projets	12
2.3.1 Gestion de portefeuille de projets TI et 4.0	13
2.3.2 Sélection de projets	15
2.3.3 Interdépendance des projets	18
2.4 Revue critique	21
2.5 Conclusion.....	24

CHAPITRE 3	MÉTHODOLOGIE DE RECHERCHE.....	25
3.1	Objectifs de recherche.....	25
3.2	Démarche générale de recherche.....	26
3.3	Recherche-Intervention	28
3.3.1	Acquisition et analyse de données en recherche-intervention	29
3.3.2	Contexte organisationnel du partenaire industriel.....	31
3.4	Méthode Delphi-Régnier.....	32
3.4.1	Méthode Delphi.....	32
3.4.2	Abaque de Régnier	33
3.4.3	Sélection des experts	34
3.4.4	Questionnaire Delphi-Régnier.....	35
3.4.5	Analyse des données	35
3.5	Mitigation des risques de fiabilité et validité	36
3.6	Conclusion.....	36
CHAPITRE 4	ARTICLE 1 : ORGANIZATIONAL CHANGES APPROACHES TO FACILITATE THE MANAGEMENT OF INDUSTRY 4.0 TRANSFORMATION IN MANUFACTURING SMES	38
	Abstract	39
4.1	Introduction	40
4.2	Literature review	41
4.2.1	Industry 4.0 within Manufacturing SMEs.....	41
4.2.2	Organizational changes and Industry 4.0	42
4.2.3	Critical review	44
4.3	Methodology	45
4.3.1	Analytical Framework.....	47

4.3.2	Data Acquisition and Validation	49
4.3.3	Role and reflectivity of the Intervention-Researcher	49
4.3.4	Description of the enterprise	51
4.4	Results	52
4.4.1	Organizational changes characteristics	52
4.4.2	Organizational changes management approaches	57
4.5	Discussion	60
4.5.1	A cycle of smaller consistent organizational changes.....	60
4.5.2	Transforming itself to manage its digital transformation.....	61
4.5.3	The Contribution of innovation culture on the Industry 4.0 transformation	63
4.6	Conclusion.....	63
CHAPITRE 5 ARTICLE 2 : COLLABORATIVE APPROACH TO DIGITAL TRANSFORMATION (CADT) MODEL FOR MANUFACTURING SMES.....		66
	Abstract	67
5.1	Introduction	68
5.2	Literature review	69
5.2.1	Inter-enterprise collaboration between manufacturing SMEs.....	69
5.2.2	Collaboration on industry 4.0 projects within manufacturing SMEs.....	70
5.2.3	Research limitations	72
5.3	Methodology	72
5.3.1	Description of the case study	73
5.3.2	Data Acquisition and the role of the intervention-researcher	77
5.3.3	Research Phases	78
5.4	Results	81
5.4.1	Stage 1: Initial approach and mechanisms creation (CADT Model, version I)	81

5.4.2	Stage 2: Evolution and observation.....	87
5.4.3	Stage 3: Final collaborative approach and mechanisms mapping (CADT Model, version II)	89
5.5	Discussion	95
5.5.1	An approach for collaborative exploration of industry 4.0 technologies	95
5.5.2	Resource-sharing and negotiation	96
5.5.3	Evolution over time	97
5.6	Conclusion.....	98
CHAPITRE 6 ARTICLE 3 : OPERATIONALIZATION OF CRITICAL SUCCESS FACTOR TO MANAGE THE INDUSTRY 4.0 TRANSFORMATION OF MANUFACTURING SMES		
100		
	Abstract	101
6.1	Introduction	102
6.2	Literature review	104
6.2.1	Management of industry 4.0 transformation within manufacturing SMEs.....	104
6.2.2	Critical success factors for industry 4.0 transformation.....	106
6.2.3	Research limitations	109
6.3	General Framework.....	110
6.4	Research methodology	114
6.4.1	The Delphi Methodology	115
6.4.2	The Abacus of Régnier.....	116
6.4.3	Selection of Experts	116
6.4.4	Survey Creation.....	118
6.4.5	Iteration Structure.....	118
6.5	Findings and discussion	119

6.5.1	Steps and actions to manage industry 4.0 transformation	120
6.5.2	Dependence on the Context of Individual Manufacturing SMEs	125
6.5.3	Managing the Transformation through an Iterative Process	126
6.6	Main Results and Limitations	126
6.7	Conclusion.....	133
CHAPITRE 7 DISCUSSION GÉNÉRALE		135
7.1	Contributions des articles aux objectifs spécifiques	135
7.2	Thématiques communes des articles et de la thèse	136
7.2.1	Approche itérative de la transformation numérique en PME manufacturière	136
7.2.2	Apprentissage et évolution des outils et processus de gestion	138
7.3	Recommandations pratiques	139
7.3.1	Phase d'identification.....	142
7.3.2	Phase de démarrage.....	144
7.3.3	Phase d'exécution et de révision	146
7.4	Conclusion.....	148
CHAPITRE 8 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS		150
RÉFÉRENCES.....		153
ANNEXES		171

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 - Résumé de littérature sur les études de cas portant sur l'Industrie 4.0 en PME.....	5
Tableau 2.2 – Facteurs de succès critiques de l’Industrie 4.0	6
Tableau 2.3 – Facteurs de succès critiques de l’Industrie 4.0 (suite et fin)	7
Tableau 2.4 - Résumé de littérature sur les échelles de maturités 4.0.....	8
Tableau 2.5 - Résumé de littérature sur les échelles de maturités 4.0 (suite et fin)	9
Tableau 2.6 - Résumé de littérature sur la gestion de portefeuille de projets TI	13
Tableau 2.7 - Résumé de littérature sur la gestion de portefeuille de projets TI (suite et fin)	14
Tableau 2.8 - Phase d'implantation des processus de gestion de portefeuille de projets TI (Reyck et al., 2005).....	15
Tableau 2.9 - Résumé de littérature sur les outils de sélection de projets.....	16
Tableau 2.10 - Résumé de littérature sur les interdépendances de projets.....	19
Tableau 2.11 - Type d'interdépendance.....	19
Tableau 2.12 - Type d'interactions des interdépendances	20
Table 4.1- Organizational Changes during the Industry 4.0 transformation.....	54
Table 4.2- Organizational Changes during the Industry 4.0 transformation (cont’d).....	55
Table 5.1 - Companies characteristics.....	73
Table 5.2 - Project teams.....	76
Table 5.3 - Industry 4.0 projects description.....	77
Table 6.1 - Actions to support CSF in the Identification phase.	128
Table 6.2 - Actions to support CSF in the Preparation phase.	129
Table 6.3 - Actions to support CSF in the Execution phase	130

LISTE DES FIGURES

Figure 3.1 – Démarche générale de recherche	27
Figure 3.2 – Méthodologie de recherche-intervention	28
Figure 4.1 - Research Methodology	46
Figure 4.2 - Analytical Framework	47
Figure 4.3 - Iterative reactive organizational change approach	59
Figure 4.4 - Cycle of SME Organizational changes during Industry 4.0 projects	61
Figure 5.1 - Research methodology	80
Figure 5.2 – Initial collaborative governance.....	82
Figure 5.3 - Portfolio creation approach	85
Figure 5.4 - Collaborative project execution.....	85
Figure 5.5 - Final governance model	89
Figure 5.6 – "Staged" Project execution	94
Figure 5.7 - " Observe & Share " Project execution approach.....	94
Figure 6.1 - Proposed framework.....	111
Figure 7.1 – Phases, étapes et livrables de gestion de la transformation 4.0 pour les PME manufacturières	141
Figure 7.2 – Phase d’identification	142
Figure 7.3 – Phase de démarrage	145
Figure 7.4 – Phase d’exécution et de révision.....	147

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

La liste des sigles et abréviations présente, dans l'ordre alphabétique, les sigles et abréviations utilisés dans le mémoire ou la thèse ainsi que leur signification. En voici quelques exemples :

PME Petite et Moyenne Entreprise

CSF Critical Success Factors

SME Small and Medium Enterprise

LISTE DES ANNEXES

Annexe A Questionnaires et réponses Delphi-Régnier.....	171
Annexe B Certificat d’approbation d’éthique	188

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

Le contexte économique mondial actuel favorise une compétitivité croissante à l'échelle mondiale entre grandes et plus petites entreprises, les forçant ainsi à se surpasser en matière d'optimisation de leur processus, de diversification de leur offre et d'innovation. En effet, dû à la croissance de la mondialisation et à l'introduction constante de nouvelles technologies et pratiques, plusieurs entreprises, en particulier les petites et moyennes entreprises (PME) manufacturières, se retrouvent coincées entre les forces économiques des grandes entreprises et les innovations des entreprises en démarrage. Celles-ci doivent donc d'un côté optimiser leur processus afin de rester compétitives dans leur marché actuel, et d'un autre côté, innover dans leurs processus, produits et services afin d'offrir davantage de valeurs ajoutées à leur clientèle. Pour y arriver, plusieurs ont décidé de se tourner vers les technologies numériques.

En 2011, le gouvernement allemand a d'ailleurs annoncé une première initiative appelée Industrie 4.0 afin d'accélérer l'adoption de technologie numérique au sein de son industrie manufacturière. L'Industrie 4.0 représente la 4^e révolution industrielle et est perçue de multiples façons, comme le témoigne la centaine de définitions différentes proposées dans la littérature (Ghadge et al., 2020; Xu, L. D. et al., 2018). Au Canada, le concept de l'Industrie 4.0 est souvent vu de façon plus vaste en comportant toute initiative visant à améliorer les processus, les produits et les services en améliorant les décisions de façon décentralisée et basée sur l'exploitation de données en temps réel (Danjou et al., 2016; Moeuf et al., 2018).

L'Industrie 4.0 repose sur plusieurs technologies, comme les systèmes automatisés et d'acquisition de données, les infrastructures TI, les systèmes ERP/MES/PLM, etc. (Ghadge et al., 2020; Xu, L. D. et al., 2018). Sur cette couche technologique, on y rajoute des technologies de l'internet des objets, d'analyse de données massives, d'intelligence artificielle, de système cyberphysique, de système infonuagique, de cobotique, etc. (Moeuf et al., 2018; Xu, L. D. et al., 2018). Grâce à ses technologies, la 4^e révolution industrielle non seulement optimise et rend plus efficace les éléments de la 3^e révolution industrielle, mais en plus, permet de changer la dynamique de plusieurs industries en permettant de développer de nouveaux produits et services personnalisés et de développer de nouveaux modèles d'affaires (Müller, J. M., 2019; Xu, L. D. et al., 2018).

Ces technologies sont pourtant présentes dans différentes industries depuis un certain temps. Cependant, la capacité croissante d'intégration de plusieurs technologies et d'exploitation de données massives en temps réel pour améliorer les performances et la collaboration des entreprises manufacturières font de l'Industrie 4.0 une véritable révolution industrielle (Barratt, 2004; Ghadge et al., 2020; Manavalan & Jayakrishna, 2019; Moeuf et al., 2018). L'Industrie 4.0 étant intimement liée à l'exploitation des données en temps réel, beaucoup ont défini l'Industrie 4.0 comme la transformation numérique de l'industrie manufacturière (Lu, 2017; Moeuf et al., 2018; Oztemel & Gursev, 2020; Piccarozzi et al., 2018; Xu, L. D. et al., 2018).

Les PME manufacturières sont particulièrement intéressées par les opportunités que peut offrir cette nouvelle révolution. Celles-ci sont définies au Canada comme des entreprises du secteur de la fabrication possédant moins de 500 travailleurs et dont le chiffre d'affaires ne dépasse pas 50M\$, représentent 99% des entreprises manufacturières au Canada. Elles embauchent 84,7% des travailleurs du secteur manufacturier (Institut de la statistique du Québec, 2012; Statistique Canada, 2015). Plusieurs d'entre elles ont déjà débuté leur processus de transformation numérique depuis quelques années (Gamache, 2019). Contrairement aux autres révolutions industrielles, l'adoption des pratiques de l'Industrie 4.0 sera plus graduelle pour les PME, afin d'intégrer petit à petit, projet par projet, les différentes technologies et processus nécessaires pour être plus efficaces et mieux intégrés au sein de leur chaîne de valeur, ainsi que pour développer des modèles d'affaires innovants qui utiliseront comme levier ces nouvelles technologies (Brettel, Malte et al., 2014; McKinsey Digital, 2015; The Boston Consulting Group, 2015; World Economic Forum, 2019).

Malheureusement, les PME manufacturières rencontrent plusieurs défis en lien avec la gestion et l'implantation de ces technologies (Moeuf et al., 2019; Schröder, 2016). En effet, celles-ci doivent composer avec des problématiques telles qu'un manque de ressources possédant l'expertise nécessaire pour l'intégration de ces technologies, une résistance à la mise en place des technologies 4.0 par les employés, ainsi qu'un manque de vision et stratégie numérique claire (Khan & Turowski, 2016; Moeuf et al., 2019; Stentoft et al., 2019; Zangiacomi et al., 2020). Les PME manufacturières sont également reconnues pour posséder une vision stratégique à court terme. Ainsi, elles préfèrent établir des objectifs atteignables et moins risqués pour leur transformation 4.0 et utiliser leur flexibilité et leur capacité d'adaptation pour les atteindre en ajustant leur

portefeuille de projets de transformation au fur et à mesure de leur progression (Chen et al., 2018; Wank et al., 2016; Zhong et al., 2017).

Cette thèse a pour *objectif de faciliter et d'améliorer la transformation numérique vers l'Industrie 4.0 en proposant des recommandations de gestion de la transformation 4.0 adapté au contexte des PME manufacturières*. Elle vise à proposer des réponses concrètes aux défis liés à la planification, au lancement et à la gestion de la transformation numérique des PME manufacturières.

Cette thèse est structurée de la façon suivante. Tout d'abord, le prochain chapitre présente une revue et une critique de littérature en lien avec la gestion de la transformation 4.0 des PME manufacturières et la gestion de projets et de portefeuille de projets numériques. Les objectifs de recherche ainsi que la méthodologie proposée sont par la suite présentés au Chapitre CHAPITRE 3.

Les Chapitres 4 à 6 présentent les résultats de cette recherche sous la forme de trois articles scientifiques parus ou soumis dans des journaux scientifiques. Le Chapitre 4 présente l'article *Organizational Changes Approaches to Facilitate the Management of Industry 4.0 Transformation in Manufacturing SMEs* qui a été soumis le 9 octobre 2022. Le Chapitre 5 présente l'article *Collaborative approach to digital transformation (CADT) model for manufacturing SMEs* qui a été publié par le *Journal of Manufacturing Technology Management* le 16 juillet 2021 (<https://doi.org/10.1108/Jmtm-11-2020-0440>). Finalement, le Chapitre 6 présente l'article *Operationalization of Critical Success Factors to Manage the Industry 4.0 Transformation of Manufacturing SMEs* qui a été publié dans le journal *Sustainability* le 21 juillet 2022 (<https://doi.org/10.3390/su14148954>).

Le Chapitre CHAPITRE 7 discute des éléments communs entre les articles et des recommandations de gestion de la transformation 4.0 en PME manufacturières, ainsi que des contributions scientifiques de cette recherche. Finalement, le Chapitre CHAPITRE 8 conclut cette thèse en soulignant les défis et limitations de cette recherche et en y proposant de nouvelles avenues de recherches.

CHAPITRE 2 REVUE DE LA LITTÉRATURE

Ce chapitre porte sur la revue de littérature effectuée afin d'identifier des pistes de solutions potentielles permettant de résoudre la problématique de recherche de cette thèse. Puisque nous cherchons à faciliter la gestion de la transformation numérique des PME manufacturières, la revue de littérature sera divisée en trois sections. Tout d'abord, une revue des bonnes pratiques en transformation numérique en PME est présentée. Cette revue est basée sur des études de cas de transformation numérique en PME manufacturière décrivant les défis rencontrés par celles-ci et les solutions utilisées. Une revue des facteurs de succès critiques en transformation numérique est également abordée dans cette section. Ensuite, une revue des échelles de maturité 4.0, de leur rôle et de leurs utilités dans un contexte de gestion de la transformation numérique en PME manufacturière est présentée. Les échelles de maturité 4.0 et leurs dimensions servent à identifier les éléments de la PME manufacturière à considérer à l'intérieur de leur transformation numérique ainsi que les éléments à implanter dans le but de préparer la PME à lancer sa transformation numérique. Puisqu'il a déjà été établi que les PME manufacturières se concentrent sur des stratégies court terme et adoptent une succession de petits projets technologiques, une revue des méthodes de gestion de portefeuille de projets numériques est présentée. Finalement, nous concluons le chapitre avec une analyse critique de la littérature.

2.1 Meilleures pratiques en transformation 4.0

Cette section traite du statut de la littérature et des courants de recherches autour des meilleures pratiques de gestion de la transformation 4.0 utilisées par les PME. Celle-ci est divisée en deux sections : les études de cas effectués en PME et les facteurs de succès critiques pour la transformation 4.0 des PME manufacturières.

2.1.1 Étude de cas jusqu'à présent d'application du 4.0

Plusieurs études de cas d'implantation de technologie et de transformation numérique de PME ont été rédigées au cours des dernières années. Ces études de cas ont porté principalement sur l'implantation de technologies précises (Moeuf et al., 2018; World Economic Forum, 2019) ou encore de gains et de perception de la transformation numérique des PME (Müller, J. M., Buliga, et al., 2018; World Economic Forum, 2019). Parmi ces projets, on retrouve aussi bien des projets

qui ont affecté les opérations sur le plancher d'usine (Moica et al., 2018), qui ont introduit des systèmes de réalité augmentée dans un chantier naval (Fraga-Lamas et al., 2018), que des projets qui ont changé les interactions d'une chaîne de valeur entière (Heberle et al., 2017).

La majorité des études de cas en PME ont porté sur l'introduction de système cyberphysique dans un but d'acquisition de données et de système de données massives et d'analyse de données (Moeuf et al., 2018; World Economic Forum, 2019). Un résumé des études de cas analysées dans le cadre de cette revue de littérature se retrouve dans le Tableau 2.1 ci-dessous.

Tableau 2.1 - Résumé de littérature sur les études de cas portant sur l'Industrie 4.0 en PME

Auteurs			Type d'étude	Résumé
World Economic Forum (2019)			Étude de cas	Cas d'entreprises ayant mis sur pied plusieurs projets de transformation 4.0 majeurs.
Chen et al. (2018)			Étude de cas	Suivi de la transformation d'une architecture et d'une infrastructure TI pour la mise en place de technologie servant à récolter et interpréter des données massives.
Müller, J. M., Buliga, et al. (2018)			Étude de cas	Identification de projets de création de valeurs auprès de PME par l'entremise de technologie 4.0.
Heberle et al. (2017)			Étude de cas	Un ensemble de projets 4.0 axés sur l'exploitation de données servant à développer plus de valeur à plusieurs points d'une même chaîne de valeur de l'industrie forestière en suède.
Moeuf et al. (2018)			Revue de littérature	Revue de littérature sur plusieurs études de cas d'Industrie 4.0 en PME. La majorité de ces études de cas ont porté sur l'introduction de technologie permettant l'acquisition et l'analyse de données massives.
Tantik et Anderl (2017)			Étude de cas	Mise en place de technologie de structure et d'analyse de donnée pour améliorer l'utilisation de ressource administrative chez Shell.
Fraga-Lamas et al. (2018)			Étude de cas	Prototype de technologie et d'application en réalité augmentée pour un chantier naval.
Leitão et al. (2016)			Étude de cas	Développement et mise en place de système cyberphysique pour la récolte de donnée sur un plancher de production et impact sur l'architecture de système.
Pisching et al. (2018)			Étude de cas	Prototype d'architecture cyberphysique pour détecter des équipements durant la mise en production et en opération d'un nouveau produit manufacturier.
Zangiacomi et al. (2020)			Étude de cas	Étude multi-cas portant sur les difficultés rencontrées par les PME manufacturières en Italie et les actions entreprises par elles.
Cimini et al. (2020)			Étude de cas	Étude multi-cas portant sur comment les technologies 4.0 affectent les changements organisationnels des PME manufacturières.

Une étude de cas a mis de l'avant comment différentes PME manufacturières ont adressé les défis qu'elles ont rencontrés par des actions concrètes de gestion. Zangiacomi et al. (2020) ont en effet rattaché plusieurs actions à la résolution de problèmes de gestion rencontrés par des PME manufacturières, par exemple la nécessité de construire une feuille de route technologique 4.0 afin de clarifier la stratégie numérique de l'entreprise, ou encore d'adopter des pratiques de Lean avant d'entamer certains projets de transformation numérique. Au total, 15 défis ont été identifiés et 4 à 5 actions par défi ont été proposées par ces PME manufacturières.

2.1.2 Les facteurs de succès critiques de l'Industrie 4.0

Les facteurs de succès critiques sont des éléments permettant d'assurer le succès de la transformation 4.0 en PME. Récemment, plusieurs études ont identifié les facteurs de succès critiques nécessaires pour la gestion de la transformation numérique en PME manufacturière. Ces facteurs de succès critiques ont été identifiés au travers d'une revue de littérature structurée (Pozzi et al., 2021; Shinohara et al., 2017; Sony & Naik, 2019; Vrchota et al., 2021), d'étude Delphi (Françoise et al., 2009; Moeuf et al., 2019), et d'études de cas (Cimini et al., 2020). Les Tableaux 2.2 et 2.3 présentent ces facteurs de succès.

Tableau 2.2 – Facteurs de succès critiques de l'Industrie 4.0

Facteurs de succès	Définition	Références
Alignement de la stratégie d'Industrie 4.0 et de la stratégie d'affaires	La PME manufacturière doit s'assurer que sa stratégie numérique supporte les objectifs à court, moyen et long terme de sa stratégie d'affaires.	(Shinohara et al., 2017; Sony & Naik, 2019)
Leadership	La PME manufacturière doit assurer la présence d'un leadership fort à chaque étape de sa transformation numérique.	(Françoise et al., 2009; Moeuf et al., 2019; Pozzi et al., 2021)
Alignement et engagement des lignes hiérarchiques	La PME manufacturière doit assurer l'alignement et l'engagement de tous les niveaux hiérarchiques de l'entreprise.	(Moeuf et al., 2019)
Effectuer une étude avant les projets d'Industrie 4.0	La PME manufacturière doit effectuer une étude de sa situation actuelle avant de débiter sa transformation numérique.	(Moeuf et al., 2019; Shinohara et al., 2017; Sony & Naik, 2019)
Communication	La PME manufacturière doit créer et mettre en place un plan de communication.	(Françoise et al., 2009; Moeuf et al., 2019).
Composition et gestion des équipes	La PME manufacturière doit mettre en place une équipe de projets 4.0 et assurer sa gestion et coordination.	(Moeuf et al., 2019; Müller, R. et al., 2012; Müller, R. & Turner, 2007)

Tableau 2.3 – Facteurs de succès critiques de l’Industrie 4.0 (suite et fin)

Facteurs de succès	Définition	Références
Formation des employés et gestion des connaissances	La PME manufacturière doit documenter sa transformation numérique et former ses employés sur les nouvelles technologies.	(Françoise et al., 2009; Moeuf et al., 2019; Shinohara et al., 2017; Sony & Naik, 2019)
Culture organisationnelle et gestion du changement	La PME manufacturière doit mettre en place une culture organisationnelle propice à sa transformation numérique et gérer le changement.	(de Sousa Jabbour et al., 2018; Françoise et al., 2009; Moeuf et al., 2019; Sony & Naik, 2019)
Gestion de projet	La PME manufacturière doit utiliser les processus et outils d’une saine gestion de projets.	(Moeuf et al., 2019; Sony & Naik, 2019)
Amélioration continue	La PME manufacturière doit assurer l’alignement de sa transformation numérique avec sa stratégie d’amélioration continue.	(Moeuf et al., 2019; Müller, J. M. et al., 2020; Shinohara et al., 2017; Zangiacomi et al., 2020)

2.2 Échelle de maturité « 4.0 »

Afin de lancer une transformation, il est recommandé par plusieurs chercheurs et gouvernements de débiter le processus de transformation par une évaluation du niveau actuel de l’entreprise en termes de maturité et de préparation 4.0 (Khan & Turowski, 2016; Mittal, Khan, et al., 2018; Zangiacomi et al., 2018). Cette évaluation de la maturité permet non seulement de comparer les systèmes et les processus d’une entreprise avec les principes d’Industrie 4.0, mais aussi de déterminer les points à améliorer, leur permettant ainsi de focaliser leurs efforts de transformation sur certains points.

On définit une échelle de maturité comme un ensemble de plateaux évolutifs bien définis qui établissent un niveau de capacité d’amélioration des aptitudes d’une main-d’œuvre ou d’une entreprise. Chaque niveau de maturité spécifie certaines caractéristiques pour les processus, les niveaux de maturité plus élevés ayant des caractéristiques plus avancées et représentant une étape vers la réalisation d’un processus mature, fournissant un ensemble d’objectifs qui, lorsqu’ils sont satisfaits, placent une organisation au niveau de maturité suivante (IGI Global). Le terme « préparation » (*readiness*) est également associé aux échelles de maturité et est dans certains cas utilisé de façon interchangeable pour parler de la maturité.

Plusieurs échelles de maturité en lien avec l’Industrie 4.0 ont été développées au cours des dernières années, la majorité d’entre elles basée sur d’anciennes échelles de maturité en innovation et en système TI (De Carolis, Macchi, Kulvatunyou, et al., 2017; Leyh et al., 2016; Mittal, Khan,

et al., 2018; Schumacher et al., 2016; Unterhofer et al., 2018). Ces échelles mesurent en général des éléments comme le niveau de maturité technologique en lien avec l'Industrie 4.0, mais également la maturité en lien avec la stratégie, la culture de l'entreprise, les processus, etc. (De Carolis, Macchi, Kulvatunyou, et al., 2017; Leyh et al., 2016; Mittal, Khan, et al., 2018; Schumacher et al., 2016; Unterhofer et al., 2018). Les Tableaux 2.4 et 2.5 ci-dessous résume différentes études en lien avec des échelles de maturité reliées à l'Industrie 4.0.

Tableau 2.4 - Résumé de littérature sur les échelles de maturités 4.0

Auteur	Type d'étude	Résumé
Akdil et al. (2018)	Développement de modèle	Modèle de maturité 4.0 centré sous des dimensions rattachées aux processus d'affaires de l'entreprise.
Anggrahini et al. (2018)	Développement de modèle	Échelle de préparation 4.0 adressée aux PME en transformation du thon en Indonésie.
Basl (2017)	Quantitative	Résultat d'un questionnaire adressé aux PME en République tchèque sur leur niveau de préparation à l'implantation des principes de l'Industrie 4.0.
Basl (2018)	Revue de littérature	Analyse de modèle de maturité d'Industrie 4.0 dans le but d'ajouter une dimension en lien avec les systèmes de gestion d'entreprise ERP.
Bibby et Dehe (2018)	Quantitative	Étude servant à déterminer le niveau de maturité en Industrie 4.0 du domaine de la défense en fonction de différent groupe technologique.
Brozzi et al. (2018)	Revue de littérature	Étude et analyse servant à présenter les approches utilisées afin de développer un outil d'auto-évaluation de maturité 4.0.
Canetta et al. (2018)	Développement de modèle	Proposition d'un modèle d'évaluation de maturité 4.0 divisé en 5 dimensions : Stratégie, Processus, technologies, Produits & Services, et Personnes.
De Carolis, Macchi, Kulvatunyou, et al. (2017)	Revue de littérature	Étude servant au développement d'une échelle de maturité autour de la numérisation des processus des entreprises basés sur plusieurs échelles de maturité en technologie.
De Carolis, Macchi, Negri, et al. (2017)	Développement de modèle	Proposition d'un modèle de maturité 4.0 du nom de DREAMY divisé en dimension de gestion du domaine manufacturier (ingénierie, production, logistique, etc.).
Gamache et al. (2019)	Développement de modèle	Proposition d'un modèle d'évaluation de la performance numérique des PME manufacturières du Québec.
Gökalp et al. (2017)	Développement de modèle	Proposition d'un modèle de maturité en 6 dimensions d'aptitude de l'application du 4.0 au sein de l'entreprise allant du niveau 0 : « Incomplete » jusqu'au niveau 5 : « Optimizing ».
Jung et al. (2016)	Développement de modèle	Proposition d'un modèle de « Smart Readiness System Readiness Assessment » permettant d'évaluer le niveau de maturité technologique des entreprises intelligentes.

Tableau 2.5 - Résumé de littérature sur les échelles de maturités 4.0 (suite et fin)

Auteur	Type d'étude	Résumé
Leyh et al. (2017)	Test de modèle	Test du modèle de maturité SIMMI 4.0 auprès de 6 entreprises manufacturières afin d'évaluer la compréhension du modèle et comparaison avec une auto-évaluation des entreprises.
Leyh et al. (2016)	Développement de modèle	Proposition du modèle de maturité SIMMI 4.0 divisé en 4 dimensions en lien avec les intégrations verticales et horizontales des systèmes, le développement de produit numérique et le niveau technologique.
Mittal, Khan, et al. (2018)	Revue de littérature	Développement d'une échelle de maturité 4.0 basé sur les échelles de maturité des systèmes d'information manufacturiers axés sur le niveau d'implantation de technologies spécifiques.
Mittal, Romero, et al. (2018)	Développement de modèle	Proposition du modèle SM ³ E et exemple d'utilisation du modèle pour l'évaluation de la maturité d'une entreprise en lien avec les technologies infonuagiques.
Modrak et al. (2019)	Développement de modèle	Proposition d'un modèle d'auto-évaluation de maturité et de feuille de route 4.0 divisé en 3 dimensions testé auprès de 5 entreprises à l'aide d'un questionnaire.
Rübel et al. (2018)	Développement de modèle	Proposition d'un modèle de maturité permettant d'évaluer la gestion de modèle d'affaire dans l'Industrie 4.0.
Samaranayake et al. (2017)	Revue de littérature	Étude visant l'évaluation de facteur favorisant l'implantation de l'industrie sous la loupe de dimension de préparation technologique.
Schumacher et al. (2016)	Développement de modèle	Modèle de maturité basé sur d'autres modèles prenant en compte des éléments comme la culture, la gouvernance, la stratégie et les formes de leadership dans l'entreprise.
Schumacher et al. (2019)	Développement de modèle	Mise à jour du modèle ci-dessus basé sur 45 nouveaux articles portant sur l'Industrie 4.0, dont 20 portants sur l'évaluation de la maturité 4.0.
Scremin et al. (2018)	Développement de modèle	Proposition d'un modèle de maturité 4.0 testé auprès d'entreprises canadiennes et italiennes.
Sheen et Yang (2018)	Quantitative	Étude visant à évaluer le niveau de maturité 4.0 des entreprises sud-coréennes.
Shinohara et al. (2017)	Développement de modèle	Développement d'une liste de facteur de succès critique divisé en 5 catégories facilitant l'implantation de technologies numériques dans le contexte de l'Industrie 4.0.
Unterhofer et al. (2018)	Revue de littérature	Étude sur les forces et faiblesses de quelques échelles de maturité en lien avec le 4.0 incluant l'échelle de Schumacher (2016).
Viharos et al. (2017)	Quantitative	Utilisation d'un modèle de maturité permettant d'évaluer le niveau de maturité et de préparation en Industrie 4.0 de différents pays d'Europe.

2.2.1 Dimensions de la maturité 4.0 et types de modèle

Les échelles de maturités 4.0 peuvent prendre plusieurs formes et dimensions en fonction des éléments que celles-ci cherchent à mesurer. En effet, certaines études se concentrent sur les aspects techniques (Basl, 2018; Canetta et al., 2018; Mittal, Romero, et al., 2018; Schumacher et al., 2016) alors que d'autres vont incorporer des éléments de processus et de stratégie (De Carolis, Macchi, Negri, et al., 2017; Leyh et al., 2016).

Une grande majorité des échelles de maturité dans la littérature vont porter sur des dimensions en lien direct avec l'utilisation et la gestion de technologies rattachées à l'Industrie 4.0. D'un côté, nous allons retrouver des échelles faisant état du niveau d'utilisation de chacune des technologies rattachées à l'Industrie 4.0 (Basl, 2018; Mittal, Romero, et al., 2018). D'un autre côté, l'aspect technologique sera abordé en un tout et portera principalement sur la gestion de cette technologie (De Carolis, Macchi, Negri, et al., 2017; Leyh et al., 2016). D'autres dimensions vont également porter sur la présence et l'alignement d'une stratégie officielle de transformation 4.0 ainsi que sur différents aspects comme la culture et la gestion des processus de l'entreprise (De Carolis, Macchi, Negri, et al., 2017; Leyh et al., 2016; Rübel et al., 2018). Il est également à noter que plusieurs des dimensions proposées au sein des différentes échelles possèdent des sous-dimensions.

Les niveaux de ces dimensions et leur définition varient grandement d'une échelle de maturité à l'autre. Cependant, il est possible de constater que le dernier niveau de ces échelles représente la définition de cette dimension dans un contexte d'Industrie 4.0 tel que défini par le créateur de l'échelle. Certaines échelles vont utiliser un pointage quantitatif de 1 à 5 pour chacune des sous-dimensions et vont effectuer une moyenne des scores de chacune des sous-dimensions afin d'obtenir le score de cette dimension. Les résultats quantitatifs sont par la suite représentés par le biais de graphiques de type radar (De Carolis, Macchi, Negri, et al., 2017). Certaines échelles vont, quant à elles, utiliser des niveaux qualitatifs afin de représenter la maturité de l'entreprise et ne tenteront pas de quantifier la maturité de l'entreprise (Leyh et al., 2016).

2.2.2 Rôle des échelles de maturité 4.0

L'utilisation des échelles de maturité est très souvent référée comme étant l'une des premières étapes de la transformation 4.0. Il est important de bien comprendre le rôle que les échelles de maturité peuvent jouer lors des étapes de lancement de la transformation 4.0 en PME.

2.2.2.1 Mesure du niveau de maturité de l'entreprise et définition d'objectif

Tout d'abord, comme leur nom l'indique, les échelles de maturité servent avant tout à mesurer la maturité d'une entreprise par rapport à un domaine donné, selon diverses dimensions dont on mesure le niveau d'efficacité, le niveau d'efficacité le plus élevé témoignant d'un niveau de maturité plus élevé de l'entreprise dans cette dimension. Tel que mentionné plus tôt, plusieurs échelles de maturité de l'Industrie 4.0 existent dans la littérature académique et le rôle principal de chacune de ces échelles est de mesurer le niveau de maturité de l'entreprise désirant évoluer vers l'Industrie 4.0. Grâce aux résultats de ces échelles, l'entreprise estime son niveau par rapport à une définition précise de l'Industrie 4.0 et se compare avec ses pairs lorsque des moyennes de maturité de certains secteurs sont disponibles. Ces échelles servent à estimer leurs forces et leurs faiblesses en lien avec chacune des dimensions et ainsi à définir des objectifs de transformation 4.0 clairs, en vue d'atteindre un niveau de maturité supérieur dans chacune de ces dimensions.

2.2.2.2 Identification d'opportunités de transformation 4.0

Certaines échelles ont également été conçues afin d'identifier différentes opportunités de transformation 4.0 au sein des entreprises (Basl, 2018; Canetta et al., 2018; Gamache, 2019; Gökalp et al., 2017; Leyh et al., 2016; Modrak et al., 2019) et ainsi de définir des projets qui pourront constituer un portefeuille de projets de transformation 4.0. Ces échelles de maturité sont généralement centrées sur des dimensions de type technologies et processus et possèdent des niveaux axés sur le niveau d'intégration de ces technologies au sein de l'entreprise ainsi que sur le niveau de complexité de ces technologies (Basl, 2018; Canetta et al., 2018; De Carolis, Macchi, Negri, et al., 2017; Leyh et al., 2016).

Ces échelles jouent donc un rôle important durant les étapes de lancement de projet puisqu'elles guident l'établissement des objectifs des initiatives de transformation 4.0 visés par l'entreprise, et contribuent ainsi à définir la direction de la transformation 4.0 de l'entreprise.

2.2.2.3 Sélection de technologies et d'initiatives de transformation 4.0

Récemment, il a été démontré qu'il était possible d'utiliser une échelle de maturité afin d'aider à la sélection de technologies et d'initiatives 4.0 au sein d'une PME (Gamache, 2019). En effet, dans le cadre de sa thèse doctorale, Gamache a été en mesure de rattacher des regroupements technologiques facilitant le passage à l'Industrie 4.0 aux différents niveaux et dimensions de son échelle de maturité, afin d'identifier les regroupements technologiques prioritaires qu'une entreprise devra implanter en fonction de son niveau de maturité actuel.

L'utilisation de l'échelle de maturité a donc permis d'identifier les objectifs des initiatives 4.0 de l'entreprise en plus de sélectionner les technologies nécessaires pour accomplir ces initiatives, menant ainsi à l'obtention d'un premier ensemble de projets de transformation 4.0 pour l'entreprise.

2.3 Modèle et outil de gestion de portefeuille de projets

Le très grand nombre d'opportunités que peuvent poursuivre les PME par l'entremise de leur transformation numérique est aussi un enjeu important. Ces opportunités étant exécutées sous forme de projets, les pratiques de gestion de portefeuille de projets pourraient contribuer à résoudre cette problématique. Un portefeuille de projets est ici défini comme un ensemble de programmes, projets ou opérations gérés en tant que groupe pour atteindre des objectifs stratégiques. Les composantes du portefeuille peuvent ne pas être nécessairement interdépendantes ou avoir des objectifs connexes. Les composantes du portefeuille sont quantifiables, c'est-à-dire qu'elles peuvent être mesurées, classées et hiérarchisées. (Project Management Institute, 2013).

La gestion de portefeuille de projets est la gestion coordonnée d'un ou de plusieurs portefeuilles en vue de la réalisation des stratégies et des objectifs de l'organisation. Cela inclut les processus organisationnels interdépendants selon lesquels une organisation évalue, sélectionne, hiérarchise et alloue ses ressources internes limitées afin de réaliser au mieux des stratégies organisationnelles compatibles avec sa vision, sa mission et ses valeurs. La gestion de portefeuille fournit des informations précieuses pour appuyer ou modifier les stratégies organisationnelles et les décisions d'investissement. (Project Management Institute, 2013).

La gestion de portefeuille de projets comporte également plusieurs processus et outils servant à structurer la gouvernance d'un portefeuille de projet et de son processus, définir les objectifs d'un portefeuille de projets, sélectionner, prioriser et séquencer les projets d'un portefeuille, gérer les risques et gérer la performance d'un portefeuille de projets. (Project Management Institute, 2013).

À l'intérieur de cette section, nous nous attarderons aux outils et processus pouvant contribuer à résoudre notre problématique de recherche, soit aux éléments de structure et gouvernance des portefeuilles de projets, des outils et modèles de sélection de projets et des interdépendances de projets.

2.3.1 Gestion de portefeuille de projets TI et 4.0

Puisque la transformation 4.0 implique l'implantation et la gestion de technologie de l'information, il est essentiel de mieux comprendre la littérature en lien avec la gestion de portefeuille de projets dans le domaine des TI. Plusieurs recherches en lien avec la gestion des portefeuilles de projets TI ont eu lieu au cours des dernières années. En fait, une simple recherche sur Compendex avec des termes rattachés à la gestion de portefeuille de projets et aux technologies TI permet de ressortir près de 430 articles. Dans le cadre de cette revue de littérature, nous nous concentrerons sur les recherches portant sur la gestion de portefeuille de projets TI et plus précisément les études détaillant les méthodologies de gestion de portefeuille de projet ou encore proposant des modèles pouvant potentiellement être appliqués dans un contexte de transformation 4.0 en PME manufacturière. Les Tableau 2.6 et 2.7 résume cette revue.

Tableau 2.6 - Résumé de littérature sur la gestion de portefeuille de projets TI

Auteur	Type d'étude	Résumé
Amberg et Lang (2009)	Théorie enracinée	Recherche servant à mettre de l'avant les façons de concevoir un portefeuille de projet TI afin de supporter l'innovation au sein d'une entreprise.
Cubeles-Marquez (2008)	Proposition de modèle	Article portant sur la proposition d'un modèle de gestion de portefeuille de projet TI axé et sur l'importance de l'alignement du portefeuille de projet avec une stratégie TI.
Reyck et al. (2005)	Proposition de modèle	Proposition d'un modèle de gestion de portefeuille de projet TI incluant une analyse de l'impact de l'implantation ainsi qu'une approche d'implantation par phase.

Tableau 2.7 - Résumé de littérature sur la gestion de portefeuille de projets TI (suite et fin)

Auteur	Type d'étude	Résumé
Frey et Buxmann (2011)	Recherche qualitative	Recherche auprès d'une douzaine d'entreprises permettant de mieux comprendre la gouvernance entourant la gestion des portefeuilles de projet TI au sein des organisations, avec une emphase sur la sélection de projets, gestion des demandes et gestion des ressources.
Frey et Buxmann (2012)	Revue de littérature	Revue de littérature structurée catégorisant les dernières recherches au niveau de la gouvernance des portefeuilles de projets TI, leur structure, les facteurs de succès, et les modèles et système de support de décision.
Gleisberg et al. (2008)	Étude multi-cas	Recherche qualitative permettant de mieux comprendre les processus de prises de décisions et la gouvernance des portefeuilles de projet TI.
Hansen et Kræmmergard (2014)	Revue de littérature	Revue de littérature structurée permettant de diviser la littérature sur les portefeuilles de projet TI en 4 catégories de discours, soit les discours critique, dialogique, interprétatif et normatif.
Prifling (2010)	Étude de cas	Étude de cas permettant d'évaluer l'influence de la culture organisationnelle (divisé en 3 catégories : sauvegarde, consensus et durabilité) sur la gestion des portefeuilles de projets TI.
Richard et al. (2021)	Proposition de modèle	Proposition d'un modèle de gestion de portefeuille de projets 4.0 adressé aux entreprises manufacturières, basé les modèles les plus pertinents ainsi que sur la définition des méthodologies de transformation d'entreprise.

Comme le démontre le Tableau 2.6, les recherches en lien avec la gestion de portefeuille de projets TI sont très diversifiées et portent sur des sujets comme l'impact du portefeuille de projets sur l'innovation de l'entreprise, les phases d'implantation des processus de portefeuille de projets, la structure et la gouvernance des portefeuilles de projets. D'autres recherches portent également sur les méthodes de sélections de projets et les interdépendances de projets, cependant ces articles seront traités dans les sections 0 et 2.3.3 de ce chapitre. Un papier en particulier a proposé un modèle de gestion de portefeuille de projets de transformation 4.0 adressé expressément aux entreprises manufacturières, détaillant les phases et livrables du modèle et leurs interactions (Richard et al., 2021).

Les portefeuilles de projets TI ont en général une structure et des pratiques similaires à la gestion de portefeuille du PMI, mais mettent de l'avant certaines particularités et caractéristiques des projets TI, tels que le fait que ces projets affectent l'ensemble des départements des entreprises et ont donc besoin d'un apport de l'ensemble des départements d'affaires (Amberg & Lang, 2009), ainsi que de l'alignement des projets à une stratégie TI reliée à la stratégie d'affaires de l'entreprise (Cubeles-Marquez, 2008).

Bien entendu, il n'est pas nécessaire d'implanter l'ensemble des pratiques en gestion de portefeuille de projets pour obtenir des gains de performance. En effet, Reyck et al. (2005) proposent une approche d'implantation en trois phases, soit une phase d'inventaire de portefeuille, une phase d'administration de portefeuille et une phase d'optimisation du portefeuille.

L'implantation de ces phases, détaillées dans le Tableau 2.8, à différent niveau de maturité de l'entreprise permet à celle-ci de gagner des gains petit à petit sur ses projets sans toutefois avoir à implanter l'ensemble des pratiques en gestion de portefeuille de projets TI.

Tableau 2.8 - Phase d'implantation des processus de gestion de portefeuille de projets TI (Reyck et al., 2005)

Phase	Processus implanté
Inventaire de portefeuille	• Centralisation de l'administration des projets • Procédure d'évaluation des risques • Incorporation des contraintes de ressources • Augmentation de la responsabilité des gestionnaires d'entreprise sur la réussite des projets
Administration de portefeuille	• Catégorisation des projets • Évaluation de l'impact du portefeuille de projet sur les clients des projets
Optimisation de portefeuille	• Comité de portefeuille de projet • Évaluation de la valeur financière du portefeuille • Gestion de l'interdépendance des projets • Suivi des bénéfices des projets

2.3.2 Sélection de projets

La sélection de projets est l'un des processus critiques de tout portefeuille de projets puisque celle-ci déterminera l'ensemble du portefeuille et ultimement la performance de celui-ci. Ces outils permettent de choisir les projets à prioriser en utilisant différentes méthodes et critères et peuvent donc contribuer au succès d'une transformation numérique en assurant que les bons projets soient sélectionnés au lancement et en cours de transformation.

Il existe plusieurs outils et modèles de sélection de projets au sein d'un portefeuille. Ceux-ci emploient très souvent des méthodes de pointages et de critères multiples afin de comparer les projets les uns aux autres et ainsi effectuer une sélection de projets qui maximisera les retombées du portefeuille (Danesh et al., 2018).

Plusieurs outils théoriques peuvent être retrouvés dans la littérature puisqu'aucun outil de sélection de projets n'a été démontré comme étant « universel », chaque outil étant approprié pour certains

types de projets ou type de portefeuille et sous certaines conditions (Danesh et al., 2018). Le Tableau 2.9 résume l'ensemble de la littérature sur les méthodes de sélection de projets qui a été revu pour ce projet de recherche.

Tableau 2.9 - Résumé de littérature sur les outils de sélection de projets

Auteurs	Type d'étude	Résumé
Alvarez-García et Fernández-Castro (2018)	Développement de modèle	Modèle mathématique de sélection de projets prenant en compte des contraintes financières et non financières en plus de considérer les dépendances entre les projets.
Archer et Ghasemzadeh (1999)	Développement de modèle	Cadre d'un processus de sélection de projets avec des critères de sélection à très haut niveau.
Bhattacharyya et al. (2011)	Développement de modèle	Modèle mathématique de type « fuzzy » servant à la sélection de projets de R&D interdépendants et testés avec un portefeuille de projet de R&D d'une entreprise de génie civil et mécanique indienne.
Danesh et al. (2018)	Revue de littérature	Revue de littérature sur les différentes méthodes de sélection de projets et sur les critères pour sélectionner l'outil adapté à son contexte.
Gamache (2019)	Thèse doctorale	Thèse doctorale portant sur le niveau des PME québécoises en 4.0 et présentant un modèle de sélection de technologie basé sur le niveau de maturité présent et souhaité.
Henriksen et Traynor (1999)	Développement de modèle	Proposition d'un modèle d'analyse multicritère servant à évaluer et sélectionner les projets de R&D d'une entreprise.
Isikli et al. (2018)	Développement de modèle	Modèle mathématique servant à la sélection de projets numériques basé sur les coûts, résultats, ressources et dépendances des projets.
Karasakal et Aker (2017)	Développement de modèle	Modèle mathématique et critères permettant la priorisation et sélection de projets de R&D. Les critères développés portent sur les caractéristiques technologiques du projet, la planification de celui-ci et l'impact économique du projet.
Kundisch et Meier (2011)	Revue de littérature	Revue de littérature portant sur les interactions des projets TI et leur impact sur leur sélection.
Lawson et al. (2006)	Développement de modèle	Modèle de sélection de projets de R&D passant par un nouveau processus ainsi qu'une approche multicritère avec des critères prédéfinis axés sur des éléments techniques des projets, mais également sur des éléments financiers comme les flux de trésorerie.
Meade et Presley (2002)	Développement de modèle	Modèle de sélection de projets de R&D utilisant un processus de réseau analytique plutôt qu'une approche multicritère qui a été testé avec une entreprise américaine de haute technologie.
Shakhsi-Niaei et al. (2011)	Développement de modèle	Modèle et processus de sélection de projets utilisant des critères d'incertitude et en utilisant des simulations de Monte-Carlo.

Comme il est possible de le constater en regardant le Tableau 2.9, les courants de recherche actuels portent pour la plupart sur la création d'outils de sélection spécialisés, basés sur les principes de modèles plus généralistes. La majorité de ces outils reste encore théorique, la plupart n'ayant été testée qu'avec un exemple d'un portefeuille de projets ou deux d'une entreprise. Leur efficacité dans un contexte d'entreprise n'a donc pas été démontrée pour la plupart d'entre eux.

La majorité des outils de sélection de projets est présentée sous la forme de « Multi-Criteria Decision Model » ou MCDM (Danesh et al., 2018). Les MCDM fonctionnent sous le principe d'un système de pointage accordé à plusieurs éléments d'un projet, en vue d'effectuer une sélection des projets basés sur le total du pointage et ainsi de maximiser les bénéfices du portefeuille de projets. Ces méthodes MCDM servent à évaluer aussi bien de façon quantitative que qualitative les différents projets d'un portefeuille par l'entremise de pointage et de poids. Il est à noter que le pointage de critère qualitatif reste subjectif au gestionnaire et à l'entreprise qui l'évalue (Danesh et al., 2018).

Il est également à noter que plusieurs défis peuvent être reliés à la sélection de projets (Danesh et al., 2018; Kundisch & Meier, 2011), notamment :

- Les incertitudes et risques d'un projet;
- Les interdépendances entre les projets;
- La complexité d'utilisation des outils de sélections;
- Les types de mesures (quantitatif vs qualitatif);
- Le nombre de projets;
- Les compromis entre projets;
- Les groupes de preneurs de décision; et
- Les liens entre les projets et la stratégie.

Plusieurs auteurs ont suggéré que les méthodes et outils permettant de sélectionner la bonne méthodologie de MCDM doivent être simples, faciles à comprendre, opérationnels, complets, non redondants et essentiels (Al-Kloub et al., 1997; Bouyssou, 1990; Danesh et al., 2018; Georgopoulou et al., 1997).

Récemment, certaines méthodes ont été développées pour traiter justement de la sélection de projets 4.0 en PME. Un des modèles suggérés est un modèle mathématique prenant en compte l'effort, le budget, la durée ainsi que les interdépendances séquentielles entre les projets (Isikli et al., 2018). Le modèle permet d'obtenir une sélection de projets dans un cas où un ensemble de ressources internes est disponible pour la durée d'une année (Isikli et al., 2018). D'autres écrits récents ont porté sur l'utilisation d'une échelle de maturité pour identifier et sélectionner les technologies qui feront partie du portefeuille de projets de transformation 4.0 de la PME (Gamache, 2019) alors que d'autres ont porté sur un modèle de sélection de projets 4.0 applicable en PME (Richard et al., 2021).

2.3.3 Interdépendance des projets

Un des éléments des projets 4.0 venant contribuer à la problématique de cette recherche se retrouve au niveau de l'interdépendance des projets 4.0 qui complexifie grandement le processus de sélection de projets et de démarrage de la transformation 4.0 de la PME. En effet, des interdépendances de projet peuvent exister lorsqu'un projet est partiellement ou totalement influencé par un autre projet en vue de son développement ou, littéralement, lorsque le succès d'un projet dépend d'un autre projet (Killen & Kjaer, 2012). Cela est notamment vrai pour les projets de transformation 4.0 en PME qui nécessitent un partage des ressources stratégiques ainsi que la mise en place de technologies et processus pouvant s'influencer mutuellement.

Depuis quelques années, plusieurs chercheurs se sont attardés à l'impact des interdépendances des projets sur plusieurs autres concepts, outils et processus comme la gestion et la sélection des projets au sein d'un portefeuille de projets. Le Tableau 2.10 résume la littérature sur le sujet.

Tableau 2.10 - Résumé de littérature sur les interdépendances de projets

Auteurs	Type d'étude	Résumé
Alvarez-García et Fernández-Castro (2018)	Développement de modèle	Modèle de sélection de projets prenant en compte les dépendances entre les projets comme critère de sélection.
Bathallath et al. (2017)	Étude de cas	Recherche qualitative sur la gestion des interdépendances au niveau des projets TI. La recherche a fait ressortir plusieurs défis de la gestion des interdépendances, notamment au niveau de la planification et de l'implémentation des projets.
Bathallath et al. (2016)	Revue de littérature	Revue de littérature structurée qui a permis de recenser les différentes catégories et interaction d'interdépendances de projet.
Bhattacharyya et al. (2011)	Développement de modèle	Modèle de sélection de projets de R&D intégrant les interdépendances de projet à l'intérieur d'un algorithme flou (fuzzy).
Isikli et al. (2018)	Développement de modèle	Modèle de sélection de projets 4.0 intégrant des critères d'interdépendances avec des interactions séquentielles (dépendance entre projets).
Killen et Kjaer (2012)	Développement de modèle	Développement d'une approche de visualisation des interdépendances basées sur un affichage réseau des projets qui a été bien reçu par les gestionnaires de PME.

Il existe plusieurs sortes d'interdépendances que l'on peut retrouver dans des portefeuilles de projets reliés aux projets TI/IS (Bathallath et al., 2016), comme le souligne le Tableau 2.11.

Tableau 2.11 - Type d'interdépendance

Interdépendance	Description
Interdépendances de ressources	Survient lorsqu'il y a un besoin de partage de ressources entre les projets d'un même portefeuille.
Interdépendance technologique	Survient lorsqu'il y a un besoin d'utiliser des technologies communes entre projets.
Interdépendance technique	Survient lorsque le succès technique d'une activité de projet affecte les probabilités de succès d'une activité d'un autre projet.
Interdépendance de marché	Survient dans le cas d'introduction de nouveaux produits dans le marché d'un produit existant.
Interdépendance d'apprentissage	Survient lorsque les connaissances acquises d'un projet sont utilisées pour la réussite d'un autre projet.

Les interdépendances peuvent également être à la fois groupées, séquentielles et réciproques (Thompson, 2003). L'interdépendance groupée est une association homogène entre des projets constituant un portefeuille, l'un des résultats d'un projet pouvant avoir une incidence indirecte sur

la performance du portefeuille de projets dans son ensemble et donc d'autres projets contributifs (Bathallath et al., 2016).

Une interdépendance séquentielle est une relation en série entre deux interdépendances de gestion de portefeuilles de projets ou lorsqu'un projet nécessite la production d'un autre projet en tant que contribution à son avancement (Bathallath et al., 2016). Une interdépendance réciproque est une relation mutuelle entre deux projets ou plus. Cela signifie que le portefeuille de projets devient plus complexe en raison non seulement d'un degré accru de contingence, mais également du recours accru à la coordination grâce à un ajustement mutuel (Bathallath et al., 2016). Qui plus est, les interdépendances de projets peuvent avoir trois types d'interactions possibles tels que présentés dans le Tableau 2.12 (Bathallath et al., 2016; Kundisch & Meier, 2011).

Tableau 2.12 - Type d'interactions des interdépendances

Interdépendance	Description
Interaction Ressources-Ressources	Survient lorsqu'il y a un besoin de partage de ressources entre 2 projets ou plus.
Interactions Résultats-Résultats	Survient lorsque les résultats d'un projet affectent les résultats d'un autre projet.
Interactions Résultats-Ressources	Survient lorsque les résultats d'un projet affectent la disponibilité des ressources d'un autre projet.

Ces interactions peuvent également être compétitives (interaction négative) ou complémentaires (interaction positive) (Kundisch & Meier, 2011)

La gestion des interdépendances de projets est très complexe et influence aussi bien les méthodes de sélection et de priorisation de projets (Alvarez-García & Fernández-Castro, 2018) que l'analyse des risques des projets (Bhattacharyya et al., 2011; Killen & Kjaer, 2012; Singla, 2010). Une mauvaise gestion des interdépendances des projets au sein d'un portefeuille peut résulter en plusieurs problématiques (Bathallath et al., 2016):

- Gaspillage de ressources;
- Retard sur les échéanciers;
- Dépassement des budgets; et
- Compétition entre les projets.

Jusqu'à présent, la majorité des recherches retrouvées sur le sujet ont porté sur la gestion des interdépendances des projets, les risques associés et leur impact sur des outils de sélections de projets. Cependant certains auteurs se sont attardés à la visualisation des interdépendances de projets comme outil pouvant faciliter leur gestion (Bathallath et al., 2016, 2017; Killen & Kjaer, 2012; Singla, 2010).

Plusieurs outils de visualisation des interdépendances de projets sont disponibles dans la littérature, les plus récents tentant de représenter les interdépendances sous forme de réseaux (Killen & Kjaer, 2012).

2.4 Revue critique

Suite à cette revue de littérature, il est important de comparer chacune des notions étudiées avec la problématique de recherche afin d'en faire ressortir les points forts et les lacunes permettant ainsi de mettre de l'avant les objectifs de cette recherche doctorale.

Des études de cas et des entrevues auprès d'experts et de gestionnaires de PME (Moeuf et al., 2019; Zangiacomi et al., 2020) ont fait le point sur les difficultés pour les gestionnaires d'entamer leur transformation numérique et d'assurer la réussite de celle-ci. De ces études sont ressorties les problèmes de gestion de l'ensemble des projets, du manque d'expertise aussi bien technique et managériale et du manque de ressources compétentes pour naviguer cette transformation 4.0 (Moeuf et al., 2019; Mueller et al., 2017; Singla, 2010; Zangiacomi et al., 2020). Pour répondre à ces problématiques, ceux-ci ont donc offert plusieurs suggestions sous la thématique de « meilleures pratiques » (Zangiacomi et al., 2020). Malheureusement, ces suggestions restent anecdotiques et ne permettent de répondre complètement à la question de recherche, notamment sur les éléments et pratiques déjà en place au sein de ces entreprises qui leur ont permis de faciliter la gestion de leur transformation 4.0, la façon dont ces entreprises se sont structurées pour réaliser leurs projets ainsi que les approches que ces entreprises ont prises afin d'exécuter leurs projets de transformation 4.0.

Des études ont été effectuées sur les facteurs de succès critiques nécessaires à la réussite des projets de transformation 4.0. Même si plusieurs facteurs de succès critiques ont été identifiés par le biais de revue de littérature et d'étude Delphi avec des experts, ceux-ci restent génériques et les

chercheurs ne démontrent pas comment ces facteurs doivent être implantés et supportés par la PME manufacturière. D'autres études en lien avec les facteurs de succès critiques appliqués dans le contexte de projet numérique majeur ont démontré des actions concrètes pour l'implantation et le support de ces facteurs. Malheureusement, ces actions n'ont été identifiées que dans le contexte d'un projet unique et ne prennent pas en compte le contexte de projets itératifs propres à la transformation numérique des PME manufacturières.

Du côté des échelles de maturités, la section 2.2.2 a démontré que celles-ci sont en mesure de jouer plusieurs rôles lors de la transformation 4.0 d'une entreprise. Bien qu'elles soient en mesure d'agir en tant qu'outil de diagnostic permettant d'un côté d'identifier le niveau de l'entreprise face à une définition de l'Industrie 4.0 et d'un autre d'identifier les pistes de solutions potentielles afin d'augmenter cette maturité, celles-ci ne sont pas en mesure de résoudre entièrement la problématique de recherche. En effet, tel qu'il est possible de constater dans la section 0, les échelles de maturité permettent d'identifier le statut de l'entreprise face à l'Industrie 4.0 sous diverses dimensions, allant des niveaux de maturité technologique aux processus de gestion et à la stratégie de l'entreprise, mais ne permettent pas de définir les éléments et processus nécessaires afin d'entamer une transformation numérique. On se retrouve donc encore au cœur de la problématique où les entreprises comprennent leur statut actuel et sont présentées avec plusieurs pistes de solutions pouvant leur permettre de se transformer numériquement, mais ont encore de la difficulté à planifier, lancer et gérer leur transformation convenablement puisque ces outils ne leur fournissent pas les informations nécessaires pour lancer le processus de transformation 4.0.

Nous avons finalement effectué une revue sur les pratiques de gestion de portefeuille de projets à l'intérieur de la section 2.3. Étant donné le nombre très limité d'études alliant gestion de portefeuille de projets et Industrie 4.0, la revue de littérature s'est étendue à la gestion de portefeuille de projets TI puisque les projets de transformation 4.0 possèdent avant tout une importante composante TI. Il est à noter que la majorité des modèles qui sont ressortis de cette revue de littérature n'a pas été testée dans un contexte de transformation 4.0 et demeure donc uniquement des pistes des modèles potentiels pouvant être transférés dans un contexte de transformation 4.0.

Lors de l'analyse de ces textes, il a été possible de constater qu'il existait plusieurs modèles, processus et outils pouvant être appliqués à un ensemble de projets de transformation 4.0 et qu'il était possible d'implanter certains outils par phase afin de faciliter leur intégration au sein des entreprises (Reyck et al., 2005). Cependant, les recherches portant sur le sujet ne permettent pas de déterminer les justifications derrière ces phases ni les critères permettant d'élaborer s'il est nécessaire de passer d'une phase à l'autre.

Les outils de sélection de projets analysés dans la section 0 peuvent permettre d'identifier les projets de transformation 4.0 les plus critiques à mettre en place en fonction de plusieurs critères, dont les analyses de maturité 4.0 de l'entreprise. Ces outils de sélection sont très utiles pour former et réviser les composants du portefeuille de projets de transformation 4.0 de la PME nécessaires au lancement de cette transformation. Ces outils peuvent également intégrer les notions d'interdépendances de projets qui contribuent à la problématique de recherche, tels que présentés dans la section 2.3.3, et peuvent ainsi offrir un élément de solution à la problématique du lancement de la transformation 4.0 en PME. Cependant, ces outils peuvent être très complexes et ne sont pas nécessairement adaptés au contexte des PME. De plus, la majorité de ces outils doivent être utilisés à l'intérieur d'un processus de gestion de portefeuille de projets bien établi au sein de l'entreprise, ce qui est rarement le cas en PME.

Finalement, les recherches effectuées jusqu'à maintenant ne permettent pas de répondre entièrement à la question suivante : **Comment doit-on gérer la transformation 4.0 au sein d'une PME manufacturière?** En effet, plusieurs éléments apportent des pistes de réponse partielles sans pour autant offrir une réponse claire pouvant être utilisée par des praticiens ou des académiques. La littérature ne démontre pas explicitement les phases et étapes que la PME manufacturière doit réaliser afin de planifier et lancer sa transformation, ainsi que les livrables et les relations de dépendances entre ces étapes et livrables. La littérature ne démontre pas également à quel moment et de quelle façon la PME doit introduire les différents outils et processus de gestion de projets et de portefeuille de projets afin de pouvoir planifier et gérer ses projets de transformation numérique. Également, il a été démontré à maintes reprises que les PME manufacturières doivent faire preuve de flexibilité et d'agilité dans leur transformation, cependant les recherches actuelles ne démontrent pas comment les PME utilisent cette flexibilité et cette agilité afin de mettre en place

les changements nécessaires pour supporter leur transformation 4.0 ou encore quels sont les changements devant être adoptés par la PME. Alors que les recherches actuelles ont permis de déterminer plusieurs bonnes pratiques et facteurs de succès critiques permettant de faire face aux barrières et défis rencontrés par les PME manufacturières lors de leur transformation 4.0, ces études ne permettent pas de déterminer les actions à entreprendre pour mettre en place et supporter ces bonnes pratiques et facteurs critiques de succès.

2.5 Conclusion

En conclusion, l'objectif de cette thèse de recherche est de proposer des façons permettant de faciliter la gestion de la transformation numérique des PME manufacturières vers l'industrie 4.0. La revue de littérature a permis de déterminer des approches potentielles de résolutions de cette problématique, sans pour autant être en mesure de donner des actions et étapes concrètes aux manufacturiers désirant lancer et gérer leur transformation numérique. Le chapitre suivant détaillera les objectifs spécifiques de recherche permettant d'atteindre l'objectif principal ainsi que la méthodologie utilisée afin d'y arriver.

CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE DE RECHERCHE

Ce chapitre vise à mettre de l'avant les objectifs de recherche de cette étude et à décrire la méthodologie adoptée pour y répondre. Nous commencerons par préciser les liens entre les limitations discutées dans la revue de la littérature et les objectifs de recherche retenus. Par la suite, l'approche générale de recherche sera décrite et mettra également en lumière les relations entre les différents articles et les objectifs spécifiques. Nous introduirons ensuite deux méthodologies de recherche exécutées en séquence : une approche de recherche-intervention suivit par une approche d'étude Delphi-Régnier. Finalement, nous aborderons la mitigation des risques de fiabilité et de validité.

3.1 Objectifs de recherche

Nous rappelons que la problématique de cette recherche repose sur les difficultés des PME à démarrer et gérer leur transformation 4.0. Comme nous l'avons démontré, les études sur le sujet apportent des réponses encore très vagues et génériques et ne permettent pas à la PME de bien comprendre la démarche à suivre afin de lancer et de gérer sa transformation 4.0.

L'objectif général de cette thèse est ainsi de **faciliter et d'améliorer la transformation numérique vers l'Industrie 4.0 en proposant des recommandations de gestion de la transformation 4.0 adaptée au contexte des PME manufacturières**. Plus concrètement, ces recommandations doivent permettre aux PME désirant assurer une gestion réussie de leur transformation 4.0 d'identifier les phases et étapes à suivre ainsi que les actions à entreprendre et éléments à implanter au cours de leur transformation numérique.

Afin de répondre à cet objectif, plusieurs sous-objectifs spécifiques devront être réalisés :

- **OS1 : Déterminer** comment le contexte de la PME manufacturière affecte sa façon de gérer sa transformation numérique.
- **OS2 : Identifier** les changements organisationnels que la PME doit adopter afin de pouvoir gérer sa transformation numérique.
- **OS3 : Identifier** les approches de réalisation, les règles de gouvernance, les structures, les outils et les processus facilitant la gestion de la transformation numérique en PME manufacturière.

- **OS4 : Développer** des recommandations sous forme de phases, étapes et actions nécessaires pour planifier, lancer et suivre la transformation numérique d'une PME manufacturière.
- **OS5 : Mesurer** le niveau d'acceptation des phases, étapes, actions et livrables nécessaires pour la gestion de la transformation numérique en les confrontant aux critiques d'un panel d'experts.

3.2 Démarche générale de recherche

Afin de répondre aux sous-objectifs de recherche et à l'objectif principal, il est nécessaire d'avoir une approche de recherche créative permettant de développer et de proposer des recommandations ancrées dans la réalité et prenant en compte les caractéristiques des transformations 4.0 en PME. Pour ce faire, une approche de recherche inductive supportée par une recherche terrain longitudinale est la mieux adaptée (Saunders et al., 2009) puisque nous ne cherchons pas à tester une hypothèse ou encore à prouver qu'un modèle est généralisable (Hlady-Rispal, 2015; Saunders et al., 2009), mais bien à proposer des recommandations basées sur des données empiriques et une analyse de type « sensemaking » (Saunders et al., 2009). Cette approche de structure de recherche est beaucoup plus flexible et permet une meilleure compréhension du contexte de la recherche (Saunders et al., 2009).

Afin d'obtenir les données empiriques nécessaires pour répondre à chacun des sous-objectifs de recherche, nous utiliserons différentes stratégies de recherche qualitative non exclusive. L'ensemble de ces stratégies de recherche nous permet d'obtenir une meilleure compréhension de la réalité des PME en transformation numérique ainsi que d'obtenir les données nécessaires pour définir des recommandations applicables au contexte de ces PME manufacturières.

Un total de trois approches de recherche seront utilisées de façon itérative et séquentielle. L'étude commencera par une revue de littérature cherchant à établir les concepts de bases en lien avec la gestion de la transformation numérique en PME et l'ensemble des sous-objectifs de recherche. Par la suite, une étude longitudinale prenant la forme d'une recherche-intervention sera effectuée sur une période de 27 mois auprès d'un partenaire industriel. Cette recherche-intervention servira à étudier en profondeur comment ce partenaire gèrera sa transformation numérique, les phases et étapes qu'il suivra, les approches de réalisation qu'il utilisera, les changements organisationnels

qu'il implantera et les actions qu'il prendra en cours de transformation. Cette étape conduira également à identifier et analyser les facteurs internes et externes à l'entreprise qui influenceront l'évolution de son approche de gestion de transformation 4.0. Il est à mentionner que des revues de littérature additionnelles seront réalisées durant la recherche-intervention afin d'analyser plus en profondeur des éléments observés en entreprise.

Finalement, une étude Delphi-Régnier avec un panel d'expert en transformation 4.0 sera effectuée afin d'obtenir et de valider des informations ne pouvant être observées directement dans la PME manufacturière. La Figure 3.1 décrit les approches de recherche qui seront utilisées pour chacun des articles ainsi que les objectifs spécifiques répondus par ces approches. Chacune des phases de recherche mentionnée dans cette figure sera expliquée dans les sections suivantes.

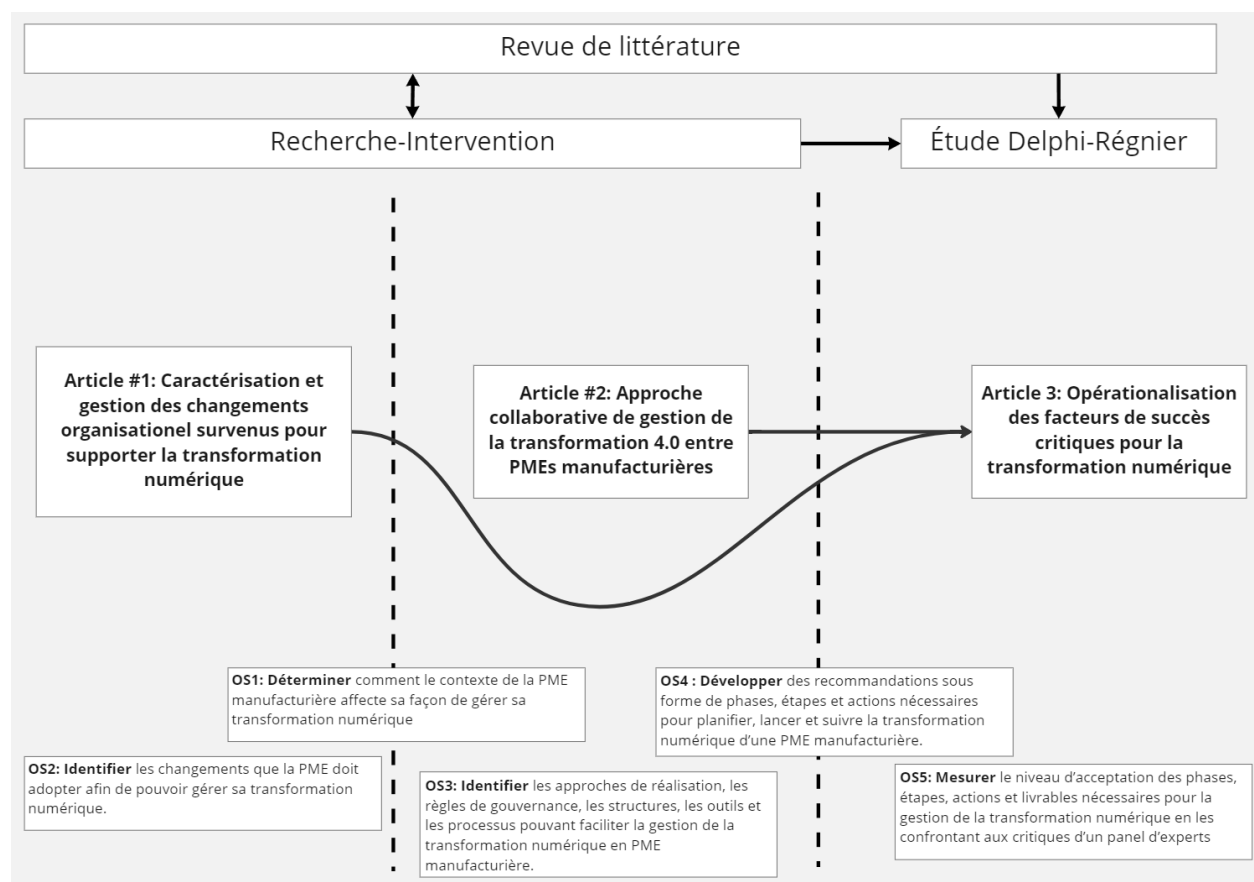


Figure 3.1 – Démarche générale de recherche

Il est important de noter qu'en raison de la nature des données collectées et la participation d'experts à un questionnaire, l'équipe de recherche a obtenu un certificat de conformité éthique délivré par l'École Polytechnique (référence CER-1920-37) qui peut être consulté dans l'Annexe B de ce document.

3.3 Recherche-Intervention

La recherche-intervention vise à rattacher les besoins du partenaire industriel et les intérêts de recherche d'étudier en profondeur des phénomènes pratiques (Baskerville & WoodHarper, 1996; Foster, 1972). Plus spécifiquement, elle facilite une collaboration entre chercheurs et partenaires industriels pour planifier et exécuter des activités de recherche en itérations (Hult & Lennung, 1980). La Figure 3.2 résume l'approche itérative de recherche-intervention adoptée dans cette étude.

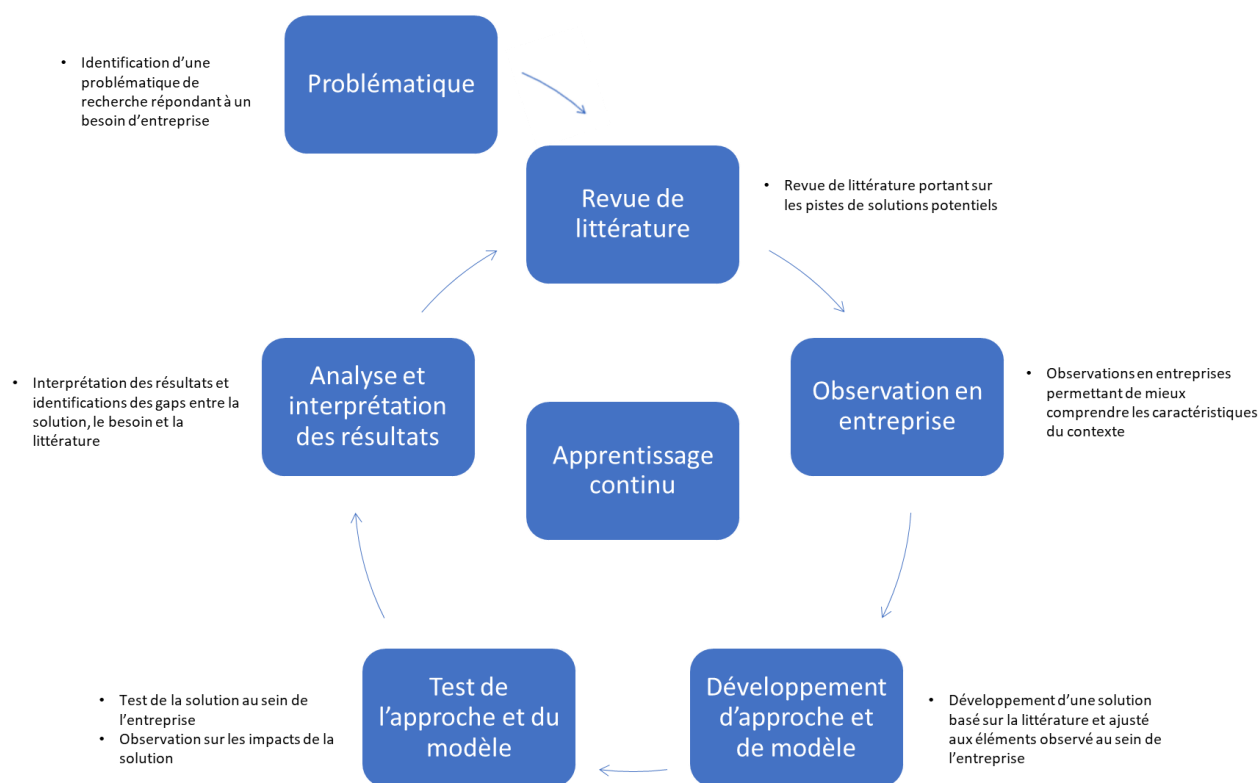


Figure 3.2 – Méthodologie de recherche-intervention

Le processus de recherche-intervention a été effectué sur une période d'une durée de 27 mois, soit de janvier 2018 à avril 2020, durant laquelle furent récoltées les données empiriques nécessaires pour répondre aux sous-objectifs nos 1 à 4 et rédiger les articles 1 et 2.

3.3.1 Acquisition et analyse de données en recherche-intervention

Lors de la recherche-intervention, différentes techniques ont été utilisées afin d'acquérir et d'analyser les données nécessaires pour répondre à nos objectifs spécifiques. Les techniques sont les suivantes : Observation en entreprise, documentation et communication électronique et « Sense-making ».

3.3.1.1 Observation en entreprise

L'une des méthodes préconisées en recherche-intervention pour la récolte de données est l'observation en entreprise (Saunders et al., 2009). Puisque la recherche s'effectue sur une base qualitative, la méthodologie d'observation utilisée en fut une d'observation participative, qui met l'accent sur la découverte de relations et de dynamiques en lien avec les actions des personnes observées. Les observations ont été utilisées plus d'une fois lors de recherche en gestion organisationnelle et ont permis plus d'une fois de valider des hypothèses en lien avec des éléments comme les transformations organisationnelles, la gestion de projet et la gestion de portefeuille de projets (Clegg et al., 2018; Killen et al., 2012; Saunders et al., 2009).

Lors de la phase de recherche-intervention, l'équipe de recherche a collecté des données et des observations sur le contexte organisationnel du partenaire industriel, ses processus, ses outils, sa gouvernance ainsi que l'ensemble des événements majeurs et prises de décision en lien avec la transformation 4.0 ayant eu lieu. Ces observations ont servi à caractériser le contexte du partenaire industriel et ainsi de faire ressortir les relations entre ses caractéristiques et son processus de transformation 4.0.

Les observations ont été notées dans un cahier au fur et à mesure de l'intervention et de la participation du chercheur au sein des initiatives de l'entreprise.

3.3.1.2 Documentation et communication électronique

Lors de la recherche-intervention, plusieurs documents électroniques détaillant les outils, processus, gouvernance et prise de décision de l'entreprise sur chacun des projets 4.0 et sur la gestion du portefeuille de projets ont été créés par le partenaire industriel et par le chercheur-intervenant. Ces documents ont été enregistrés et partagés à l'équipe de recherche. On y retrouve notamment les différents audits et diagnostics que l'entreprise a effectués pour créer son portefeuille de projets 4.0, les chartes des projets 4.0, l'analyse des différentes solutions et leur documentation de formation. L'équipe de recherche a également eu accès aux présentations PowerPoint effectuées aux différents niveaux hiérarchiques de l'entreprise permettant de présenter les projets 4.0, leurs échéanciers, leur budget, leur gouvernance et leur processus de suivi. Finalement, l'équipe de recherche a eu accès aux différents outils et processus de l'entreprise pour la gestion des projets et le contrôle des échéanciers et budgets de chacun des projets d'Industrie 4.0.

Les documents ont été sauvegardés sur une plateforme de partage de type One Drive avec l'équipe de projet. Les documents ont été classés par catégorie et par projet. L'équipe de recherche a également pu garder un accès à l'ensemble des communications électroniques par courriel du chercheur intervenant. Cette base de données de communication a permis de repositionner dans le temps des prises de décisions, discussions et événements qui ont influencé la gestion de la transformation 4.0 du partenaire industriel.

3.3.1.3 Sense-Making

Les notes et mémos des observations ont été informatisés afin de pouvoir facilement s'y référer aux fins d'analyse. Les données acquises lors de cette approche ont été analysées au sein d'une boucle en continu par le biais d'un processus de « sense-making » (Dervin, 1998). À l'intérieur de ce processus, une analyse préliminaire est effectuée sur les données empiriques, amenant à des questions supplémentaires pouvant être répondues par la littérature et par d'autres observations en entreprise. Cette technique d'analyse permet de faire ressortir les liens entre les éléments observés, leur cause et effet, et ainsi obtenir un niveau de profondeur élevé dans l'interprétation des observations en entreprise.

3.3.2 Contexte organisationnel du partenaire industriel

Le choix de l'organisation pour le partenariat de recherche a été principalement fait pour des raisons pratiques. Un des membres de l'équipe de recherche avait accès à des contacts dans l'organisation et la présence de projets de transformation numérique a été identifiée. De plus, l'organisation a démontré de l'ouverture à partager des informations sur ce type de projets et à embaucher à la hauteur de quatre jours par semaine le doctorant dans son équipe de transformation numérique.

Le partenaire industriel est une entreprise manufacturière du Grand Montréal spécialisée dans l'usinage de composants et de pièces d'aéromoteurs et d'aérostructure pour l'industrie de l'aéronautique. L'entreprise familiale, fondée en 1974 qui a été reprise par le fils du fondateur, en 2009, possède près de 210 employés divisés en quatre (4) sites, Montréal, Beauharnois, Valleyfield et Bromont, et génère près de 80 millions de dollars canadiens. Elle a supporté une croissance d'environ 25 à 30% par année durant les cinq (5) années précédant la pandémie de Covid-19.

Au cours des dernières années, celle-ci a changé considérablement son modèle d'affaires et ses pratiques, passant de l'usinage de pièce en mode « job shop » pour l'industrie du textile et de l'automobile à l'usinage de pièce de haute précision, le traitement de surface, la peinture et l'assemblage de pièces pour l'industrie de l'aéronautique et de la défense.

Malgré son statut de PME, le partenaire industriel possède une structure avoisinant les grandes entreprises en divisant sa structure organisationnelle en quatre (4) départements : Opération, Finance, Ressources humaines et Infrastructure/Innovation, ainsi qu'en ayant en place un Conseil d'administration responsable des décisions d'investissements majeurs de l'entreprise et un comité de direction responsable des alignements stratégiques de l'entreprise. Afin de supporter son changement de système ERP en 2017, le partenaire industriel a également officialisé au sein du département d'infrastructure et d'innovation la mise en place d'une équipe spécialisée pour les projets à caractère numérique tels que les modifications et mises à jour du système ERP, la création de solutions d'intelligence d'affaires (BI) et les projets en technologie de l'information.

Le partenaire industriel a lancé officiellement un portefeuille de projets de transformation 4.0 en janvier 2018 afin de prendre part à une subvention provinciale du nom de MachFab 4.0. À la suite

du lancement des initiatives, celui-ci a lancé plus d'une demi-douzaine de projets 4.0 en parallèle, une majorité d'entre eux en collaboration avec un compétiteur et partenaire d'innovation. La gestion de l'ensemble des initiatives de transformation 4.0 est effectuée par le Responsable des processus numériques de l'entreprise, sous la supervision du Directeur des infrastructures stratégiques et du VP Innovation et Infrastructure. Celui-ci est également responsable de la gestion de la collaboration avec le compétiteur, des plans de communications au sein de l'entreprise pour les initiatives 4.0 ainsi que de mettre en place et d'exécuter une vision et une architecture de transformation numérique pour l'ensemble de l'entreprise.

Les projets de transformation 4.0 de l'entreprise sont divisés par phase, allant d'analyse de processus, aux études de faisabilité, prototype fonctionnel et déploiement des solutions. Plusieurs projets actuels en sont encore à l'étude de faisabilité et la mise en place de prototype fonctionnelle alors que deux projets sont en phase de déploiement au sein de l'entreprise. L'ensemble des projets déjà défini s'étend sur un horizon de deux à trois ans afin de passer des phases d'étude de faisabilité aux déploiements complets des solutions.

Suite à la pandémie de Covid-19 ayant débuté en mars 2020, le partenaire industriel a pris la décision de suspendre la grande majorité de ses projets de transformation numérique et de dissoudre l'équipe responsable des projets d'Industrie 4.0.

3.4 Méthode Delphi-Régnier

Afin de répondre aux sous-objectifs 4 et 5 et à la suite du démantèlement de l'équipe de transformation numérique du partenaire industriel durant la pandémie, une approche de recherche Delphi-Régnier a été adoptée. Celle-ci est une méthodologie de recherche combinant la méthodologie Delphi de récolte de données auprès d'un panel d'expert avec l'abaque de Régnier permettant de visualiser les réponses et les opinions d'experts sur des propositions à l'aide d'une échelle de couleur.

3.4.1 Méthode Delphi

La méthode Delphi est une méthode structurée permettant d'obtenir et d'organiser les opinions d'un groupe d'experts sur un sujet particulier. Elle peut être utilisée pour explorer des sujets complexes ou développer des modèles. La méthode Delphi est largement appréciée pour sa capacité à faire

progresser les connaissances empiriques et les jugements de groupe qui conduisent à l'émergence d'un consensus ou d'un dissensus sur un sujet. Elle est définie comme "un processus itératif utilisé pour recueillir et distiller les jugements d'experts à l'aide d'une série de questionnaires" (Linstone & Turoff, 1975; Rowe & Wright, 1999; Skulmoski et al., 2007). Cette méthode est généralement divisée en un processus de recrutement d'experts et un processus de collecte de données à plusieurs reprises, appelées "itérations", dans lequel chaque itération vise à affiner les données collectées lors de l'itération précédente et implique un retour contrôlé des réponses (Rowe & Wright, 1999).

3.4.2 Abaque de Régnier

L'abaque de Régnier est une technique originale de consultation d'experts qui utilise un panneau de couleurs pour recueillir intuitivement les avis des experts sur des énoncés précis, concis et pragmatiques. Les avantages de cette technique sont la rapidité de la synthèse des avis, la visualisation colorée des résultats qui facilite la prise de décision et l'identification des consensus et des dissensus (Maleki, 2009). Les experts doivent choisir entre sept couleurs pour exprimer leur opinion :

- Vert : Tout à fait d'accord avec l'affirmation ;
- Vert clair : Plutôt d'accord avec l'affirmation ;
- Jaune : Opinion mitigée sur l'affirmation ;
- Rouge clair : Plutôt en désaccord avec l'affirmation ;
- Rouge : Complètement en désaccord avec l'affirmation ;
- Blanc : Ne peut pas répondre ; et
- Noir : Ne veut pas répondre.

Les trois couleurs principales (vert, jaune et rouge) indiquent la transparence des réponses, tandis que le noir et le blanc indiquent l'opacité. Les informations recueillies apparaissent dans un diagramme coloré synthétisant les opinions des experts à l'aide d'une visualisation colorée qui en facilite l'analyse.

3.4.3 Sélection des experts

La création du panel d'experts est l'un des points les plus importants d'une étude Delphi-Régnier. En effet, les experts sélectionnés doivent posséder le niveau de compétences et d'expériences nécessaire pour soumettre une opinion éclairée sur les propositions du questionnaire. Ceux-ci doivent donc être sélectionnés en fonction de leur expérience; leur familiarité avec l'objet de l'étude et leur niveau de connaissance sur les caractéristiques de l'objet.

Pour cette étude, l'expert doit répondre aux critères suivants :

1. Doit avoir analysé, géré ou exécuté des projets de transformation numérique au cours des trois dernières années ;
2. Doit avoir travaillé pour, ou en collaboration avec, des PME manufacturières sur des projets de transformation numérique ; et
3. Doit avoir été impliqué dans la phase de démarrage de la transformation numérique au sein d'une ou plusieurs PME manufacturières.

Le premier critère garantit que l'expert a une expérience directe des projets de transformation numérique. Le deuxième critère garantit que son expérience et son expertise ont été développées dans le contexte des PME manufacturières, le sujet principal de notre étude. Enfin, le troisième critère garantit que leur expérience et leur expertise portent sur l'aspect gestion de la transformation numérique plutôt que sur les aspects techniques. Grâce à ces critères, nous nous sommes assurés que nos experts pouvaient fournir un avis éclairé sur les actions à mener pour gérer la transformation numérique des PME manufacturières.

Afin d'inclure les perspectives des praticiens et des universitaires, les experts ont été répartis en trois catégories. Il s'agit des catégories suivantes :

1. **Gestionnaire industriel** : Membre de la haute direction ou responsable de projet/programme de PME manufacturières ;
2. **Académique**: Chercheur ou professeur d'université ayant mené des recherches sur la transformation numérique des PME manufacturières ; et

3. **Consultant indépendant** : Consultant et experts en transformation numérique qui ont soutenu les PME manufacturières dans la gestion de leur transformation numérique.

Les experts ont été sélectionnés sur la base du réseau professionnel de l'équipe de recherche.

3.4.4 Questionnaire Delphi-Régnier

Au cours de cette étude, deux questionnaires ont été créés sur la plateforme <https://colorinsight.fr/> et distribués à un panel de dix-neuf experts en transformation numérique répondant aux critères décrits plus haut. Les experts contactés par courriel ont pu répondre aux questionnaires en ligne. Le premier questionnaire est basé sur les observations et la documentation de la recherche-intervention ainsi que sur la littérature. Le deuxième questionnaire est basé sur les commentaires et réponses des participants au premier questionnaire.

Suite à chaque questionnaire, une analyse des réponses, consensus et dissensus est effectuée et les commentaires sont classés et analysés afin d'alimenter les résultats de l'article #3. Les réponses de ces questionnaires se retrouvent en Annexe.

3.4.5 Analyse des données

Les données de l'étude Delphi-Régnier sont analysées en se basant sur les réponses des experts aux énoncés ainsi que sur leurs commentaires. Les réponses des experts sont synthétisées par un abaque de couleur démontrant le ratio entre les différents niveaux d'accord allant du vert foncé (totalement en accord) au rouge foncé (totalement en désaccord). Lorsque la majorité des couleurs vertes ou rouges atteignent un certain ratio, un consensus est établi. Lorsque le ratio de verts ou de rouges n'atteint pas le niveau nécessaire, un dissensus est établi. Afin d'aligner notre cible de consensus avec la cible déterminée dans des recherches similaires (Moeuf et al., 2019; Richard et al., 2021; Rosin et al., 2022), nous avons déterminé une cible de ratio de 60% pour l'obtention d'un consensus.

Pour chaque énoncé, les experts sont invités à commenter leur réponse afin de justifier leur choix, de proposer des actions supplémentaires ou encore d'indiquer si celles-ci devraient se retrouver au sein d'une autre étape de la méthodologie. Basé sur les commentaires et sur les dissensus, un questionnaire supplémentaire est créé, afin de creuser davantage les réponses des experts et

d'approfondir l'analyse de leur réponse. Au cours de cette recherche, un total de deux rondes de questionnaires furent exécutées.

3.5 Mitigation des risques de fiabilité et validité

Plusieurs risques peuvent entourer les projets de recherche qualitatifs et peuvent affecter aussi bien la fiabilité que la validité des données récoltées durant la recherche (Robson, 2002). Parmi ces risques, on retrouve les risques de fiabilité suivants :

- Erreur en provenance des sujets et participants à la recherche;
- Biais en provenance des sujets et participants à la recherche;
- Erreur d'observation; et
- Biais d'observation.

Afin d'atténuer les risques d'erreur et de biais en provenance des sujets et participants, le chercheur est présent quotidiennement sur le terrain, lui laissant ainsi l'opportunité d'avoir des interactions quotidiennes avec les participants, lui permettant de discerner les potentiels biais et erreurs et de les régler. Afin d'atténuer les risques d'erreurs et de biais des observations, le chercheur confirme ses observations auprès du partenaire industriel lors de points d'échanges hebdomadaires avec le VP Innovation et Infrastructure responsable de l'équipe de transformation numérique.

Afin d'atténuer les risques de validité de données, les effets d'événements extérieurs sur les dynamiques observés sont notés et pris en considération lors des analyses de ces dynamiques. Finalement, afin de limiter les biais pouvant provenir des experts, ceux-ci sont sélectionnés à parts égales de domaine et d'expérience différents.

3.6 Conclusion

En conclusion, la méthodologie de recherche utilisée combine une recherche-intervention longitudinale auprès d'un partenaire industriel ainsi qu'une étude Delphi-Régnier auprès d'un panel de dix-neuf experts en transformation 4.0 en PME manufacturières. Exécutée en deux phases et supportée par une revue de littérature en continu, cette méthodologie permet d'atteindre les objectifs de recherche en récoltant les données empiriques nécessaires à l'élaboration de

recommandations permettant de faciliter la gestion de la transformation 4.0 adaptées au contexte des PME manufacturières et en validant des recommandations auprès d'un groupe d'expert.

CHAPITRE 4 ARTICLE 1 : ORGANIZATIONAL CHANGES
APPROACHES TO FACILITATE THE MANAGEMENT OF
INDUSTRY 4.0 TRANSFORMATION IN MANUFACTURING SMES

Article soumis dans

Journal of Manufacturing Technology Management

Soumis le 2022-10-09

Rédigé par:

Jonathan BRODEUR

Département des mathématiques et génie industriel

École Polytechnique de Montréal

Jonathan.brodeur@polymtl.ca

Isabelle DESCHAMPS

Département des mathématiques et génie industriel

École Polytechnique de Montréal

Isabelle.deschamps@polymtl.ca

Robert PELLERIN

Département des mathématiques et génie industriel

École Polytechnique de Montréal

Robert.pellerin@polymtl.ca

Abstract

Purpose – This paper aims to investigate the characteristics and dynamics of the organizational changes needed to facilitate the management of an Industry 4.0 transformation in manufacturing SMEs and propose an approach to manage them.

Design/methodology/approach – This research focuses on a single manufacturing SME in North America, and data were collected using a research intervention method. Data were collected through observation and intervention within the SME over 27 months.

Finding – The research has shown that organizational changes are required in manufacturing SMEs to better manage their Industry 4.0 transformation projects.

Research limitations – Using the case study method limits the generalization of the results. The organizational changes observed and their characteristics might be specific to the studied manufacturing. Although results could vary in different contexts, many manufacturing SMEs have similar characteristics to those observed in this study.

Practical implications – This research provides preliminary evidence of an iterative organizational change management approach that manufacturing SMEs must adopt to facilitate the management of their digital transformation.

Originality/value – This research provides a better understanding of how a manufacturing SME can improve its capabilities to manage its digital transformation by introducing iterative organizational changes. From these results, a link to the organizational learning literature can be drawn and developed upon.

Keywords – Industry 4.0, Small and Medium-Sized Enterprises, Manufacturing Industry, Intervention-Research, Organizational Changes

Paper Type – Research Paper

4.1 Introduction

Industry 4.0 is defined as the 4th Industrial Revolution and represents a set of initiatives aimed at improving processes, products, and services by allowing decentralized decision-making based on real-time data acquisition through the introduction of digital technologies at every level of manufacturing companies and their supply chain (Danjou et al., 2016; Ghadge et al., 2020; Moeuf et al., 2018). Industry 4.0 has been viewed by many as a new opportunity for manufacturing SMEs to improve their performance, manufacturing capabilities, and offers to their current and new customers (Ghadge et al., 2020; McKinsey Digital, 2015; PWC, 2016; The Boston Consulting Group, 2015; Xu, L. D. et al., 2018). This revolution includes introducing a dozen technology groups, such as cyber-physical systems, big data, artificial intelligence, collaborative robotics (cobots), and 3D printing (Moeuf et al., 2018; Xu, L. D. et al., 2018).

Since Industry 4.0 is intimately linked to the exploitation of real-time data allowed through the introduction of digital technologies, many have defined Industry 4.0 as the digital transformation of the manufacturing industry (Lu, 2017; Moeuf et al., 2018; Oztemel & Gursev, 2020; Piccarozzi et al., 2018; Ustundag & Cevikcan, 2017; Xu, L. D. et al., 2018). Digital transformation is defined by the profound changes in societies and industries through the use of digital technologies and information systems (Agarwal et al., 2010; Majchrzak et al., 2016; Vial, 2019). As such, digital transformation has been positioned as a way for enterprises to radically improve their performance through the implementation of multiple technologies affecting their infrastructure, processes, and business model (Fitzgerald et al., 2014; Gamache et al., 2017; Majchrzak et al., 2016; Vial, 2019).

Many studies have shown that Industry 4.0 allow for the digital transformation of manufacturing companies through the introduction of multiple smaller projects at different levels of a company instead of a more traditional overhaul transformation that can take place through a few more significant projects (Ali & Aboelmaged, 2022; Arcidiacono et al., 2019; Basl, 2017; Brodeur et al., 2021; Wank et al., 2016; Zangiacomini et al., 2018). It is especially true for manufacturing SMEs (Ghadge et al., 2020; Moica et al., 2018; Zhou et al., 2015) as it allows them to counter many of the challenges and risks they face when deploying major digital technologies projects (Buonanno et al., 2005; Moeuf et al., 2019; Singla, 2010; Stentoft et al., 2019).

However, this approach still involves challenges that SMEs must face: the lack of available talents and expertise in Industry 4.0 technologies, inefficient processes to manage the digital transformation, lack of governance and structure, or lack of proper strategy and governance (Moeuf et al., 2019; Schröder, 2016; Zangiacomi et al., 2020). These challenges make it difficult for manufacturing SMEs to manage and successfully execute their digital transformation toward Industry 4.0. To remedy the situation, multiple researchers identified that managing and implementing organizational changes are critical success factors (Moeuf et al., 2019; Pozzi et al., 2021; Sony & Naik, 2019). Still, the following question arises: What are the characteristics of the organizational changes a manufacturing SME must introduce to manage its digital transformation, and how should it approach their management?

To answer this question, we conducted a research-intervention project with an aerospace manufacturing SME over 27 months to observe and better understand the organizational changes put in place by this SME and to propose an iterative approach to introduce and manage these organizational changes during the SME's digital transformation.

The remainder of this paper is divided into five sections: a literature review of Industry 4.0 within manufacturing SMEs and organizational changes theory, the research methodology and analytical framework, the findings, a discussion, and a conclusion.

4.2 Literature review

We will first look at recent research on Industry 4.0 in the context of manufacturing SMEs and, more precisely, at research studying the relationship between organizational changes and Industry 4.0 within manufacturing SMEs.

4.2.1 Industry 4.0 within Manufacturing SMEs

Studies on the context of Industry 4.0 within manufacturing SMEs are still sparse compared to Industry 4.0 as a whole. However, it has grown significantly recently and is now considered a distinguished cluster of studies (Piccarozzi et al., 2018), mainly due to the fact that manufacturing SMEs possess different characteristics compared to large manufacturing companies. They possess a higher level of flexibility than larger companies to react to external and internal events (Brettel, M. et al., 2016; Laforet & Tann, 2006; Levy, M. & Powell, 1998; Zhang, Q. Y. et al., 2003). They

have to deal with a lack of available resources and talents to implement digital technologies (Buonanno et al., 2005; Khan & Turowski, 2016; Raymond & Uwizeyemungu, 2007; Zangiacomi et al., 2018). They prefer to focus on short-term strategies with a quick return on investment (Buonanno et al., 2005; Moeuf et al., 2018; Stonehouse & Pemberton, 2002). Finally, they lack the level of processes and organization management maturity associated with large organizations (Laforet & Tann, 2006; Smallbone et al., 1995). Because of that, multiple studies, mainly based on case studies, have focused on how the characteristics of manufacturing SMEs would translate as part of their digital transformation, the challenges they would face, potential opportunities, and a set of best practices (Mittal, Khan, et al., 2018; Moeuf et al., 2018; Piccarozzi et al., 2018).

The lack of readily available resources and talents within the manufacturing SMEs to execute and manage their digital transformation has been described as one of the main challenges faced by manufacturing SMEs, as with the acceptance of Industry 4.0 within the employees and clear strategic vision (Moeuf et al., 2019; Stentoft et al., 2019; Zangiacomi et al., 2018). This situation forces them to either hire new employees or consultants to manage their digital transformation (Moeuf et al., 2019), properly plan the introduction of new processes through their project (Moeuf et al., 2019; Zangiacomi et al., 2018), and invest in the training of their current workforce (García de Soto et al., 2019; Zangiacomi et al., 2018).

Since manufacturing SMEs are short-sighted in terms of strategy, they prefer to establish high-level objectives for their Industry 4.0 transformation and use their flexibility and adaptiveness to navigate through their digital transformation, adjusting their portfolio of projects as they progress (Wank et al., 2016; Zhong et al., 2017). Because of these characteristics, most manufacturing SMEs will bring forward their digital transformation through a set of several small technology implementation projects and try to minimize the impact on the organizations by being proactive on the process changes needed to support the new technology (Moeuf et al., 2019; Müller, J. M., Buliga, et al., 2018; Zangiacomi et al., 2018).

4.2.2 Organizational changes and Industry 4.0

The literature encompassing the different organizational changes part of, or following, the introduction of Industry 4.0 technologies has not been sufficiently explored (Charalambous et al., 2017). However, human-centric organizational changes and organizational aspects, such as

workforce training, communication, information-sharing, and intra-enterprise collaboration, have been investigated and considered critical success factors for a digital transformation (Moeuf et al., 2019). Communication between management and their employees has been shown to mitigate change resistance during the introduction of digital technologies (Bierwolf, 2017; Charalambous et al., 2015), while workforce training on new technologies through team training has been studied and positioned as a facilitating factor (Fraser et al., 2007; Zangiacomi et al., 2018), and the change in job roles and skills has been studied to create new Industry 4.0 competence models (Erol et al., 2016; Gehrke et al., 2015; Prifti et al., 2017).

Research on the impact of Industry 4.0 technologies on SMEs' organizational development has also been recently published. A case study with ten manufacturing SMEs established that implementing Industry 4.0 technologies impacted these organizations' structure, jobs, and competencies (Cimini et al., 2020). The researcher concluded that the technology and organization should co-evolve, allowing the organization to leverage Industry 4.0 technologies to make itself capable of adopting new processes.

More recently, Konopik et al. (2021) performed a comprehensive literature review on the concept of organizational capabilities for digital transformation. They divided the organization's capabilities into six themes (Strategy and Ecosystem, Innovation Thinking, Digital Transformation Technologies, Data, Operations, Organizational Design, and Digital Transformation Leadership) and referenced each of these themes with Teece's (2007, 2014, 2018) dynamic capabilities model of organizational transformation composed of sensing, seizing and transforming mechanisms. Konopik et al. (2021) argue that organizations need to integrate these organizational capabilities through organizational changes to support their digital transformations.

Finally, the introduction of multiple Industry 4.0 technologies has been shown to impact multiple SMEs' processes, like planning and logistics (Chen et al., 2018; Ghadge et al., 2020), resulting in the introduction of organizational changes as part of the technology implementation projects. Industry 4.0 transformation has also pushed forward the implementation of project and portfolio management processes to support their Industry 4.0 initiatives (Isikli et al., 2018; Schuh et al., 2014; Zangiacomi et al., 2018). Case studies on integrating Industry 4.0 technologies into business

processes and their impact on performance have been published to bring potential application cases with existing processes to light. (Moeuf et al., 2018).

Several case studies have also studied the impact on SMEs' employees. They have shown that Industry 4.0 will not only change how employees work within the company (Cimini et al., 2020; García de Soto et al., 2019; Gölzer & Fritzsche, 2017), but also the type of profile employers will seek in the future (Halse & Ullern, 2017; Ludwig et al., 2016; Zangiacomi et al., 2018). Acceptance of these changes from employees, managing expectations, and navigating through these changes has been highlighted as one of the main challenges to Industry 4.0 transformation in manufacturing SMEs (Chen et al., 2018; Singla, 2010; Zangiacomi et al., 2018). These changes also impact the SMEs' organizational culture, pushing their management to consider organizational change processes to support their Industry 4.0 transformation (Mohelska & Sokolova, 2018).

4.2.3 Critical review

The link between organizational change and Industry 4.0 is starting to be established in the scientific literature, principally when considering the impact of introducing Industry 4.0 technologies on manufacturing organizations. More than once, it has been established that organizational change management is considered one of the main success factors for a successful digital transformation in manufacturing SMEs (Mittal, Khan, et al., 2018; Moeuf et al., 2019; Shinohara et al., 2017).

However, most of the research has focused on potential organizational changes through conceptual frameworks, highlighting the importance of organizational changes during digital transformation or proposing changes to be adopted by manufacturing SMEs. There is still a gap in the literature to detail these changes' timing, impact, characteristics, and triggers and to determine how and when manufacturing SMEs can introduce and manage these organizational changes before and during their digital transformation. To fill this gap, this study aims to characterize, through a preliminary set of longitudinal empirical data, the organizational changes introduced during a manufacturing SME digital transformation and propose an approach to implement and manage these changes before and during its transformation processes.

4.3 Methodology

Given the nature of this research, it seems essential to perform this study in close relationship with a manufacturing SME over a significant period. A qualitative interaction research method appears appropriate for this purpose. As such, a research-intervention methodology allows the researcher to actively participate in the day-to-day operations of a partner company, allowing the researcher to observe daily the events and processes of his research subject (Baskerville & Myers, 2004; Baskerville & WoodHarper, 1996; Johansson & Wallo, 2019; Patton, 2014). It aims to solve an organization's problem, be it by developing a model or an approach based on the literature and the organization's characteristics, and to understand the phenomenon and the relations between the problems, the potential solutions, and the context of the subject. This methodology allows to test and optimize theoretical models and mechanisms on the subject and observe how these models and mechanisms are received and evolve within the research subject. As such, intervention research is the most appropriate method for developing the required knowledge to theorize professional practice made from a rigorous observation of facts and improve the effectiveness and efficiency of managerial decisions (Rousseau, 2006).

For these reasons, the intervention research method was chosen. It was initially necessary to perform a literature review on organizational changes that could facilitate digital transformation management and determine which organizational changes are needed at the beginning of the manufacturing SME digital transformation based on its characteristics. Then, the research team was able to embark on the digital transformation journey of the SME to identify subsequent organizational changes, analyze their characteristics, and to design, implement, and refine an approach to identify and implement them. The research project was performed between January 2018 and March 2020 in collaboration with a manufacturing SME specialized in aerospace parts manufacturing. The researcher joined the department in charge of their Industry 4.0 project portfolios and managed both the technological projects and the introduction of processes and tools to facilitate the company's digital transformation.

As seen in Figure 4.1, we first started by analyzing the initial context of the manufacturing SME to determine the initial organizational changes needed to manage and execute its Industry 4.0 projects. We then implemented these organizational changes and launched the Industry 4.0

transformation. The second stage of the methodology allowed us to deploy and analyze multiple organizational changes during the Industry 4.0 transformation and characterize them based on the analytical framework detailed in Figure 4.2. Analyzing these organizational changes allowed us to better understand their nature, creating enough knowledge to design and propose an initial organizational change management approach in the third stage of this research. This approach has then been tested in the field and improved based on feedback from the projects team and brainstorming with the Industry 4.0 transformation stakeholders of the manufacturing SME. Finally, the result section will present the completed transformation approach deployed.

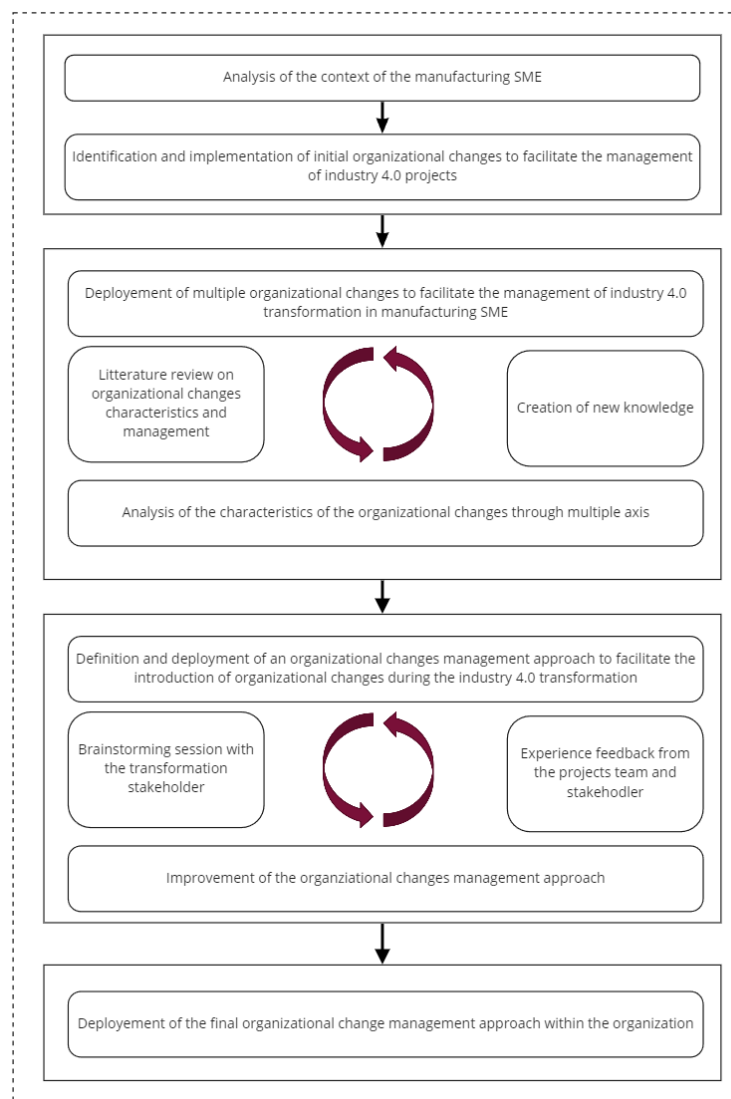


Figure 4.1 - Research Methodology

4.3.1 Analytical Framework

The following analytical framework, as seen in Figure 4.2, was used to detail and analyze the observed organizational changes.

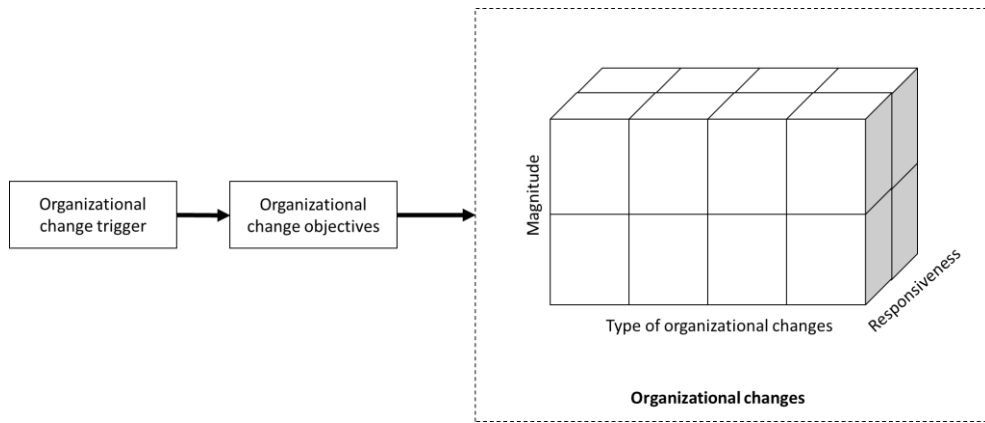


Figure 4.2 - Analytical Framework

First, we have detailed every event that triggered an organizational change related to digital transformations within the manufacturing SME. These events could have been internal or external to the organization, such as establishing new processes to support the organization in its Industry 4.0 transformation or the success or failure of an Industry 4.0 project. Then we looked at the organizational changes through three dimensions that will be detailed later. Finally, we looked at the scoped objectives for the organizational changes. If the organizational change trigger represents the current situation in need of a change, the objectives represent the desired situation aimed by the organizational changes. The objectives and the triggers of the organizational changes will allow us to understand the events responsible for the organizational changes and the company's element to improve to answer this event.

The changes have been described following three main dimensions: the type, the level of responsiveness, and the magnitude of the organizational changes.

Several types of organizational changes have been defined in the literature. However, we decided to use the types from Cao et al. (2003) since it has been developed to analyze SMEs' organizational changes Cao, G. et al. (1999); (Cao, G. M. et al., 2003); Flood (1995). The types are the following:

- **Process:** Change in flows and control over flows;
- **Structural:** Change in functions, their organization, coordination, and control;
- **Cultural:** change in values, beliefs, and human behavior in terms of relationship to social rules and practices; and
- **Political:** Change in Power distribution and the way organizational issues are influenced.

Responsiveness represents the level of proactivity of an organizational change and its level of planning (Armenakis & Bedeian, 1999; Lewin, 2016; Miji, 2017; Pasmore & Fagans, 1992). As part of this study, we will classify the organizational changes in two ways:

- **Proactive:** Planned by the organization as part of an industry 4.0 project or as part of their strategic planning; and
- **Reactive:** Triggered by an opportunity during or following an industry 4.0 project, and thus, were not initially planned by the organization when they started their industry 4.0 projects.

Magnitude represents the impact of the change on the organization. It can range from introducing a new process to constructing a new manufacturing plant (Brynjolfsson & Hitt, 2000; Levinthal & March, 1981; Levy, A. & Merry, 1986; Orlikowski, 1996; Romanelli & Tushman, 1994). As part of our study, we will divide the magnitude in two ways:

- **Adaptative:** Small, incremental adjustments made by organizations and managers to adapt to daily, weekly, and monthly business challenges. These changes are often related to fine-tuning existing processes, products, and company culture, which do not fundamentally change the organization as a whole; and
- **Transformative:** Dramatic evolution of some basic structure of the business itself—its strategy, culture, organization, physical structure, supply chain, or processes, and is often pursued to address a significant concern or challenge the business is facing.

Using these dimensions, we could position the company's different types of organizational changes related to its Industry 4.0 transformation and compare how the enterprise managed its organizational changes with the literature's best practices.

4.3.2 Data Acquisition and Validation

Data acquisition has been performed throughout observation as part of the researcher's research-intervention project with the enterprise (Saunders et al., 2009). The researcher managed and developed the Industry 4.0 portfolio of company projects, accompanying them throughout the research. Observations have been made daily over 27 months, and data was validated with follow-up questions and informal interviews with the company's management and employees during that same period.

Through the observations, the following elements have been noted within multiple mediums, such as hand-written and electronic notes:

- The dates the company realized its need for every organizational change;
- The trigger of the organizational changes;
- The dates the objectives of the organizational changes have been discussed and approved;
- The objectives and expected outcomes of the organizational changes;
- The details of the organizational changes;
- The plan of implementation of the organizational changes; and
- The moment of the implementation of the organizational changes.

Many observations also came from emails, meetings, minute-of-meetings, project documentation, and ad-hoc discussions with employees and the company management. Notes were taken daily about events and observations linked to the researcher's study and interpretations of the cause of different events. They were used to produce a timeline of his 27 months' stay with the manufacturing SME. Understanding and interpreting the organizational changes have been deduced through sensemaking techniques (Suddaby, 2006) to differentiate the level of each dimension.

4.3.3 Role and reflectivity of the Intervention-Researcher

The intervention researcher acted as the digital process manager of the company. He managed the digital transformation projects' portfolio 32h/per week for 27 months, participated in critical

meetings, interacted with employees and management at every level, and planned and executed the organizational changes linked to the Industry 4.0 projects.

As part of his role, the intervention-researcher also:

1. Supported the creation and implementation of a BI/ERP expertise center;
2. Created an “Introduction to Industry 4.0” training program aimed at the company’s employees;
3. Implemented several project management and portfolio management processes and practices within the Innovation and Infrastructure department;
4. Planned and managed the majority of industry 4.0 projects of the company.

Being part of the project management team in charge of the digital transformation of the manufacturing SME, the researcher was able to influence the definition and implementation of organizational changes. As such, many organizational changes could have been facilitated by the implications of the researcher within the manufacturing SME. These influences are expected and even encouraged when using an intervention-research methodology to bring a higher level of understanding of the subject (Baskerville & Myers, 2004; Baskerville & WoodHarper, 1996; Patton, 2014; Shannak & M Aldhmour, 2009).

As part of the research, the researcher identified multiple organizational opportunities, reported them to the company's high management, and implemented the ones approved by the company management. Not all organizational change opportunities reported by the researcher were approved nor implemented. Other organizational changes not reported by the researcher, but identified by the management and employees, were implemented. Participating in implementing the organizational changes and managing the company's digital transformation projects allowed the researcher to understand better the relation between the manufacturing SME's characteristics, its digital transformation, the event leading to the organizational changes, and the organizational change characteristics.

4.3.4 Description of the enterprise

The subject of the case study is an aerospace manufacturing SME in the region of Montreal (Quebec), Canada. The company has between 200 and 300 employees divided into four sites in Canada, specializing in manufacturing small and complex aerospace components. It generates around 75 and 90 million dollars (CAD) per year.

4.3.4.1 Status at the start of the study

At the start of the study, the enterprise was in its third year of sustained growth, with an average of 30% yearly revenue growth. An Industry 4.0 transformation was planned as the next strategic step to support future growth. The strategic plan included the company's digital transformation and the development of new products, new manufacturing technologies introduction, and strategic acquisitions.

The company was also in the middle of a new ERP implementation project that started 18 months before the research project and was expected to be completed in May 2018. This project planned and triggered several organizational changes, as discussed in Chapter 4.4.

4.3.4.2 Governance and internal processes

The company is divided into four departments: Finance, Human Resources, Operations, and Innovation & Infrastructure, with Operations managing several departments such as Production, Quality, Engineering, and Maintenance. Innovation & infrastructure manages IT, R&D, and digital transformation projects.

Historically, organizational changes were triggered following initiatives within the Operations department (introducing new production lines or introducing lean manufacturing practices in industrial engineering), or projects from the Innovation & Infrastructure department (introducing new manufacturing technologies, ERP change, IT infrastructure change). All the departments were coordinated to manage the needed organizational change triggered by these initiatives, with support from internal and external resources.

The SME also uses several project management and governance processes and a formal Project Management Office (PMO) committee that supervises ongoing project progress, reviews and

approves project scope changes, and reviews new project submissions by the different departments. The PMO comprises all vice presidents and directors and is held every three weeks. As part of it, project managers would present their project's status and issues and seek support and counsel. When technology implementation projects are presented, project managers are expected to present an employee's training plan to the PMO and coordinate with their director and the human resource department.

4.3.4.3 Organizational Culture

The company's organizational culture aims to develop innovation and improvement at every level of the company. It has multiple innovation and R&D projects to explore new services and support its current business while exploring the implementation of new manufacturing and automation technologies on the shop floor with its employees' help. They encouraged them to submit continuous improvement suggestions weekly, and a few of them were launched monthly.

The company's management communicates the company strategy, performance, and potential change at the end of each financial quarter through a general assembly meeting with every employee. They present the status of different KPIs, new initiatives, the financial status of the companies, and new training programs. They also use this general assembly to let employees ask different questions about strategic decisions, specific initiatives, or the impact of the changes occurring in the industry. The company's management noted any suggestions or questions, and follow-ups were performed through specific meetings or during the next general assembly.

4.4 Results

During the first stage of the study, organizational changes were performed as part of the digital transformation of the company. These organizational changes have been analyzed to understand their characteristics better and to develop and test, in the second stage of the study, an approach to manage the organizational changes needed to facilitate the management of the company's digital transformation.

4.4.1 Organizational changes characteristics

A total of 14 organizational changes linked to the company's digital transformation were observed and analyzed during this research, as presented in Table 4.1 and 4.2. These organizational changes

had different objectives: to facilitate the propagation of Industry 4.0 principles within the company or facilitate the management of Industry 4.0 projects. These changes also had different triggers and covered the entire spectrum from reactive to proactive and adaptive to transformative changes.

Table 4.1- Organizational Changes during the Industry 4.0 transformation

#	Date	Organizational Change	Objective	Trigger	Type	Preparedness	Magnitude
#1	Q2 2017	Introduction of the utilization rate in production performance measurements	Introduction of a new KPI on the production floor to measure the utilization rate of equipment	Lack of KPIs at the operations level to correctly measure the company's production performance	Process	Proactive	Adaptative
#2	Q3 2017	Modification of the production follow-up processes to focus on the utilization rate	Ensures better integration and appropriation of the KPI by plant teams	Introduction of a dashboard to display the usage rate in real-time.	Process	Reactive	Adaptative
#3	Q4 2017	Introduction of utilization rate as the primary KPI for operations by senior management	Ensure that future continuous improvement and innovation projects will aim to improve the utilization rate of manufacturing equipment.	Need to improve the utilization rate to ensure an acceptable financial return on manufacturing equipment and support its growth.	Political	Reactive	Adaptative
#4	Q4 2017	Creation of the role of digital process manager	Creation of a role focused on Industry 4.0 project planning and delivery to ensure its digital transformation.	Need for Industry 4.0 and project management expertise to deliver Industry 4.0 projects	Structural	Proactive	Adaptative
#5	Q1 2018	Modification of project monitoring governance	Improve the visibility of the Industry 4.0 projects and their progress with the different stakeholders of the digital transformation	Lack of formal project monitoring governance and project management processes	Political	Reactive	Adaptative
#6	Q2 2018	Creation of an expertise center specialized in Business Intelligence and ERP projects	Creation of a center of expertise for developing, integrating, and supporting the company's ERP functionalities and business intelligence.	A clear strategic vision of maturation to support the company's IT function and facilitate the support and transition following the introduction of a new ERP system. Integration of a business intelligence platform as part of the company's Industry 4.0 portfolio of projects	Structural	Proactive for ERP Reactive for BI	Transformative
#7	Q3 2018	Introduction of agile project management processes	Improve the management of the different ERP and BI projects and allow continuous BI reports and ERP module delivery.	Current BI reporting processes could not support a transition from reporting to business intelligence. It was also necessary to introduce processes to manage all the modifications and optimization of the ERP system.	Process	Proactive	Adaptative

Table 4.2- Organizational Changes during the Industry 4.0 transformation (cont'd)

#	Date	Organizational Change	Objective	Trigger	Type	Preparedness	Magnitude
#8	Q4 2018	Introduction of data governance	Ensure management of the quality of the data that will be used for business intelligence purposes	The power bi platform project demonstrated gaps in data management in the various departments operating the ERP system	Political	Reactive	Adaptative
#9	Q4 2018	Creation of the role of software architect and the role of superuser ERP	Acquiring in-house expertise to carry out Industry 4.0, it and ERP projects	Lack of internal expertise readily available to support various Industry 4.0, bi platform, and ERP projects.	Structural	Reactive	Adaptative
#10	Q1 2019	Overhaul of the innovation and infrastructure department	Divide the infrastructure, IT, and innovation teams into separate teams to facilitate the management of the department's growing internal resources and the allocation of budgets.	The initial structure did not adequately support the growing team.	Structural	Proactive & Reactive	Transformative
#11	Q1 2019	Changing the processes for acquiring and processing quality data	Optimize the quality assurance department's processes following the integration of new equipment allowing the acquisition, processing, and transfer of quality data automatically.	Project to automate the acquisition and processing of company quality data	Process	Proactive	Adaptative
#12	Q2 2019	Introduction of the notion of "team lead" in the governance of industry projects 4.0	Facilitate communication with team leaders and managers throughout the company, as well as manage the allocation of floor resources for Industry projects 4.0	A problem of project visibility at different levels of the company and a lack of allocation and cooperation of operations and engineering resources to support Industry projects 4.0	Process	Reactive	Adaptative
#13	Q3 2019	Industry 4.0 training	Facilitate the acceptance of the integration of Industry 4.0 technologies in the plant and obtain the company's employees' support.	Misperception and misunderstanding of projects and Industry 4.0 principles put at risk the company's various projects and the retention of operation employees	Cultural	Proactive	Adaptative
#14	Q4 2019	Manual production data capture process	Enable the capture and assignment of machine and attendance data as part of a project to automate the acquisition of production data	The technological solution selected for the project did not provide all the necessary data, forcing manual data acquisition in the production process.	Process	Proactive	Adaptative

4.4.1.1 Type of organizational changes

Four types of organizational changes were identified. *Process* changes were the majority, followed by *Structural* changes. Very few *Cultural and Political* changes happened throughout the research. *Process* changes were performed to integrate new management and operation processes as part of projects or facilitate the management of the Industry 4.0 portfolio of projects. The *Structural* changes were mainly performed to add new talents and resources to the team and change the department's organizational structure triggered by adding new expertise and employees.

4.4.1.2 Reactive vs. proactive organizational changes

Organizational changes were split in half between *Proactive* and *Reactive* changes. *Proactive* changes were planned as part of the different Industry 4.0 projects. They covered several changes, such as introducing new roles and processes or modifying existing processes during Industry 4.0 projects. On the other hand, *Reactive* changes were performed in reaction to an opportunity, identifying issues within a project, or the transformation 4.0 management process. These changes were quickly performed to remedy these issues and mitigate potential additional risks.

Some changes were part *Proactive* and part *Reactive*. These changes were planned as part of the strategic plan of the department. However, these changes were modified to adjust to new opportunities stimulated by the newly implemented Industry 4.0 technologies.

4.4.1.3 Adaptive vs. Transformative organizational changes

Most organizational changes were *Adaptive*, with only two *Transformative* changes that altered twice the company's Innovation and Infrastructure department's organizational structure. The first was creating a new center of expertise and reorganizing the department. The second was to divide the department into sub-departments several months later. The adaptive changes had less impact but addressed shortcomings and opportunities linked to the company's digital transformation, such as creating new roles within an existing team or introducing new processes as part of an Industry 4.0 project.

4.4.1.4 Triggers and objectives of the organizational changes

Throughout the research, organizational changes were performed to solve shortcomings and facilitate the company's digital transformation. After analyzing these objectives, we can put them into three categories: Support, Project, and Post-implementation.

- **Support organizational change:** Organizational changes made by the company to prepare itself for its Industry 4.0 transformation and create the foundation that will support its Industry 4.0 initiatives. They represent changes in the different project management processes adopted by the company as well as introducing new roles and restructuring the department;
- **Project organizational change:** Organizational changes made by the company through different projects. These organizational changes represent mainly changes that facilitate the introduction of new technologies and processes;
- **Post-implementation organizational change:** The employees and managers identified the company's organizational changes following improvement opportunities once the technologies were implemented.

4.4.2 Organizational changes management approaches

Based on the characteristics of the organizational changes observed, two approaches have been introduced and optimized to manage them. The first approach is a proactive organizational change management approach to facilitate the adoption of Industry 4.0 technologies as part of the digital transformation projects. The second approach is a reactive approach to introduce and improve the tools and processes needed to manage the digital transformation.

4.4.2.1 Proactive organizational change approach during Industry 4.0 projects

We saw that multiple organizational changes were proactively performed during the different Industry 4.0 projects. These organizational changes aimed to facilitate the adoption of the technology by the department employees in which the Industry 4.0

technologies were implemented. The approach is comprised of five elements introduced into the management of each project:

1. **Communication:** A communication plan to announce the arrival of new technologies and update the progress of the projects was introduced for each project.
2. **Stakeholder involvement:** Employees and managers affected by the technology introduction were involved in the selection and prototyping process for each Industry 4.0 project. For each department affected by the new technology, a "superuser" was named and involved in the technology deployment process.
3. **Training:** Training on the new technologies and processes was given to the Superusers and users as part of the project. Training materials were also produced and made available for the employees to refer to.
4. **Support:** Technical support on the technologies was implemented by the end of each project, as well as support training to the superuser to train their colleague and solve low-level issues with the technologies.
5. **Continuous improvement:** Suggestions to improve the technologies and processes implemented with each project were received within the company's continuous improvement processes and prioritized by the digital transformation teams.

The introduction of these five elements within the organizational change management approach facilitated the adoption of Industry 4.0 technologies by involving the stakeholders within the digital transformation process. As such, it allowed for better communication of the project's objectives and progress to the stakeholders and employees and ensured that their questions and suggestions could be addressed. The opportunity to suggest improvement and designing superusers within each department also ensured continuous support to the employees and an improvement path to the systems, consolidating the adoption of the technologies by the employees.

4.4.2.2 Reactive organizational change approach to support the digital transformation

As described in section 4.4.1, most organizational changes were introduced to facilitate the management of the digital transformation by introducing new processes, tools, or resources, performed retroactively based on lessons learned from the Industry 4.0 projects or based on the identification of new needs. These changes were introduced to improve how the digital transformation team managed the company's digital transformation in response to management issues they encountered during the Industry 4.0 projects. To manage these organizational changes, we introduced an iterative reactive approach, as shown in Figure 4.3, which includes five elements.

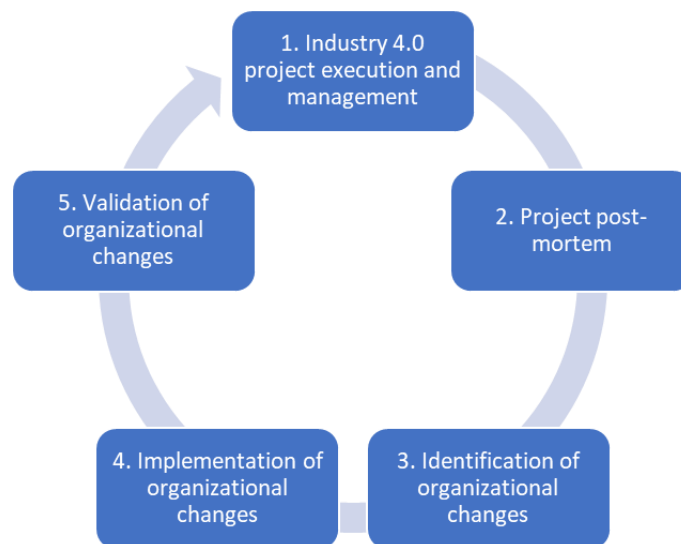


Figure 4.3 - Iterative reactive organizational change approach

Following each Industry 4.0 project, a post-mortem is performed to identify the elements of the digital transformation management process that could be improved. These changes can affect the company's project management process, the digital transformation governance, the management tools, or the resources needed to execute the project. These changes are then implemented and validated by the company's management and introduced within the management process of the following Industry 4.0 projects. After each project,

changes to the management process of the digital transformation are introduced, facilitating the delivery of the projects and the digital transformation management.

This approach also allows the digital transformation team to improve its current processes and tools, bringing forward a continuous improvement approach to the management process of the company's digital transformation. Consequently, the digital transformation team was able to start with simpler management tools and processes and introduced complementary tools and processes over time based on their needs and the issues they faced during past projects.

4.5 Discussion

Multiple elements came to light as we studied the organizational changes introduced by the manufacturing SME and developed the management approaches.

4.5.1 A cycle of smaller consistent organizational changes

It has been shown that SMEs prefer smaller and quicker Industry 4.0 projects to suit their limited resources, shorter implementation time, and faster return on investment (Gamache et al., 2017; Moeuf et al., 2018; Zangiacomi et al., 2018). Since the SME studied did not have the resources or capabilities to overhaul its business during its Industry 4.0 transformation, it preferred implementing small incremental changes with small technology projects to help it mature and transform itself over time. Focusing on smaller incremental projects to implement Industry 4.0 technologies leads to the smaller adaptative project organizational changes we observed within the company. We did not observe any transformative project organizational changes during this study.

Following the implementation of these technologies, reactive changes also took place at different company levels. These changes were triggered by these technologies' opportunities and facilitated by the adaptiveness, flexibility, and innovation culture of the company we studied. Again, these reactive changes were not transformative but rather adaptive changes that affected only one department or a single process.

This constant flow of adaptative changes can be represented as a cycle of organizational changes, as presented in Figure 4.4. In this cycle, a business need will trigger the creation

of an Industry 4.0 project within which a proactive adaptative organizational change will take place to support the implementation of an Industry 4.0 technology. Once the technologies are implemented, improvement opportunities will appear, triggering reactive post-implementation organizational changes within the SME. Once these changes are implemented, new business needs will appear, and thus the cycle will start again.

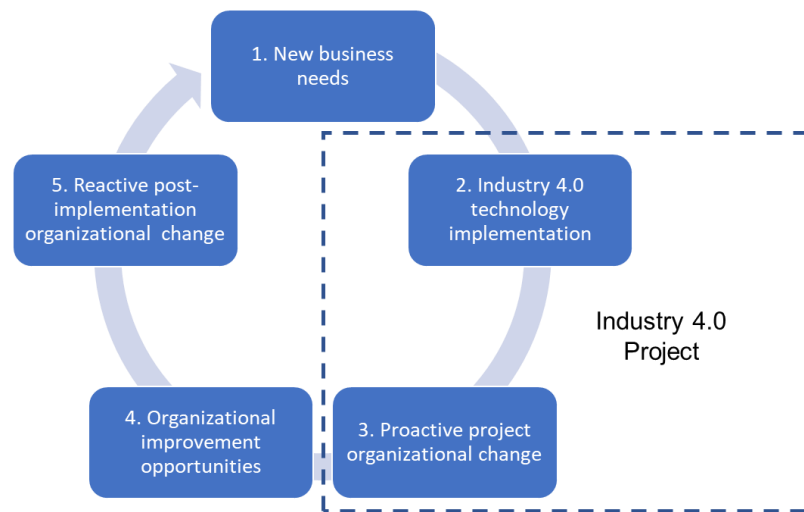


Figure 4.4 - Cycle of SME Organizational changes during Industry 4.0 projects

In summary, instead of one or a couple of significant transformative changes, the SME executed several small adaptative changes through a cycle of proactive and reactive changes from and following the implementation of Industry 4.0 technologies. This succession of adaptative changes brings forward the company's 4.0 transformation over time, resembling more an evolution through Industry 4.0 than a transformation.

4.5.2 Transforming itself to manage its digital transformation

As we saw in the result section, organizational changes took place to facilitate the implementation of Industry 4.0 technologies, capitalize on improvement opportunities following the implementation of Industry 4.0 technologies, and better manage and support the digital transformation of the SME. These organizational changes were both proactive and reactive and were put into place to bring the required expertise, optimize their project

management processes and governance, and support a growing team to digitally transform the company.

Proactive organizational changes were initially implemented to bring project management and Industry 4.0 expertise to the team. However, as the Industry 4.0 transformation progressed, it became apparent to the project manager and management that their digital transformation would happen through multiple smaller projects. This made them reactively change their project management and governance processes to fit their digital transformation context. As the projects progressed, they needed to support the new technologies and optimize their transformation and governance processes. The company then reactively decided to implement structural and process organizational changes to bring in new expertise to support the new processes and technologies implemented, enhance the governance, and optimize their processes: first, initial implementation of simple tools, processes, and governance that would meet the bare minimum of their needs, followed by an evolution towards new processes based on issues or new needs encountered. The evolution of these processes and tools is tightly linked to organizational learning studies that have recently been published in Industry 4.0 (Belinski et al., 2020; Tortorella et al., 2020). These studies demonstrated that organizational learning capabilities facilitated the adoption of Industry 4.0 technologies at every organizational level and positively impacted the digital transformation process. However, as we observed, these organizational learning capabilities also apply to managing a digital transformation, ensuring that the manufacturing SME learns from past projects and improves how it manages its transformation.

These organizational learning capabilities and the SME characteristics also contributed to that dual transformation since it used flexibility and adaptiveness to quickly implement these new structures and processes. When the need for process optimization was identified, the Industry 4.0 project team simply designed and implemented the new process immediately to test it. For the more important changes like the overhaul of the innovation and infrastructure department in charge of the digital transformation, the company used

existing internal processes and justified the changes with the need to optimize their processes and structure to facilitate and support their digital transformation.

4.5.3 The Contribution of innovation culture on the Industry 4.0 transformation

As we described earlier, the company studied was recognized by its peers for its innovative culture fostered at every level of the company. This innovation culture helped the employees of every level to suggest innovative improvements to current processes using the company's available technologies and resources. Once Industry 4.0 technologies started being introduced, the company's employees and management started perceiving opportunities from the new technologies to improve specific processes and their overall productivity performance. Acting on these improvement opportunities pushed the adoption of organizational changes at different levels of the company, triggering even changes in the organization's strategic objectives. This company's innovation culture was one of the main factors behind the post-implementation organizational, reactive and adaptive changes witnessed. These changes solidified the Industry 4.0 technologies within the company to the point that the updated process would become assimilated into the company operations.

The company's innovation culture also had an impact beyond organizational changes. As Industry 4.0 technologies were introduced, several employees and managers could find new ways to use these technologies to solve additional operation issues and business needs, which would trigger additional Industry 4.0 projects, generating additional proactive process organizational changes and reactive post-implementation organizational changes, thus fueling the cycle in Figure 4.4. Further research is needed to better understand the interaction between the company's innovation culture and the creation of Industry 4.0 projects.

4.6 Conclusion

This paper aims to facilitate the management of the Industry 4.0 transformation of manufacturing SMEs by identifying and analyzing the organizational changes introduced and proposing an approach to manage these organizational changes. An intervention-

research methodology was used to detail the different dimensions of these changes, their link to the Industry 4.0 transformation process, and the company's characteristics over 27 months.

In terms of theoretical implications, we observed that the manufacturing SME must manage the organizational changes triggered by the implementation of Industry 4.0 technologies and the multiple organizational changes it will introduce to improve its digital transformation management processes. As such, not only the manufacturing SME will need to properly plan and manage the proactive changes within the Industry 4.0 projects, but it will also need to manage the reactive changes needed to facilitate the management of its digital transformation. Another contribution is the link between these proactive and reactive changes. As we observed, proactive and reactive organizational changes happened as part of a cycle of organizational changes in which proactive changes would be part of the Industry 4.0 projects. However, the Industry 4.0 projects would trigger improvement opportunities, resulting in reactive organizational changes.

This study's findings have practical implications that may benefit managers and consultants approaching Industry 4.0 transformation in manufacturing SMEs. First, understanding the characteristics of the expected organizational changes can help to better plan them. Second, this study underlines the importance and number of reactive changes that can and will happen during an Industry 4.0 transformation and the role of the SME's innovation culture, adaptiveness, and internal processes in facilitating these changes. Finally, we introduced two approaches to manage the proactive and reactive organizational changes that the management of manufacturing SMEs can use.

This study has an important limitation worth mentioning. This study was conducted with only one aerospace manufacturing SME, limiting the finding's generalization (Yin, 2014). Accordingly, one suggestion for further research would be to analyze if the four patterns identified in the results and the cycle of organizational changes in Figure 4.4 can be recreated in other manufacturing SMEs during their digital transformation. Another suggestion for future research would be to investigate how innovation culture can impact

the creation of reactive post-implementation organizational changes and how to manage that innovation culture to facilitate a manufacturing SMEs Industry 4.0 transformation.

**CHAPITRE 5 ARTICLE 2 : COLLABORATIVE APPROACH TO
DIGITAL TRANSFORMATION (CADT) MODEL FOR
MANUFACTURING SMES**

Article accepté dans

Journal of Manufacturing Technology Management

Soumis le 2020-11-04

Accepté 2021-06-23

Rédigé par:

Jonathan BRODEUR

Département des mathématiques et génie industriel

École Polytechnique de Montréal

Jonathan.brodeur@polymtl.ca

Robert PELLERIN

Département des mathématiques et génie industriel

École Polytechnique de Montréal

Robert.pellerin@polymtl.ca

Isabelle DESCHAMPS

Département des mathématiques et génie industriel

École Polytechnique de Montréal

Isabelle.deschamps@polymtl.ca

Abstract

Purpose – This paper aims to propose a collaborative approach model developed based on observations of two aerospace manufacturing SMEs pursuing their digital transformation toward Industry 4.0.

Design/methodology/approach – This research focuses on two manufacturing SMEs in North America, and data were collected using longitudinal case-study and research-intervention method. Data collection was performed through observation and intervention within the collaborative projects over 18 months.

Finding – A model of a collaborative approach to digital transformation (CADT) for manufacturing SMEs was produced. Based on our findings, the collaboration manifests itself at various stages of the transformation projects, such as the business needs alignment, project portfolio creation, technology solution selection, and post-mortem phase.

Research limitations – Research using the case study method has a limitation in the generalization of the model. The CADT model generated in this study might be specific to the aerospace manufacturing industry and collaboration patterns between manufacturing SMEs. Results could vary in different contexts.

Practical implications – The proposed CADT Model is particularly relevant for manufacturing SMEs managers and consultants working on digital transformation projects. By adopting this approach, they could better plan and guide their collaboration approach during their Industry 4.0 transformation.

Originality/value – This research provides a new perspective to digital transformation approaches in the aerospace industry. It can be integrated into other research findings to formulate a more integrated and comprehensive Collaboration Approach for Digital Transformation (CADT) model in industries where SMEs are significant players.

Keywords – Industry 4.0, Small and Medium-Sized Enterprises, Manufacturing Industry, Intervention-Research, Partnership

Paper Type – Research Paper

5.1 Introduction

In a global competition and internationalization of manufacturing supply, pressure to perform and present a competitive advantage push manufacturing SMEs to transform themselves toward Industry 4.0. Industry 4.0 is defined as the 4th Industrial Revolution and represents a set of initiatives aimed at improving processes, products, and services by allowing decentralized decisions making based on real-time data acquisition (Danjou et al., 2016). This revolution includes a dozen technology groups associated with digital transformation, such as cyberphysical systems, big data, artificial intelligence, collaborative robotics (cobots), and 3D printing (Moeuf et al., 2018; Xu, L. D. et al., 2018). Thanks to these technologies, the 4th industrial revolution not only optimizes and enhance the efficiency brought by the 3rd Industrial Revolution, but can also change the dynamics of several industries by allowing the different enterprise to develop new personalized products and services, and new business models (Müller, J. M., 2019; Xu, L. D. et al., 2018).

Many experts view a transformation toward industry 4.0 as the next step for manufacturing SMEs to better position themselves within their supply chain (Ghadge et al., 2020; Xu, L. D. et al., 2018). It is particularly true in the Canadian aerospace manufacturing industry, for which digital transformation will shape aerospace SMEs' future interaction (Benyouci, 2017). However, a lack of resources and talent readily available (Khan & Turowski, 2016; Zangiacomi et al., 2018) slow down the manufacturing SMEs' digital transformation worldwide (Gamache et al., 2017). A collaboration between similar SMEs on industry 4.0 projects has been pointed out as a potential solution (Moeuf et al., 2019; Shinohara et al., 2017; Zangiacomi et al., 2018).

In the Canadian aerospace manufacturing industry, the collaboration between SMEs on research and development and innovation projects is common, with projects involving complementary organizations within the aerospace supply chain or developers of new technologies and potential customers (Prince et al., 2016). However, industry 4.0 is a relatively new phenomenon. It implies the planning and execution of a portfolio of

initiatives (Richard et al., 2021) encompassing technology and new processes implementations and organizational changes (Cimini et al., 2020; Mohelska & Sokolova, 2018). Hence, to perform a collaborative industry 4.0 transformation, aerospace manufacturing SMEs ask for an approach tailored to their context and characteristics that would allow them to explore and learn from a shared portfolio of industry 4.0 projects. This brought the question: *How can two manufacturing SMEs collaborate on a shared portfolio of projects to mutually transform themselves toward industry 4.0?*

To answer this question, a research-intervention project with two collaborating SMEs has been performed, allowing us to develop a model of a collaborative approach for digital transformation and its mechanisms. This paper aims to present our results, i.e., our proposed CADT model, which encompasses the multiple dimensions, stages, and mechanisms for collaboration between SMEs in the context of a mutual digital transformation portfolio of projects.

This paper is divided into five sections: a literature review of the collaborative approach and proposed mechanisms, the research methodology, the research results, a discussion on these results, and a conclusion.

5.2 Literature review

This literature review first looked at how inter-enterprise collaboration between manufacturing SMEs is managed, then looked at studies involving inter-firm collaboration between SMEs in the context of industry 4.0 projects.

5.2.1 Inter-enterprise collaboration between manufacturing SMEs

We refer to "inter-enterprise" collaboration when two or more different enterprises collaborate to realize a project scope or meet a mutual target. Inter-enterprise collaboration can be composed of several strategic, tactic, and operation levels (Andres & Poler, 2016). It is possible to divide inter-enterprise collaboration into two different categories: project collaboration and operation collaboration. As part of this study, we will focus on the context of a project collaboration between manufacturing SMEs.

Project collaborations are happening between two or more enterprises. They can encompass several mechanisms at the strategic, tactic, and operational level (Andres & Poler, 2016) that can be used for product and technology development (Chu et al., 2006; Drossel et al., 2018; Kuehnle & Wagenhaus, 2007; Solesvik, 2008; Yea-Huey et al., 2004) or even to support a third-party project (Wang et al., 2007). The collaboration mechanisms are defined when creating a project's governance and defining each party's roles and responsibilities (Project Management Institute, 2013).

The objective of the collaboration is to offer a specific value at one or both parties or even at a third party in the context of a joint product development or technology development project (Andres & Poler, 2016; Chu et al., 2006; Jie et al., 2011; Kazantsev et al., 2018). The value sought by the two collaborators in our context was to understand how different solutions can be applied to their specific context and choose the solution that better fits their needs while reducing the exploration cost and risk.

Project collaborations can use a "leader and collaborator" approach in which, for each phase of a project, one of the collaborators becomes the "leader" of that phase. In contrast, another becomes the "collaborator", the role changing between the collaborators after each phase based on the collaborators' expertise and resources to execute that phase (Chu et al., 2006). Project-based collaboration can also happen under a buyer-supplier relationship where the technology supplier will lead the development of a product, a service, or a technology for a specific buyer (Wang et al., 2007). This collaboration happens more often between companies in the same supply chain, with the buyer being higher up in this supply chain (Andres & Poler, 2016; Wang et al., 2007).

5.2.2 Collaboration on industry 4.0 projects within manufacturing SMEs

Multiple studies within the industry 4.0 and SMEs research domain have focused on how the characteristics of manufacturing SMEs would translate as part of their digital transformation, the challenges they would face, potential opportunities, and a set of best practices (Mittal, Khan, et al., 2018; Moeuf et al., 2018; Piccarozzi et al., 2018). Two of the main characteristics of manufacturing SMEs affecting their industry 4.0 transformation

are their lack of available resources and talents to support (Khan & Turowski, 2016; Zangiacomi et al., 2018) and their focus on short-term strategies that prevent long-term investment (Moeuf et al., 2018).

The lack of readily available resources and talents within the manufacturing SMEs to execute and manage their digital transformation have been described as one of the main challenges faced by manufacturing SMEs, as with the acceptance of industry 4.0 within the employees and clear strategic vision (Moeuf et al., 2019; Stentoft et al., 2019; Zangiacomi et al., 2018). This situation forces them to seek new resources to execute their digital transformation (Moeuf et al., 2019), to properly plan the introduction of new processes through their project (Moeuf et al., 2019; Zangiacomi et al., 2018), and to invest in the training of their current workforce (García de Soto et al., 2019; Zangiacomi et al., 2018).

In order to overcome their short-coming, studies have suggested that one way for manufacturing SMEs to progress through their industry 4.0 transformation was to pursue collaborative projects (Moeuf et al., 2019; Shinohara et al., 2017; Zangiacomi et al., 2018). Indeed, a lack of collaboration between SMEs has been identified multiple times as one of the main barriers to their industry 4.0 implementation (Ali & Aboelmaged, 2022; Mittal, Khan, et al., 2018; Stentoft et al., 2019; Veile et al., 2019).

Collaborations could be performed with universities, industry 4.0 technology development companies, or other manufacturing companies at a different level of the same supply chain and have been presented through multiple case studies research (Benitez et al., 2020; Cisneros-Cabrera et al., 2021; Moeuf et al., 2018; Zangiacomi et al., 2018). These case studies have highlighted challenges encountered during the collaborative industry 4.0 projects (Chen et al., 2018; Ghadge et al., 2020; Zangiacomi et al., 2018) as well as the gains and opportunities encountered by the companies through their collaborations (Cisneros-Cabrera et al., 2021; Ghadge et al., 2020; Lazarova-Molnar et al., 2018; Moeuf et al., 2019).

It was also showed that the utilization of inter-firm collaboration within a supply chain was necessary to facilitate the industry 4.0 transformation of the whole supply chain (Cisneros-Cabrera et al., 2021; Culot et al., 2019; Ghadge et al., 2020; Müller, J. M. et al., 2020),

which would bring better coordination and communication, a higher level of responsiveness and a higher level of customer satisfaction (Barratt, 2004; Cisneros-Cabrera et al., 2021; Ghadge et al., 2020; McLaren et al., 2002).

Overall, collaborations have been shown to facilitate industry 4.0 transformation by sharing complementary resources, reducing financial risks associated with exploring new solutions, and discovering new opportunities for the partners (Della Corte, 2018; Lazarova-Molnar et al., 2018; Veile et al., 2019; Zacharia et al., 2019).

5.2.3 Research limitations

Collaboration on industry 4.0 projects between manufacturing SMEs has been studied and has been identified as a way for manufacturing SMEs to facilitate their industry 4.0 transformation. However, these studies fail to present how the collaboration occurs between these companies. They also fail to explain how the context of their industry 4.0 transformation and these SMEs' characteristics affected their collaboration. Finally, they fail to establish the limits of collaboration when used to facilitate the industry 4.0 transformation of competing manufacturing SMEs.

5.3 Methodology

The research methodology was based on research-intervention and case study methodology. The research-intervention methodology allows the researcher to actively participate in the day-to-day operations of a partner company, allowing the researcher to observe daily the events and processes of his research subject (Johansson & Wallo, 2019; Patton, 2014). This methodology also allows the researcher to test and optimize theoretical models and mechanisms on the subject and observe how these models and mechanisms are received and evolve within the research subject.

The case study methodology is also used and is particularly useful for researchers who want to study in-depth an event or process within a specific research context (Morris & Wood, 1991). During case study research with only one subject, the results cannot be generalized, limiting our findings to that particular case (Ahlskog et al., 2017). It will, however, provide the in-depth information needed to properly illustrate how collaboration

can be performed between two manufacturing SMEs during their industry 4.0 transformation (Yin, 2014). This methodology has been used far and wide for qualitative research in the manufacturing industry (Flores-Garcia et al., 2021; Lavikka et al., 2015).

This research's objects were two enterprises in the aerospace manufacturing industry positioning themselves at the same supply chain level, specializing in manufacturing small structure and engine components. The two enterprises started their industry 4.0 transformation around six months before their collaboration. They shared similar IT architecture, business processes, customers, and culture, enabling them to understand each other and identify several collaboration opportunities for industry 4.0 projects.

5.3.1 Description of the case study

The two subjects of the case study are aerospace manufacturing SMEs in the region of Montreal, Canada. Both enterprises are part of an industrial cluster named "Aero-Montreal" that regroup aerospace SMEs around Montreal's regions. This cluster is similar to other aerospace clusters found in France and the United States (Benyouci, 2017). It can be compared to other manufacturing clusters worldwide (Halse & Ullern, 2017; Sheen & Yang, 2018; Zangiacomi et al., 2018). Characteristics of both companies can be found in Table 5.1 and subsequent sections.

Table 5.1 - Companies characteristics

	Company A	Company B
Size	200-300 employees	100 employees
Number of Sites in Canada	4	1
Annual Revenue	75M-90M CAD	45M-60M CAD
Industry	Small aerospace components manufacturing	Small aerospace components manufacturing

5.3.1.1 Company selection criteria

These companies have been selected because they are part of the aerospace manufacturing industry in the province of Quebec. The aerospace industry in Quebec is the third-largest globally, involving more than 60,000 workers, with 43,000 in the manufacturing sector alone. This industry also includes five international aerospace OEMs, 15 Tier two partners, 185 Tier three and below suppliers, all SMEs in Montreal alone. Aerospace is also the most crucial export sector in Quebec, with 12% of the overall manufacturing exportation of the province (Innovation, Science and Economic Development Canada, 2019; Howe & Dumitru, 2017). Because of the importance of this sector and the fact that this industry heavily relies on manufacturing SMEs as suppliers, we decided to select two companies in this industry.

Also, Gamache et al. (2017) evaluated the level of industry 4.0 readiness and maturity of 148 manufacturing SMEs in Quebec. They determined that most of them were still at the beginning of their industry 4.0 transformation. Since our objective was to establish how two SMEs could collaborate for their industry 4.0 transformation, we needed to select two SMEs with the same level of industry 4.0 maturity and with a level similar to the industry average.

By selecting two aerospace manufacturing SMEs at the start of their digital transformations, we ensured that we could adequately represent the manufacturing SMEs sector of Quebec and thus generalize our findings for this specific industry and region. However, since industry 4.0 transformations within SMEs are heavily influenced by their internal processes and equipment (Gamache et al., 2020; Moeuf et al., 2019), we added two more criteria for our final selection. The two companies needed to possess similar operation processes and a similar IT infrastructure and types of equipment.

5.3.1.2 Business objectives

Both companies are seeking collaboration to explore industry 4.0 solutions to accelerate their respective digital transformation. At the beginning of their collaboration, both companies agreed to collaborate to allow them to negotiate a better price for proof-of-

concept with the solution provider and the opportunity to explore several solutions for shared problematic and business needs. This led the two companies to collaborate on a shared portfolio of projects composed of exploration projects for the different digital solutions that can address their multiple business needs.

5.3.1.3 Supply chain positioning

Both companies' business model is based on long-term contracts with Tier 2 and OEM aerospace companies to manufacture and assembled small aerospace components for aircraft structure and engine. The two companies are part of the same supply chain for several of their customers and have been considered competitors on several contracts until recently. Today, each company specializes in manufacturing different niche aerospace components based on its expertise and strategic objectives. This specialization allowed them to become leaders in their respective niche markets while keeping similar business and operation processes. It is to be noted that both enterprises are heavily involved in the Montreal aerospace cluster and have been known to collaborate on solving issues arising in their businesses to find solutions that would benefit all cluster members. Thus, we can assume that the two collaborators share a similar position within the same supply chain.

5.3.1.4 Resources

Both companies had similar financial resources ready to be dedicated to collaborative projects. They were ready to divide the cost of the collaboration as close to fifty-fifty as possible. Company A had a project manager fully dedicated to the projects and an IT and application architecture expert ready to support the projects in terms of human resources. Company B also had a project manager dedicated part-time to the collaborative projects and did not have any IT and digital experts as part of its team. The two companies also relied heavily on external resources and expertise to complete their industry 4.0 projects.

The project team of both companies can be found in Table 5.2. Both project teams used several external resources for their industry 4.0 projects.

Table 5.2 - Project teams

	Company A	Company B
Internal Resources	• Project Manager • Software Architect • IT Specialist • Quality Engineer	• Project Manager • Industrial Engineer • Quality Engineer
External Resources	• Industrial and automation Engineer • Software Engineer • RFID Engineer • Project Coordinator	• Automation Engineer • Software Engineer • RFID Engineer • IT Specialist • Project Coordinator

5.3.1.5 Project and Portfolio Management process

Both companies have a simplified project and portfolio management process. It involves creating a project charter at the beginning of a project detailing the scope, resources, high-level schedule, and justification behind the projects. They also managed their projects mainly in terms of schedule and milestones, cost management being performed only on strategic projects, or when the project falls under financial incentives requiring information on project cost and efforts.

5.3.1.6 Internal governance

Both companies possess project governance aimed at reporting project status and decisions taken. In both cases, the project managers report to a member of their respective company's high management weekly for decision-making. They need to report on the project status monthly at a high management meeting composed of senior directors and VPs of all departments.

5.3.1.7 Collaborative projects

As part of this case study, five industry 4.0 projects part of a collaborative digital transformation portfolio were included in this research. All five projects were technology exploration projects aiming to solve shared business and operation issues between them. Details of these projects can be found in Table 5.3.

Table 5.3 - Industry 4.0 projects description

#	Name	Description	Technologies explored	Start-finish date
1	Production data automated acquisition	The project aimed to automatically acquire data from several sources and triggers (CNC sensor data and human presence and identification) regarding the duration of several steps of the company manufacturing processes to perform an accurate cost analysis of production.	• MTConnect and FOCAS II Protocol • Production Management Software • MES • Middleware • IIOT • UHF RFID	October 2018 – March 2020
2	Advanced planning and scheduling	The project aimed to integrate an advanced planning and scheduling software solution to generate detailed scheduling on a work shift basis automatically.	• ERP Scheduling module • MAS scheduling module • Cloud-based APS	June 2019-September 2019
3	Material tracking	The project aimed to track raw materials in different manufacturing floor zones while evaluating how long each batch of raw material stays in each zone.	• IIOT • Middleware • UHF RFID	October 2018 – March 2020
4	Quality Data automated Acquisition	The project aimed at automating the acquisition transfer of quality data from CMM and hand-measuring devices to an aerospace quality management software able to perform quality analysis and transfer the analytics report to their customers.	• IoT measurement device • Bluetooth measurement device • Middleware	September 2019 – March 2019
5	Digital traveler	The project aimed at introducing digital traveler and digital work instruction to replace paper traveler and instruction on the manufacturing floor	• Digital traveler software • Middleware	November 2019 – March 2020

5.3.2 Data Acquisition and the role of the intervention-researcher

Data acquisition was conducted as part of a research-intervention project with one of the two enterprises (Saunders et al., 2009). The researcher joined Company A as part of its

digital transformation team for 18 months and participated in developing and optimizing the collaborative approach and mechanisms presented in this paper.

Observations on the collaborative approach, the projects' development, and the two companies' characteristics were made during the research by the intervention-researcher. He participated in developing the initial collaborative approach and its optimization with the help of the project coordinator and the project manager of company B. He used the characteristics of the two companies and the context of their portfolio of industry 4.0 projects to suggest and implement incremental changes to the approach and its mechanisms. As part of Company A, the intervention-researcher also acted as the project manager of their industry 4.0 projects. In addition to the observations, internal documents, e-mail, presentation, minute-of-meeting, and discussion with the two companies management and industry 4.0 teams were used to analyze and understand the impact of the companies characteristics on the development of its collaboration and map the final collaborative approach.

5.3.3 Research Phases

The research was conducted in three stages as detailed in Figure 5.1, the first and second stages ending after several cycles of analysis were performed.

- **Initial approach and mechanisms creation:** initial approach creation was achieved by elaborating the collaborative mechanisms at the beginning of the collaboration between the two subjects. The initial approach has been created by the intervention-researcher, Company B project managers, and the Project Coordinator based on best practices and characteristics of the two enterprises.
- **Evolution and observation:** Once the initial approach and mechanisms have been created and validated by the collaboration steering/pilot committee, we let the two subjects use these mechanisms and adapt them based on events happening during the project, the relation between them, and evolving characteristics in each of them. We observed this evolution until the mechanisms stabilize themselves.

- **Final collaborative approach and mechanisms mapping:** Once the mechanisms and the approach stopped evolving, the intervention-researcher mapped the approach observed and develop the CADT model of collaboration mechanisms presented in the result section.

The validation of the initial and the final collaborative approach was performed by the pilot committee composed of the sponsors (VP and General Manager) of the industry 4.0 projects, the two project managers (including the intervention-researcher), the project coordinator, and two independent observers from the organization responsible for overseeing and approving the government financial aid for the collaborative projects. More information on the pilot committee can be found in section 5.4.1.1.

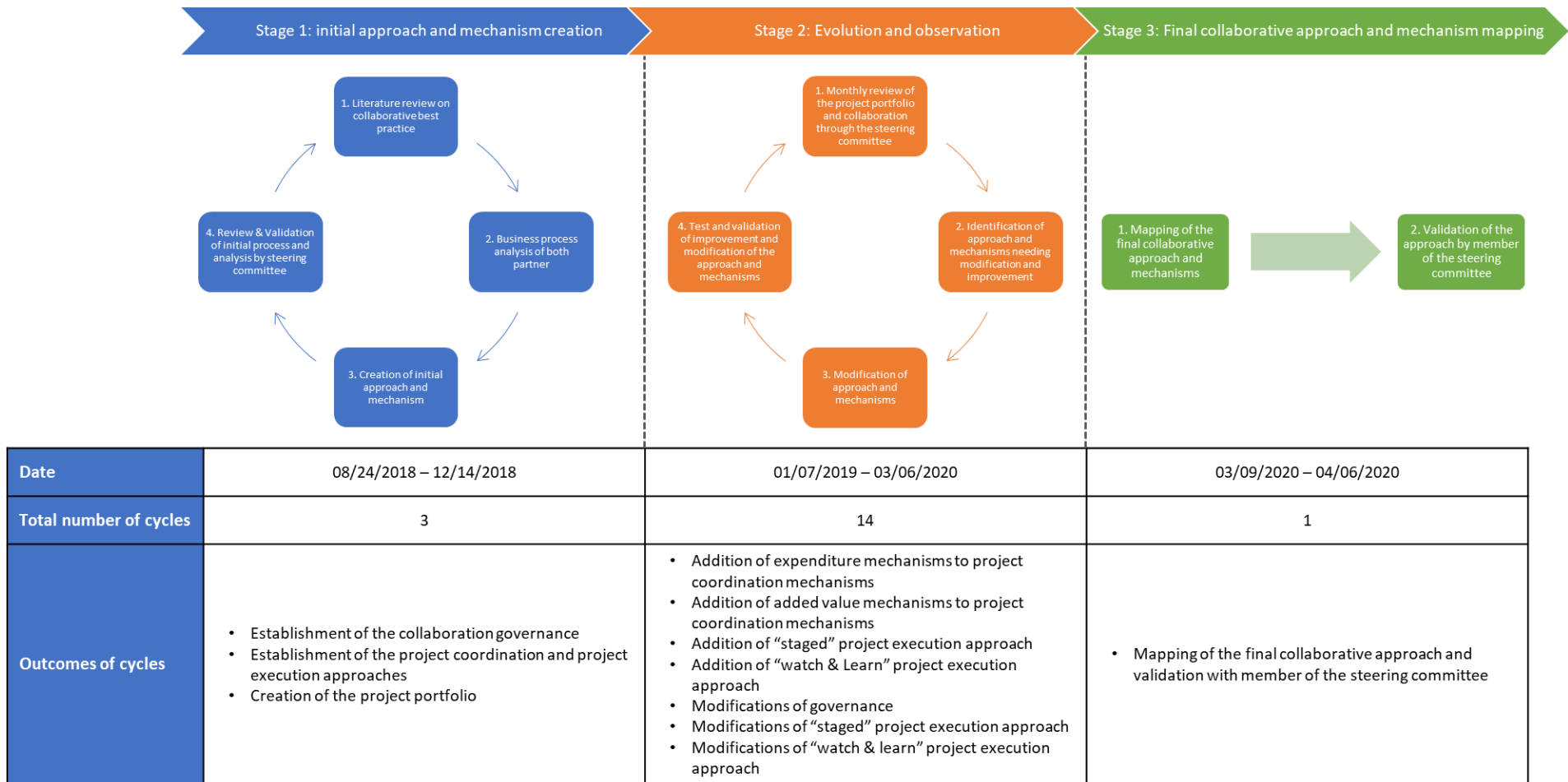


Figure 5.1 - Research methodology

5.4 Results

5.4.1 Stage 1: Initial approach and mechanisms creation (CADT Model, version I)

5.4.1.1 Governance model for decision-making and project coordination

The collaborative approach started with identifying stakeholders and developing a collaborative governance model to facilitate collaborative decision-making and project coordination. The stakeholder identified for this collaboration was the following:

- Project managers and project teams of both enterprises;
- Independent project coordinator hired by both enterprises to properly manage the collaborative projects and act as an impartial expert for both enterprise;
- Project sponsor of both enterprises composed of senior management members; and
- Independent advisors from the aerospace cluster in charge of financing the projects were present to ensure that the collaboration benefits both enterprises and that the collaborative projects are receivable for government financing.

The governance model for decision-making, as shown in Figure 5.2, is divided into three levels:

- **Strategic Level:** Strategic decision-making is done during the pilot committee meeting. The necessary information and options are presented to the sponsor of the projects by the project coordinator and input from the different advisors, project coordinators, and project managers;
- **Tactical Level:** Tactical decision-making is performed during the weekly project coordination meeting between the project managers and project coordinator. Tactical decision-making can also be performed during weekly meetings between the project manager and each company's project sponsor; and

- **Operational Level:** Operational decision-making is performed daily by the project team of each partner.

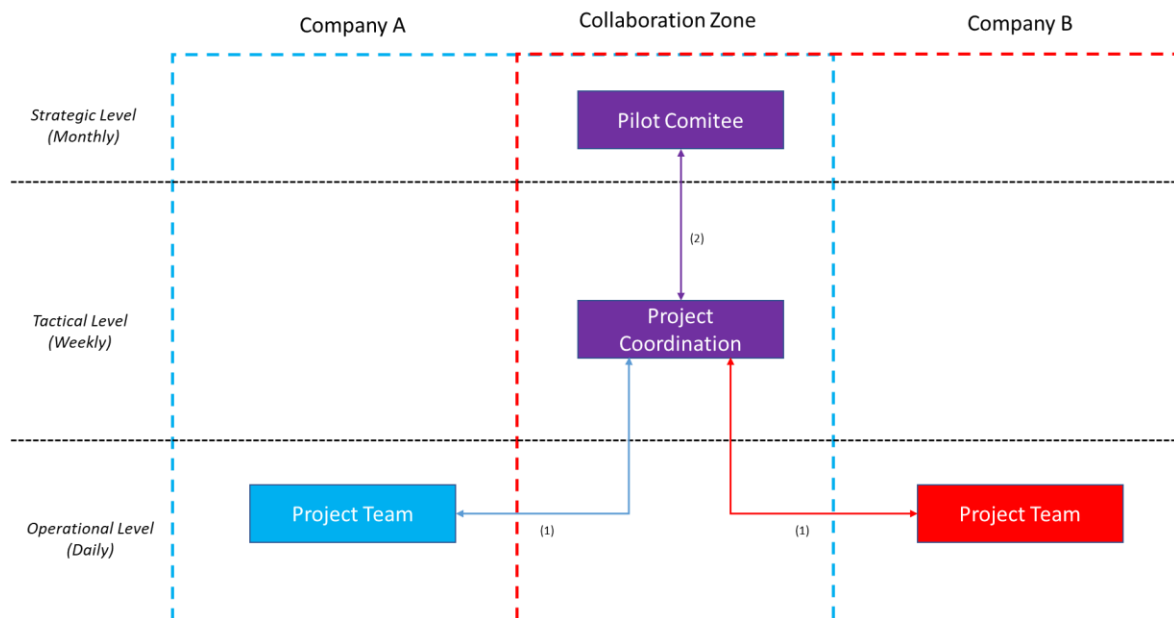


Figure 5.2 – Initial collaborative governance

Included in this collaborative governance are three different governance levels and two flows of communications between these governance levels:

- **Project team** – The project team meeting of each company happens daily and discusses what was done the day before, what will be done today, and if any issues need to be addressed during the day. This meeting is prepared and managed by the project manager of each enterprise. Low-level planning is performed;
- **Project coordination** – Project manager of each company plus one independent project coordinator. Weekly meeting to follow up on the projects, making sure that both companies advance at the same time and that efforts are appropriately divided. High-level planning and coordination of the project portfolio between the two partners is also performed during this meeting; and
- **Pilot committee.** Monthly meetings with project managers, project coordinator, sponsor of both companies (VP and director), and advisors (industrial clusters,

consultant firm and non-profit intermediary). This meeting scope is to decide on portfolio components (inclusion or exclusion of the project), project scope change, budget allocation, and monitoring and presenting results of the exploration.

The flow of information presents the information being passed through the different governance layers.

1. (a) From Project Team to Project Coordination:
 - Project status
 - Budget and spending during the week
 - Deliverables accomplished during the week
 - Issues affecting the projects
 - List of tasks planned for the following week
- (b) From Project Coordination to Project team:
 - High-level planning and schedule change
 - Project scope changes
 - Resources allocation decision
2. (a) From Project Coordination to Pilot committee:
 - Portfolio status and schedule
 - Portfolio budget and actual cost
 - Deliverables and exploration report
 - High-level issues affecting the projects and the portfolio in itself
- (b) From Pilot committee to Project Coordination:
 - Project scope change
 - Budget change and resource allocation
 - Solution Selection following exploration reports

5.4.1.2 Project portfolio creation

As shown in Figure 5.3, the project portfolio creation started with a business needs analysis of both companies and architecture design. The business needs analysis was performed by the project manager and sponsor of each company individually. It highlighted the

company's main business processes to improve, optimize, or transform with Industry 4.0 technologies.

Once the business needs analysis was performed, a system architecture design was performed by the project coordinator and the project managers to establish a standard system and process architecture that would encompass all the business needs of both companies. The architecture was then presented to the sponsor and advisor during a pilot committee and approved.

Once the standard architecture was created, the portfolio scope was defined as a set of projects to evaluate and test Industry 4.0 technologies to select the best solutions for each partner. The team divided the different needs into architecture components and defined the portfolio projects. The project portfolio focused mainly on proof-of-concept projects for both collaborators to explore different solutions to their business needs.

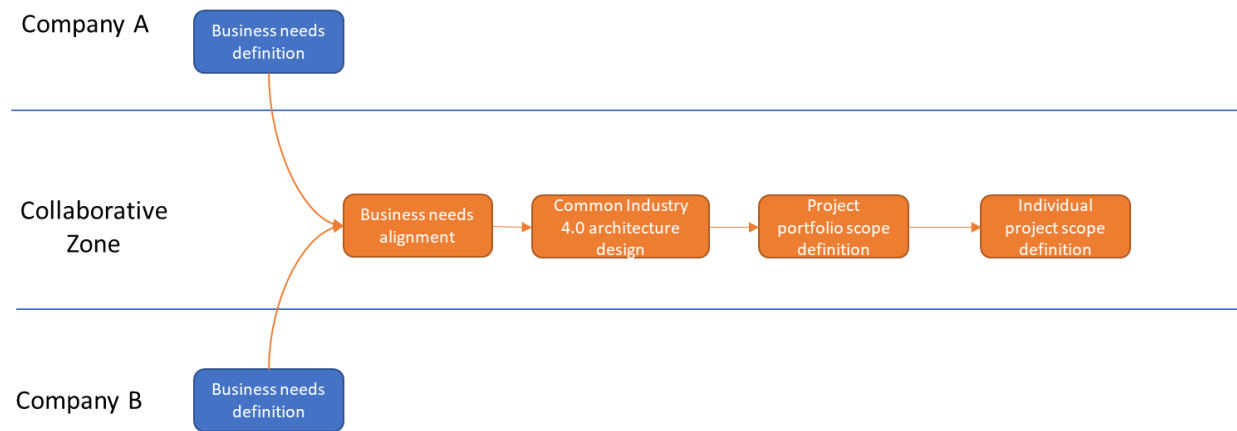


Figure 5.3 - Portfolio creation approach

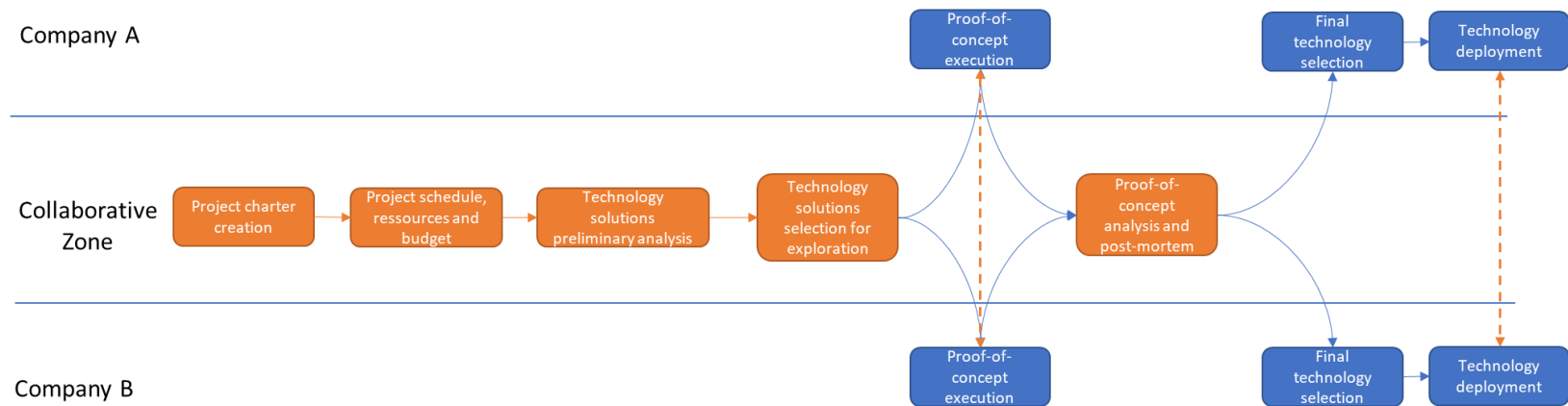


Figure 5.4 - Collaborative project execution

5.4.1.3 Collaboration coordination

Coordination is performed through the governance model with ad hoc communication between the project managers of each partner. Coordination is performed by comparing the actual schedule with a baseline for both companies and readjusting the schedule and resources so that both partners can reach the end of the project simultaneously. Coordination is performed by aligning resources (internal and external) and tasks based on the schedule, deliverables, and availability of these resources.

5.4.1.4 Collaborative Projects Execution

Project execution is solely managed by each company's project manager, adjusting the project's execution mechanisms based on the scope, resources, and type of project. Execution is performed by both companies' internal resources, external resources hired by each Company, and shared external resources.

Based on both companies' internal project management processes described before, the projects are followed solely on a deliverables and schedule basis. Both project managers mainly planned tasks weekly to reach one of the project's collaborative milestones and deliverables. Budget management is performed by comparing the total actual cost of the projects to the overall project budget. Internal costs are estimated with an average hourly wage and the total number of hours spent on each project. External costs are measured only in terms of paid invoices.

The projects are approaching a dual-exploration type of project as shown in Figure 5.4: The project scope aims to explore two different technologies for similar processes shared by the partners. The schedule, budget analysis, and technology selection are made in collaboration between the two companies. The preliminary analysis and the selection of the two technologies are performed in collaboration between the two companies. Once it is done, the proof-of-concept execution is performed individually with a weekly update on the project status and progress. Once both projects are completed, a proof-of-concept analysis and post-mortem of each project are performed. A final selection on which

technologies to implement is performed by each company, followed by these technologies' deployment. At this point, the collaboration on the project is ended. However, both companies agreed to openly share feedback on their deployment and support each other if needed.

Using this mechanism, the two collaborators were able to test and observe two different solutions in parallel while minimizing cost and risk compared to testing both solutions individually. It also allowed the collaborators to observe the solution working in slightly different manufacturing environments and ensure that the solution would be flexible enough to adapt to their processes and infrastructure.

5.4.2 Stage 2: Evolution and observation

As the collaboration progressed between the two companies, several events and opportunities occurred, forcing the two companies to react accordingly by modifying and optimizing the initial mechanisms and approaches. These events have been divided into three categories: *Strategic decision and change*, *Project coordination and communication*, and *Project scope evolution*.

5.4.2.1 Strategic decision change

Strategic decision-making in both companies will affect the scope of the different projects and the expectation of the management of both companies regarding the collaborative project portfolio. As observed, unilateral decisions by the management of one of the partners can happen and impact the project's scope, allowed resources, and schedule.

Over the 18 months of the collaboration, each company's unilateral strategic decision impacted the shared project portfolio. New stakeholders joined the project on each side, initial resource allocation was revised, and project scope for some projects changed. As these unilateral decisions occurred in each company, the governance model of the collaboration had to evolve to consider each company's decision-making process. The evolved model will be presented in the next section.

5.4.2.2 Coordination and communication

As time passed, both companies started sharing more information regarding their project execution and improved their collaboration to solve problems in their exploration projects. As they shared more information over time, communication between the two project managers at the operational level started happening weekly and then daily. This ad hoc communication ensured better coordination between the two enterprises as they could adequately coordinate their efforts at the operational level on collaborative tasks. These ad hoc communications also allowed for a more efficient problem-solving process, allowing both companies to share solutions they created on similar problems they encountered.

This element also contributed to the governance model's evolution by adding ad hoc communication at the operational level between the two project teams.

5.4.2.3 Costing and strategic pivot

As the project portfolio's different projects advance and finish, new opportunities arise for the two companies following the post-mortem of this project. By the end of their execution, some projects cost less than budgeted, allowing the two companies to define and start a second phase for the project with the remaining budget. For another project, unequal spending between the two companies happened, resulting in one of the two partners paying for nearly 95% of this project's expense. To correct the situation and reach a fifty-fifty spending division between the two partners on the project, they created a second phase. The second company will cover 95% of the project's spending with support from the first company. This project execution mechanism will be presented in detail in the next section.

As we discussed earlier, unilateral strategic decision-making in both companies influenced the decision-making process of the collaboration. Some of these decisions affected the detailed scope and the selected solutions of one project. Even if both companies agreed on shared business needs and system architecture, the business process and IT infrastructure impacted by the project were too different to explore a solution that could answer both their needs adequately. This resulted in the exploration of two different solutions incompatible

with the other company. The two companies still agreed to share their exploration progress, creating a new project execution mechanism presented in section 4.3.

5.4.3 Stage 3: Final collaborative approach and mechanisms mapping (CADT Model, version II)

Eighteen months after the initial creation of the collaborative approach model and mechanisms for digital transformation and their evolution following several events, the collaboration concludes with the following model and mechanisms. We will cover in this section the changes that took place to the different mechanisms and schematize the final collaborative approach.

5.4.3.1 Governance and Decision-making

The governance model used for decision-making has evolved during the case study. Ad hoc communication at the operational level has been included for decision-making and governance meetings in each enterprise. The evolved governance model is presented in Figure 5.5.

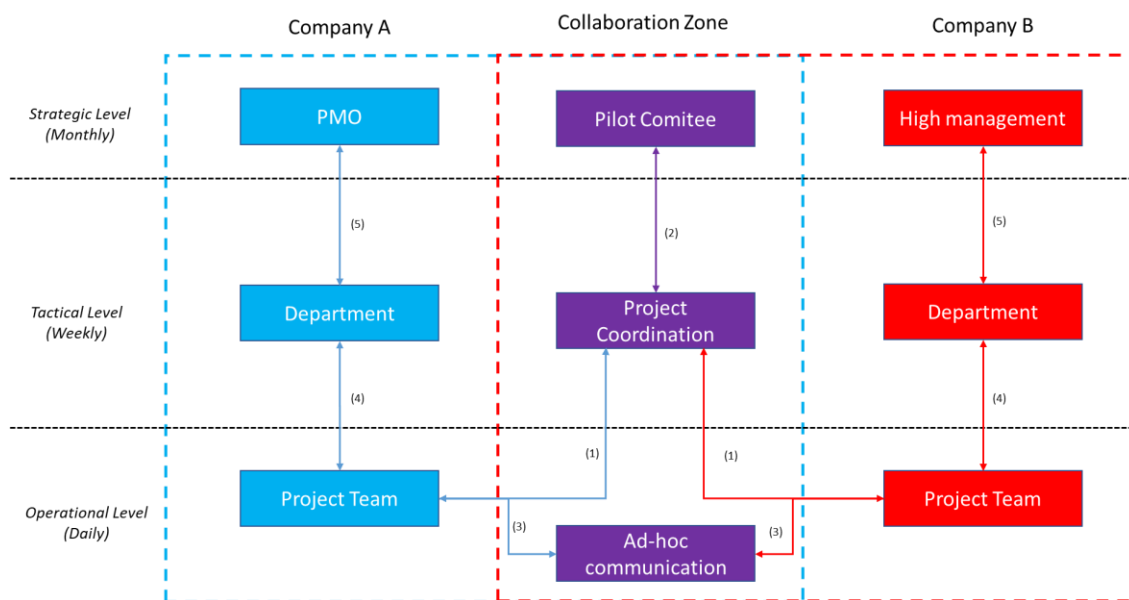


Figure 5.5 - Final governance model

Several new components were added to the governance model:

- **Ad-hoc communication** – As the projects entered their execution phase, several ad hoc communications between the project managers of both companies took place. These communications happened at the operational level and were used to solve issues and discuss decisions on both sides between the two project managers;
- **Department** – Both enterprises had weekly department meetings involving production, quality, and engineering addressing tactical issues over the collaborative digital transformation project portfolio and the other digital transformation projects;
- **PMO (Project Manager's Office)** – One of the enterprises has a monthly PMO meeting involving all its vice-presidents and director. The PMO meeting scope presents the progression of the company's different projects and project portfolio. It takes strategic decisions such as starting a project and overall budget allocation, changing a project or a portfolio scope, and officially ending a project. The decisions are taken based on the overall strategy and situation of the company; and
- **High Management** – This meeting is similar to the PMO meeting but happens in the second enterprise. It is a monthly meeting used to review all its projects and project portfolio at a high level with all its VPs and directors. Strategic decision-making is performed during this meeting, such as project approval, budget allocation, scope change, and project suspension.

The flow of information between the governance meeting presents the information being passed through the different governance layers. For the final governance model, we will only focus on the additional flow of information that was not part of the initial model.

3. From Project Team to Ad hoc communication
 - Project status
 - Operational issues and solutions
 - Effort coordination on collaborative tasks
4. (a) From Project team to Department

- Projects Status
- Projects Cost
- Projects plan and deliverables
- Issues
- (b) From Department to Project team
 - Resources and budget allocation
 - Priority change between project
- 5. (a) From Department to PMO / High management
 - Projects Status and realizations
 - Projects Cost
 - Issues
- (b) From PMO / High management to Department
 - Scope change of the projects
 - Strategic decision on projects
 - Budget approval
 - Project termination

5.4.3.2 Project Coordination

During the collaboration duration, uneven spending between the two companies on some projects led to the need to change the scope and how some projects would be executed. To better coordinate and split the efforts and budget between both enterprises and make sure that both companies' spending was even on each project, budget management, earned value, and expenditures were added to the project coordination and pilot committee meeting.

The external project coordinator introduced these mechanisms with the assistance of the project managers of both companies. The project managers would manually gather the budget and spending information on each of their projects and report the actual spending monthly to the project coordinator. The project coordinator would then consolidate both companies' information and present them to the pilot committee member.

5.4.3.3 Project Execution

Based on the events and evolution discussed in the past section, two additional project execution mechanisms have been introduced to manage the collaborative projects, bringing the number of project execution mechanisms to three. The additional project execution mechanisms will be named "staged" and "Observe & Share" project execution mechanisms.

5.4.3.4 "Staged" project execution mechanism

The "Staged" project execution mechanism, as shown in Figure 5.6, is characterized by the fact that it is a single exploration project divided into stages. For each of these stages, one of the collaborators will act as the leader and cover most of the project's effort and expense, with the other collaborator supporting the leader's effort. It is very similar to the approach seen in other case studies of product development where one of the companies acted as a leader and the other as a follower (Chu et al., 2006). Like the initial project execution approach, the two collaborators will define and plan the project and select the best solutions to explore. However, the project will be divided into the execution phase, with each partner selecting the phase that it will lead. The phase leader is selected based on the resources available and knowledge of the solution at that phase.

This mechanism was used on a single project in which both collaborators chose a single solution to solve the same business needs. This solution was selected because the solution was an industry standard with an interface to send data directly to their customers, thus using another solution was not an option for this project. The project was divided into exploration phases around one or several features of the solution and aimed at exploring how to integrate these features with their respective processes and infrastructure. A leader between the two collaborators was chosen for each phase based on their available resources, expertise, and experience with similar features and their integration. This collaborator would cover most of the effort and expense for this stage, while the other will act as a supporter if needed.

This mechanism allowed the two collaborators to explore the different features of this single solution in depth while testing how to integrate it within their processes and infrastructure. It also allowed both collaborators to fully exploit each other's expertise and experience during each stage, accelerating the exploration with a smaller learning curve of the features.

5.4.3.5 "Observe & Share" project execution mechanism

The "Observe & Share" project execution mechanism, as shown in Figure 5.7, was developed following a change of scope for one of the projects, resulting in the exploration of two different solutions not compatible with the other company processes and infrastructure. The two collaborators shared a vision around the automation of their scheduling process. However, significant differences in their respective manufacturing cell's process and infrastructure forced them to look at individual solutions specialized for their specific process and infrastructure. Nonetheless, both collaborators wanted to observe and learn from each other's exploration.

This project execution mechanism is characterized by similar business needs being addressed in two different and non-interchangeable ways by the two collaborators. As we discussed in the previous section, this mechanism came from the difference in architecture and process between the collaborator under the same business needs, bringing them to select different solutions to solve it that the other collaborator cannot use. Still, the two collaborators decided to share information, decision, and insight during these projects' execution. They performed the post-mortem of both solutions together, sharing lessons learned and spiking exchange and discussion about their overall manufacturing approaches, infrastructure, and scheduling processes.

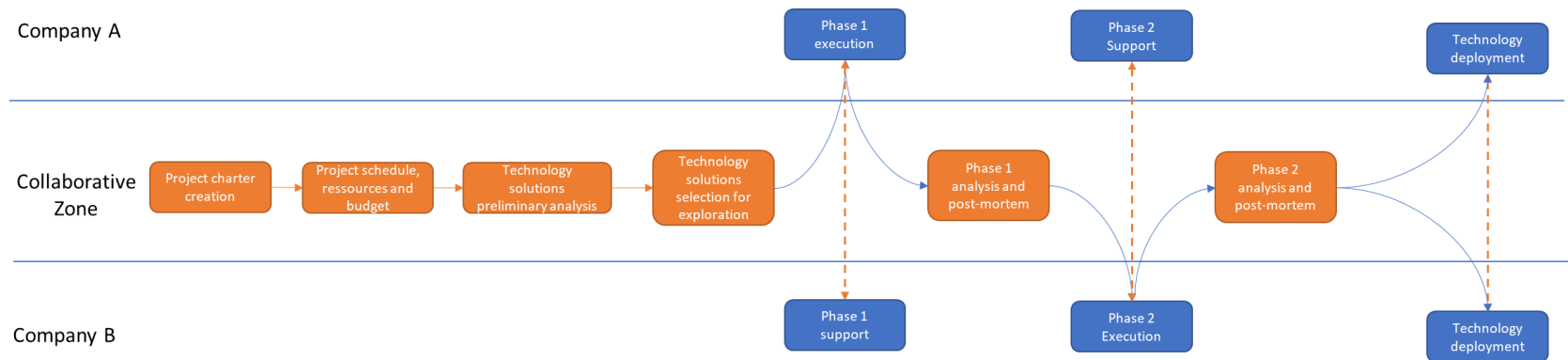


Figure 5.6 – "Staged" Project execution

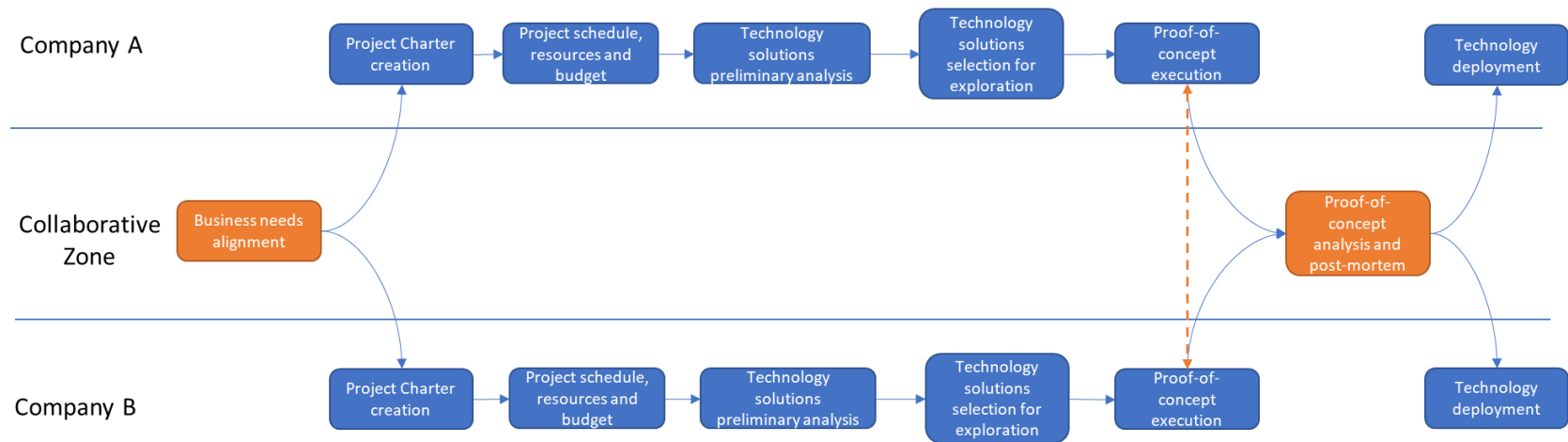


Figure 5.7 - "Observe & Share" Project execution approach

5.5 Discussion

This study's objective was to present a collaborative approach and mechanisms for a mutual digital transformation portfolio of projects. To do so, we divided our main objective into three sub-objectives: to develop an initial collaborative approach and mechanisms based on best practices and the two SMEs characteristics, monitor the evolution of the approach and mechanisms over 18 months, and propose a final collaborative approach and mechanisms. As we followed this collaboration and created the approach and mechanisms, several elements came to light.

5.5.1 An approach for collaborative exploration of industry 4.0 technologies

The collaborative approach designed and used by these two enterprises focused on exploring several Industry 4.0 technologies to solve shared business needs with a similar vision and architecture. These needs and similar architecture became the foundation of a shared industry 4.0 exploration project portfolio, with each project scope addressing a specific business need. Since the two companies could not see any benefits for them to collaborate on a full-scale deployment of this architecture, they decided to focus their collaboration on finding the best industry 4.0 solutions fitting this architecture, their needs, and their business processes and IT infrastructure. They then decided that the scope of the projects and the collaboration scope would be to explore solutions to support their shared business needs.

Industry 4.0 transformation in manufacturing SMEs can be performed through a cycle of small projects and bring multiple opportunities to solve a business needs by combining different technologies (Moeuf et al., 2019; Moeuf et al., 2018; Xu, L. D. et al., 2018). Thus, scoping the portfolio and its projects on their business needs and architecture instead of a particular set of technologies allowed the two companies to explore together different technologies and processes within each company as part of the same collaborative project. This approach also gave them the flexibility needed to explore industry 4.0 solutions tailored to their business processes, equipment, and IT infrastructure. As these exploration projects concluded, they were able to verify if the solutions they tested would fit their business processes and infrastructure and ultimately decide which solution should be deployed.

The two companies did not collaborate on the implementation phase since they perceived it would not bring them any advantages and could expose trade secrets. After evaluation by the two

companies' management team, they agreed that they could not afford to let their employees spend time implementing similar technologies in the other company. So, in terms of cost and competitive advantage, actively collaborating on the implementation was not worth it. However, both agreed to keep sharing information on how they managed to implement their selected solutions on an informal basis. As such, the collaboration was limited to exploring industry 4.0 solutions, limiting the potential use of the CADT model.

5.5.2 Resource-sharing and negotiation

Since one of the main elements preventing SMEs from performing their digital transformation toward industry 4.0 was the lack of specialized resources and talents (Khan & Turowski, 2016; Zangiacomi et al., 2018), the collaboration was used to share expertise between the two enterprises. The two companies shared their complementary expertise and experiences by having their employees perform joint workshops and present past and current projects at each other's headquarters. It is essential to mention that employees could not work directly on the other company's solutions and spend time and effort at the other company's exploration site. They did, however, openly shared information and insight on each other's projects when asked for help.

External resources, like solution providers and independent experts, were shared between the two collaborators. The project coordinator supervising the shared portfolio of projects was one of these external resources, working in parallel for both companies at a fifty-fifty divided rate. Solution providers' resources and experts were also shared between the two companies when needed. This division of external resources allowed the two collaborators to split the risk and cost of a potential solution between them and ensured that the industry 4.0 solution would be flexible enough to support slightly different IT architecture and processes.

Since one of the challenges facing SMEs during their industry 4.0 transformation is the initial cost of technologies (Mittal et al., 2019; Moeuf et al., 2019), the two companies secured lower technology costs through their collaboration. By acting as a single entity when meeting with potential Industry 4.0 solution providers, the collaborators demonstrated a higher negotiating power when discussing terms of use and cost with them. They did it by exposing the nature of their collaboration, explaining their project execution approach and how they would evaluate the solutions to push them to compete on price, solution performance, and added value. It allowed the

two collaborators to test different solutions at a lower price with a higher level of support for integrating and testing the providers' solutions and finding the right external resources to support both of them on their projects.

5.5.3 Evolution over time

As we discussed in this article, several events influenced the proposed collaborative approach from its initial stage to its final, showing that the collaboration and the relationship between these companies evolved over 18 months. During that period, these companies learned to work together. They developed ways to improve their collaboration by making incremental changes to their approach and mechanisms in reaction to situations and opportunities from realizing their industry 4.0 projects, bringing us this final approach.

One way these events influenced the collaboration was by adding more mechanisms and complexity when it was needed. Therefore, we saw the creation of two additional project execution mechanisms and the modification of the collaborative governance model. The additional project execution mechanisms resulted from the collaborators' decision to scope the projects on their shared business needs rather than on particular industry 4.0 solutions. It allowed them to adapt how they approached each collaboration project following the progression of the industry 4.0 projects and the results of their industry 4.0 technology exploration.

These events also influenced the approach by adding each enterprise governance as part of the collaborative governance to consider unilateral decisions in both companies. Governance played an essential role in the collaborative approach, both in decision-making and shaping the approach and the different mechanisms, since all changes to the initial mechanisms needed to be approved by the pilot committee. The initial decision-making process was simple. The collaborators would make strategic decisions during the pilot committee based on available information reported by the independent project coordinator and recommendations by both the project coordinator and project managers. However, as we discussed earlier, internal events and unilateral decisions in both enterprises influenced the collaborative decision-making process, forcing it to evolve to consider these decisions. This new governance allowed information and decision from the pilot committee to be reported to each company and vice versa. It ensured a link between each company's unilateral decision-making process and the collaboration.

5.6 Conclusion

This paper's objective was to understand how two manufacturing SMEs could collaborate to perform their respective industry 4.0 transformation. To do so, an intervention-research methodology was used to develop, test, and evolve an industry 4.0 collaborative approach and mechanisms over 18 months, the Collaborative Approach to Digital Transformation (CADT) model. This study highlighted how the initial approach was developed based on both partners' characteristics, studying how the approach and its mechanisms evolved following different events during the collaboration and describing the two partners' final collaborative approach and mechanisms.

In terms of theoretical implications, the collaboration between SMEs has been pointed out as one of many ways to facilitate the industry 4.0 transformation of manufacturing SMEs (Moeuf et al., 2019; Shinohara et al., 2017; Zangiacomi et al., 2018). However, even if industry 4.0 collaborative projects between SMEs have been observed (Benitez et al., 2020; Cisneros-Cabrera et al., 2021; Moeuf et al., 2018; Zangiacomi et al., 2018), none of them explained how that collaboration took place, how the projects were managed or even the limits of these collaborations.

Thus, this study proposes a collaborative approach between manufacturing SMEs to explore industry 4.0 solutions based on a longitudinal case study. The proposed approach and mechanisms showed the multiple ways to execute industry 4.0 collaborative projects based on the partners' resources, expertise, and context, showing how manufacturing SMEs can collaborate as part of their respective industry 4.0 transformation. The governance model developed for decision-making and coordination also highlighted how both companies' governance and internal decision-making process would impact the collaborative decision-making process and portfolio coordination.

This study also explains that collaboration between two similar companies for their digital transformation, and therefore the CADT model, can be limited to exploration and prototyping projects when they are part of the same supply chain. It has been explained by the fact that none of the companies perceived any gain in actively collaborating on the implementation phase compared to the potential cost and trade secret leakage that could result from this collaboration.

This study's findings also have direct practical implications that may benefit managers and consultants looking to explore industry 4.0 solutions in a collaborative matter. First, the different mechanisms and approaches will give them insight into how to structure and execute their collaboration to explore industry 4.0 solutions and pilot their digital transformation. These mechanisms and approaches can be applied as a foundation for developing a similar type of collaboration approach. Since best practices, approaches, and management mechanisms need to be adjusted based on the enterprise's characteristics and context (Brodeur et al., 2017), this study also analyzed how the two partners' different events and characteristics influenced the initial and final collaboration approach. It gave managers and consultants insight into how these characteristics and events can influence these mechanisms' evolution over time, allowing them to correctly adjust them to their context. Finally, this study underscores the importance of tailoring the approach and mechanisms of collaboration over time, allowing the collaborators to start with a less than optimized approach, testing it, and adjusting it until it suits both parties.

This study has a significant limitation worth mentioning. It was conducted with only one collaboration between two aerospace manufacturing SMEs, limiting the generalization of the CADT model (Yin, 2014). The current model shall remain as a preliminary foundation for a more complete collaborative approach which would take into consideration different variables that may influence its final form, such as the SMEs profile, the projects' nature, or the relationship of the partners. Accordingly, one suggestion to generalize the findings would be to test and analyze the collaborative approach with other industry 4.0 collaborations between manufacturing SMEs within the same industry. Another suggestion for future research is to investigate if and how collaboration between SMEs improves or accelerates their respective industry 4.0 transformation compared to an individual transformation approach. Such research could help determine which approach is the most efficient to support industry 4.0 transformation projects.

**CHAPITRE 6 ARTICLE 3 : OPERATIONALIZATION OF CRITICAL
SUCCESS FACTOR TO MANAGE THE INDUSTRY 4.0
TRANSFORMATION OF MANUFACTURING SMES**

Article soumis dans

Sustainability

Soumis le 2022-06-14

Publié le 2022-07-21

Rédigé par:

Jonathan BRODEUR

Département des mathématiques et génie industriel

École Polytechnique de Montréal

Jonathan.brodeur@polymtl.ca

Robert PELLERIN

Département des mathématiques et génie industriel

École Polytechnique de Montréal

Robert.pellerin@polymtl.ca

Isabelle DESCHAMPS

Département des mathématiques et génie industriel

École Polytechnique de Montréal

Isabelle.deschamps@polymtl.ca

Abstract

As an increasing number of manufacturing small and medium enterprises (SMEs) tackle their digital transformation toward Industry 4.0, the need for a methodology to manage this transformation, tailored to their particular context, becomes apparent. Since recent studies have identified critical success factors (CSFs) for the Industry 4.0 transformation of manufacturing SMEs, this paper aims to operationalize these CSFs and propose an Industry 4.0 transformation management methodology. This research is based on an extensive literature review on CSFs for Industry 4.0 transformation, followed by a Delphi–Régnier survey with a panel of Industry 4.0 experts. For each CSF, specific actions to perform at different stages of the Industry 4.0 transformation were defined and validated by experts. Based on a proposed Industry 4.0 transformation process, not all CSFs have to be managed at every phase and step of the transformation process. Each CSF must be supported by different actions positioned within each Industry 4.0 transformation process step. The results of this research are particularly relevant for manufacturing SME managers and consultants managing Industry 4.0 transformation. By performing these actions, they can ensure the achievement of multiple CSFs during their digital transformation projects and, thus, ensure their success. This research combines the academic and professional domains by proposing a way for theoretical findings to be translated into clear actions. The proposed model allows all the actors involved in manufacturing SMEs' digital transformation projects to understand the actions needed to achieve a successful transformation.

Keywords

Industry 4.0; Small and Medium-Sized Enterprises; Manufacturing Industry; Critical Success Factor; Project Management.

6.1 Introduction

As we move toward evolving needs for manufactured goods and constant change in the global supply chain, manufacturing SMEs become increasingly relevant since they represent 99% of manufacturing companies in Canada and hire 84.7% of the manufacturing industry workforce (Institut de la statistique du Québec, 2012; Statistique Canada, 2015). Their past, present, and future performances highly affect the country's manufacturing industry and socioeconomic sustainability. Since they need to find ways to adapt and improve their performance and capabilities, one way to do so is by digitally transforming themselves toward Industry 4.0 practices (Ghadge et al., 2020; Xu, L. D. et al., 2018). Industry 4.0 is defined as “the 4th Industrial Revolution,” which “represents a set of initiatives aimed at improving processes, products, and services by allowing decentralized decision-making based on real-time data acquisition through the introduction of digital technologies at every level of manufacturing companies and their supply chain” (Ghadge et al., 2020; Moeuf et al., 2018). It is characterized by multiple technologies: collaborative robots, cyberphysical systems, big data, cloud computing, artificial intelligence, Internet-of-things, augmented reality, simulations, and 3D printing (Moeuf et al., 2018; Xu, L. D. et al., 2018).

These technologies have been present in different industries for quite some time. However, the integration of multiple technology groups together, and the capacity to exploit data in real-time to improve manufacturing enterprises' performance and collaboration, is one of the many characteristics that set Industry 4.0 apart as an industrial revolution (Barratt, 2004; Ghadge et al., 2020; Manavalan & Jayakrishna, 2019; Moeuf et al., 2018). Since Industry 4.0 is intimately linked to the exploitation of real-time data, many have defined Industry 4.0 as the digital transformation of the manufacturing industry (Lu, 2017; Moeuf et al., 2018; Oztemel & Gursev, 2020; Piccarozzi et al., 2018; Xu, L. D. et al., 2018).

Digital transformation is defined as the changes occurring in organizations, societies, and industries through digital technologies and information systems (Agarwal et al., 2010; Jones et al., 2021; Majchrzak et al., 2016; Vial, 2019). As such, digital transformation has been positioned as a way for enterprises to radically improve their performance and generate new value by implementing multiple technologies affecting their infrastructures, competencies, processes, and business models (Borangui et al., 2019; Fitzgerald et al., 2014; Gamache et al., 2017; Majchrzak et al., 2016; Vial,

2019; Xu, X. & He, 2022). Because of these similitudes, Industry 4.0 and digital transformation have been used interchangeably through the literature when put into the context of the digital transformation of manufacturing companies.

Many studies have shown that multiple smaller projects are required to achieve the desired digital transformation. It is performed by introducing new technologies, exploiting existing technologies differently, introducing new processes, or changing the structure and business model of the company instead of a more traditional overhaul transformation that can take place through a few more significant projects (Ali & Aboelmaged, 2022; Arcidiacono et al., 2019; Brodeur et al., 2021; Wank et al., 2016; Zangiacomi et al., 2020). It is especially true for the digital transformation of manufacturing SMEs (Ghadge et al., 2020; Zhou et al., 2015). SMEs prefer this approach as it allows them to counter many challenges and risks when deploying major digital technology projects (Buonanno et al., 2005; Moeuf et al., 2019; Singla, 2010; Stentoft et al., 2019).

Multiple studies have analyzed the challenges of digital transformation faced by manufacturing SMEs and identified potential solutions (Moeuf et al., 2019; Müller, J. M., Kiel, et al., 2018; Schröder, 2016). Some of the hurdles faced by manufacturing SMEs are elements such as data security; internal bureaucracies and regulations; lack of corporate culture for Industry 4.0 concepts; lack of skilled labor; lack of clarity, both on the economic benefits and on the vision of Industry 4.0, as well as on norms and standards; and overall inadequate infrastructure to support the implementation of these technologies (Amaral & Peças, 2021b). Among the solutions to these hurdles, some authors propose Industry 4.0 maturity and readiness models (Leyh et al., 2017; Mittal, Khan, et al., 2018; Schumacher et al., 2016). Maturity models are tools used to assess the level of maturity of manufacturing SMEs within multiple dimensions relating to the level of technology they implement as well as their processes, system architecture, culture, strategy, and people (Amaral & Peças, 2021a; Ganzarain & Errasti, 2016; Mittal, Khan, et al., 2018). Once an SME's maturity level is measured, these tools can identify the next step of its digital transformation and elements, such as management processes and architecture, that the SME must implement to reach the next maturity level (Amaral & Peças, 2021a, 2021b).

Other studies have also proposed critical success factors for implementing Industry 4.0 technologies and principles (Mittal, Khan, et al., 2018; Moeuf et al., 2019; Pozzi et al., 2021;

Shinohara et al., 2017). These factors cover both technology and management elements that the manufacturers must possess to perform their digital transformations successfully. Overall, these studies provide generic guidelines to facilitate the digital transformation of manufacturing SMEs. However, they are highly conceptual and do not provide sufficient details to operationalize their recommendation in manufacturing SMEs.

Hence, this study aims to propose and validate a methodology to manage the digital transformation of manufacturing SMEs by operationalizing critical success factors. More specifically, the study aims to:

- Identify a list of actions associated with critical success factors to manage the digital transformation of manufacturing SMEs;
- Position these actions within the different phases of a manufacturing SME digital transformation process;
- Validate these actions with a panel of Industry 4.0 experts.

The remaining paper is divided into five sections: a literature review of the management of Industry 4.0 transformation within manufacturing SMEs and critical success factors, the research methodology, the findings, a discussion, and a conclusion.

6.2 Literature review

To answer this question, we first covered recent studies on the digital transformation of manufacturing SMEs to understand better its characteristics and how it is managed. Research papers on previously identified critical success factors for the digital transformation of manufacturing SMEs are then summarized.

6.2.1 Management of industry 4.0 transformation within manufacturing SMEs

Studies on Industry 4.0 within manufacturing SMEs have gained steam in the past few years, and are considered a distinguished cluster of studies (Piccarozzi et al., 2018). One of the reasons is that manufacturing SMEs possess different characteristics compared to large manufacturing companies, which affect their Industry 4.0 transformation processes, the challenges they face, and how they can overcome them. Since most manufacturing SMEs tend to have a flatter management

structure and an absence of overarching bureaucracy, their managers and leaders can interact more efficiently and daily to make decisions affecting the company (Gupta & Cawthon, 1996). This result in a higher level of flexibility than larger companies have to react to external and internal events (Brettel, M. et al., 2016; Laforet & Tann, 2006; Levy, M. & Powell, 1998; Zhang, Q. Y. et al., 2003).

Unlike large companies, manufacturing SMEs do not always possess resources that can be dedicated entirely to new technology implementation projects or rapidly hiring resources specialized in the different technologies encompassed by Industry 4.0. As such, they tend to lack readily available resources and talents to manage and execute their digital transformation projects (Buonanno et al., 2005; Khan & Turowski, 2016; Raymond & Uwizeyemungu, 2007; Zangiacomi et al., 2020). Contrary to large companies, who will define a long-term strategy and align short-term strategies to it, manufacturing SMEs tend to focus on short-term strategies and objectives and use their flexibility to review and realign their objectives and strategies based on new opportunities and challenges (Buonanno et al., 2005; Moeuf et al., 2018; Stonehouse & Pemberton, 2002).

Finally, they lack processes and the organizational management maturity associated with large organizations (Laforet & Tann, 2006; Smallbone et al., 1995). As such, multiple studies, mainly based on case studies, have focused on how the characteristics of manufacturing SMEs impact their digital transformation, the challenges they encounter, the gain and opportunities Industry 4.0 will bring them, and the lessons learned after their transformation (Mittal, Khan, et al., 2018; Moeuf et al., 2018; Piccarozzi et al., 2018).

Other studies have tried to understand how manufacturing SMEs can approach the management of their digital transformation to Industry 4.0. Because they are short-sighted in terms of strategy and possess more flexibility than large companies, manufacturing SMEs prefer to establish small and rapidly attainable objectives for their Industry 4.0 transformations and use their flexibility and adaptiveness to navigate through their digital transformations, adjusting their portfolio of projects as they progress (Wank et al., 2016; Zhong et al., 2017). Because of these characteristics, most manufacturing SMEs will achieve digital transformation through a set of small technology implementation projects to minimize the impact on their organizations in terms of the process

changes needed to support the new technology (Brodeur et al., 2022; Moeuf et al., 2019; Müller, J. M., Buliga, et al., 2018; Zangiacomi et al., 2020).

Larger companies tend to approach digital transformation by implementing a sizeable general architecture, implementing systems to acquire as much data as possible, and then implementing data valorization projects to exploit this data (Dillinger et al., 2022; Ghobakhloo, 2018; Liebrecht et al., 2021). This means that large organizations will implement multiple data acquisition technologies, which need to be supported by a more significant IT infrastructure (faster network, bigger server, more compute power), be it on-premises or cloud-based (Dillinger et al., 2022). To support these growing needs for IT infrastructure, large organizations must either build or collaborate with big data centers. The larger the organization, the exponentially bigger the quantity of data it will acquire, and the larger the data center needed. These past few years, concerns regarding the rise in new data center construction and their effects on the environment through energy consumption have grown (Labbe, 2021). This growing concern led researchers to study the sustainability and energy consumption of big data centers fuelled by the digital transformation of large organizations (Zhang, Q. & Yang, 2021). On the other hand, manufacturing SMEs will first implement technologies that their current IT infrastructure can support to minimize the complexity of their project and hasten their return on investment, resulting in a more sustainable approach to digital transformation (Müller, J. M., Kiel, et al., 2018; Stock & Seliger, 2016).

Finally, some studies have shown that, in order to manage and execute digital transformation through this set of iterative projects, some SMEs will define and implement basic project management and portfolio management tools and processes (Brodeur et al., 2021; Richard et al., 2021). These tools and processes tend to evolve over time as the manufacturing SMEs gain maturity and complete more and more projects (Brodeur et al., 2021). The manufacturing SME will also undergo multiple small organizational changes over time to support their digital transformations by adopting new processes, hiring new resources, or changing the organizational chart and hierarchy as needed (Brodeur et al., 2022).

6.2.2 Critical success factors for industry 4.0 transformation

Critical success factors (CSFs) have been thoroughly studied and translated into actions within multiple contexts, such as the implementation of ERP systems in manufacturing companies

(Françoise et al., 2009). More recently, multiple researchers have investigated the critical success factors for the Industry 4.0 transformation of manufacturing SMEs. These critical success factors were identified through structured literature reviews (Pozzi et al., 2021; Shinohara et al., 2017; Sony & Naik, 2019; Vrchota et al., 2021) as well as through Delphi methodologies with panels of experts (Françoise et al., 2009; Moeuf et al., 2019) and case studies (Cimini et al., 2020). Moeuf et al. (2019) identified a total of ten critical success factors through a Delphi study with experts in digital transformation in manufacturing SMEs, ranging from the importance of “conducting a study prior to embarking upon any Industry 4.0 project” to the importance of employee training. Sony et al. (2019) also identified ten critical success factors through a literature review to support implementing cyberphysical systems. Finally, Françoise et al. (2009) operationalized 13 critical success factors for managing ERP implementation projects. Overall, when looking at overlapping CSFs identified for both digital transformation projects and within the context of manufacturing SMEs, we can summarize them within the ten following CSFs.

Align Industry 4.0 strategy to business strategy

Industry 4.0 does not only focus on manufacturing operations or supply chain management; it encompasses every aspect of the organization (Brettel, Malte et al., 2014; Zangiacomi et al., 2020). As such, the transition to Industry 4.0 starts with defining short-, medium-, and long-term objectives. These objectives must support the short-, medium-, and long-term business strategy objectives. It is thus essential to ensure that Industry 4.0 projects and strategies are correctly aligned with the business strategy at every step of the Industry 4.0 transformation (Shinohara et al., 2017; Sony & Naik, 2019).

Leadership

The impact of management leadership on organizational performance and the success of transformative projects has been studied intensely (Elenkov & Manev, 2005). It is no surprise to see that, for a successful digital transformation, a manufacturing SME must involve company leaders in the process to ensure the support of the high management of the company and to appoint an Industry 4.0 champion to support the digital transformation of the company (Françoise et al., 2009; Moeuf et al., 2019; Pozzi et al., 2021).

Alignment along a hierarchical line

SMEs tend to have a short hierarchy where leaders are very close to their employees (Smallbone et al., 1995). This proximity facilitates the Industry 4.0 transformation of the organization by making the objectives and issues clearer and more transparent, making it possible to motivate the employees and limit change resistance. It also promotes communication between employees (Moeuf et al., 2019). As such, it is essential to align the objectives of manufacturing SMEs vertically and horizontally to ensure the success of the Industry 4.0 transformation.

Conduct a study prior to industry 4.0 projects

Conducting a study on company processes, performance, architecture, and tools allows manufacturing SMEs to properly assess the root cause of their issues and better identify the potential gains they could achieve from an Industry 4.0 transformation (Moeuf et al., 2019; Shinohara et al., 2017; Sony & Naik, 2019).

Communication management

Communication is critical in any project and takes different forms based on the company. As such, an effective communication strategy for the Industry 4.0 transformation of the company at every level is essential to ensure employees' acceptance of the transformation process while also facilitating coordination between the Industry 4.0 champion and the management team (Françoise et al., 2009; Moeuf et al., 2019).

Teamwork and team composition

For the Industry 4.0 transformation to succeed, the manufacturing SMEs need to implement a transformation team composed of the right employees and consultants with the right skill sets (Françoise et al., 2009; Moeuf et al., 2019). Teamwork has been identified as one of the main critical success factors in project management, including digital transformation projects (Müller, R. et al., 2012; Müller, R. & Turner, 2007).

Employee training and knowledge management

As manufacturing SMEs implement new technological solutions that will affect their employees' internal processes and day-to-day work, it is necessary for a company to properly train the employees on how to use and support the new solutions (Françoise et al., 2009; Moeuf et al., 2019; Shinohara et al., 2017; Sony & Naik, 2019). The manufacturing company must also document how

to use and support the implemented solutions properly and put in place knowledge-retention processes and tools to facilitate the knowledge management of these solutions (Moeuf et al., 2019; Shinohara et al., 2017).

Organizational culture and change management

The implementation of Industry 4.0 affects the organization's structures due to its integration at every level of the organization (de Sousa Jabbour et al., 2018; Sony, 2018). These changes can become radical changes that need to be addressed and managed. Change management at different stages of the transformation and through each project must be considered to ensure employee participation and reduce resistance (Françoise et al., 2009; Moeuf et al., 2019; Sony & Naik, 2019).

Project management

Industry 4.0 implementation should be executed in a series of well-planned and strategically scheduled projects for its success (Brodeur et al., 2021; Moeuf et al., 2019; Moeuf et al., 2018; Rojko, 2017). It is essential to properly manage these projects using the right set of project management tools, processes, and approaches (Moeuf et al., 2019; Sony & Naik, 2019).

Continuous improvement strategy

Moeuf et al. (2019) have shown that “having a continuous improvement strategy promotes agility among employees and their ability to adopt new tools and processes.” Considering that the Industry 4.0 transformation of manufacturing SMEs is performed through a succession of multiple projects (Brodeur et al., 2021; Moeuf et al., 2019; Rojko, 2017), aligning the Industry 4.0 transformation processes with the continuous improvement strategy has been shown to facilitate the adoption of new technologies used by employees and ensure the alignment of the Industry 4.0 project with the business strategy (Moeuf et al., 2019; Müller, J. M. et al., 2020; Shinohara et al., 2017; Zangiacomi et al., 2020).

6.2.3 Research limitations

The list of critical success factors presented above provides essential elements to guide manufacturing SME managers and consultants to identify areas where intervention is needed during an Industry 4.0 transformation. However, these factors are generic and are rarely followed by actions practitioners can perform to implement and support them.

In order to manage its Industry 4.0 transformation, the manufacturing SME must operationalize these CSFs. It needs to perform actions at different steps and phases of its Industry 4.0 transformation process to implement and support them. The identification of actions to manage and support CSFs has been researched before in multiple contexts relating to digital technologies: ERP implementation projects (Françoise et al., 2009), IT governance performance (Nfuka & Rusu, 2011), and the implementation of supply chain information systems (Denolf et al., 2015). However, these studies do not address the context of Industry 4.0 transformation within manufacturing SMEs. As we discussed earlier, the context of Industry 4.0 transformation in manufacturing SMEs involves a succession of small, short-term iterative projects. As such, manufacturing SMEs must manage an ever-changing portfolio of projects aligned with their Industry 4.0 vision and strategic objectives. Past studies aimed at operationalizing digital projects in the manufacturing industry focus mainly on single, large, transformative projects, such as implementing an ERP or a supply chain information system. They identified actions to support CSFs within these single major projects. The actions also stop at the end of each project, without any actions that could encompass an iterative process. Even when these studies produced lists of actions to support each CSF, they did not indicate at which steps and phases of their respective implementation methodologies these actions took place. As such, it would be challenging for both researchers and practitioners to transpose these actions as is to manage the Industry 4.0 transformation of manufacturing SMEs. To fill this gap, this study aims to propose and validate a methodology to manage the Industry 4.0 transformation of manufacturing SMEs through the operationalization of CSFs.

6.3 General Framework

To identify and position the actions, we created a general framework, shown in Figure 6.1, highlighting the relation between the actions, critical success factors, and phases and steps for managing the Industry 4.0 transformation of manufacturing SMEs. This framework proposes that knowledge about the CSFs of Industry 4.0 transformation generates actions at different steps and phases of the Industry 4.0 transformation process that will make it possible to establish, support, and manage these CSFs. It also proposes that different actions are required for each CSF depending on the step and phase of the transformation process.

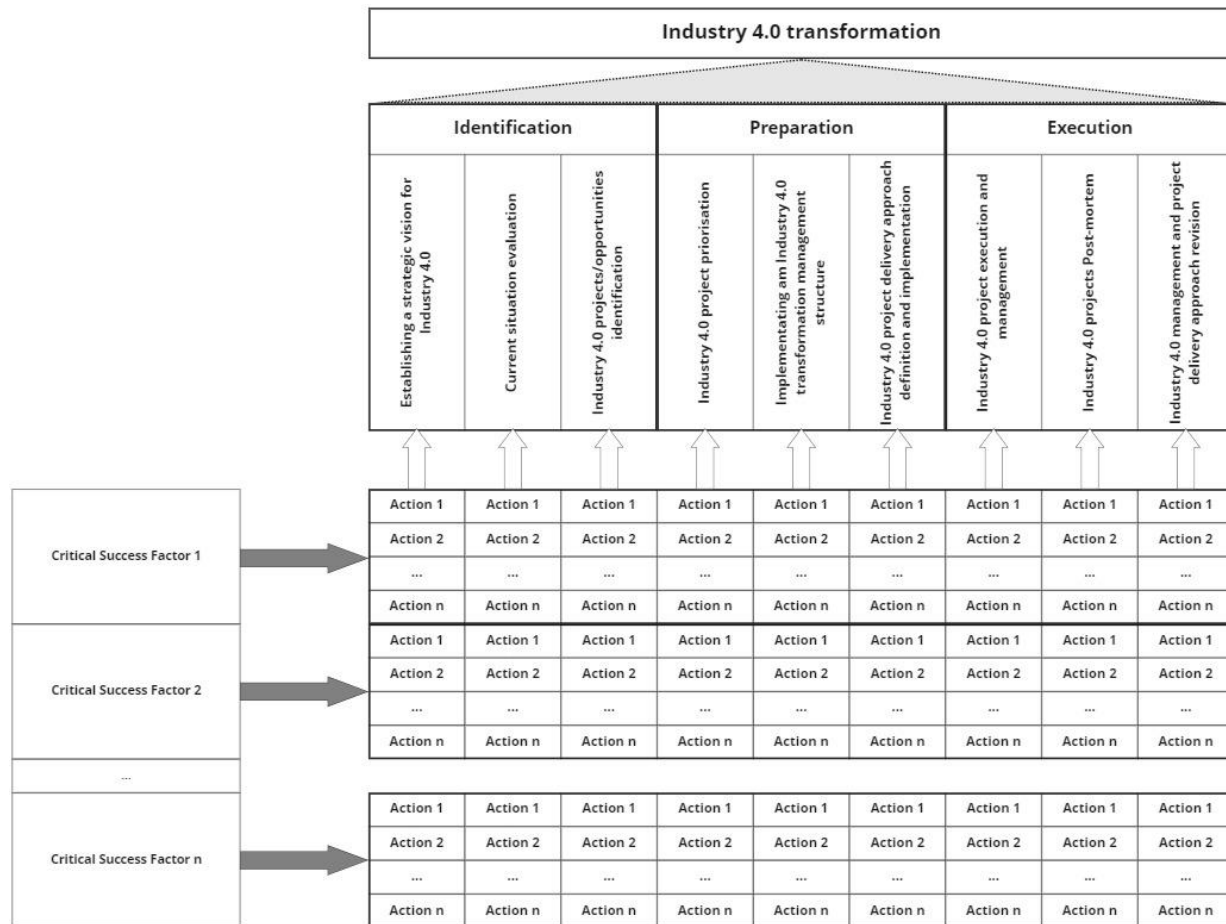


Figure 6.1 - Proposed framework

We divided the Industry 4.0 transformation management process into three phases and nine steps based on past case studies and Delphi research detailing the phases, steps, and overall best practices used by manufacturing SMEs to manage their Industry 4.0 transformations (Arcidiacono et al., 2019; Brodeur et al., 2022; Brodeur et al., 2021; Cimini et al., 2020; Moeuf et al., 2019; Zangiacomi et al., 2020). These phases allow manufacturing SMEs to identify potential Industry 4.0 projects able to solve business issues and support their strategic visions. They also allow the SMEs to prepare themselves to launch their Industry 4.0 transformations by implementing the tools, processes, and resources needed to execute and manage their transformations. Finally, they allow SMEs to execute their transformations in an iterative matter. The three phases are the following: **Identification**, **Preparation**, and **Execution**.

In the **Identification phase**, the manufacturing SME identifies potential Industry 4.0 projects before starting its Industry 4.0 transformation. Moeuf et al. (2019) identified that, for an Industry 4.0 transformation to be successful, the manufacturing SME needed to conduct a study to identify Industry 4.0 projects that could support its Industry 4.0 vision and strategy. The manufacturing SME has to create an Industry 4.0 vision aligned with its business strategy (Moeuf et al., 2019; Pozzi et al., 2021; Sony & Naik, 2019), assess the current performance of its processes and technologies (Moeuf et al., 2019; Pozzi et al., 2021; Shinohara et al., 2017), and determine its capacity to deliver its Industry 4.0 vision and projects (Müller, R. et al., 2012; Pozzi et al., 2021; Sony & Naik, 2019).

Within this phase, the three following steps are proposed:

- **Establishing a strategic vision for Industry 4.0:** The manufacturing SME must first properly define its Industry 4.0 vision and position it as part of its business strategy. The SME will define strategic objectives that its Industry 4.0 strategy will support and position them in time (Moeuf et al., 2019; Pozzi et al., 2021; Sony & Naik, 2019).
- **Current situation evaluation:** The manufacturing SME needs to evaluate its current situation regarding digitalization. It must evaluate its processes, performance, current technology architecture, resources, and capabilities (Moeuf et al., 2019; Pozzi et al., 2021; Shinohara et al., 2017).
- **Industry 4.0 project/opportunity identification:** Based on its vision and current situation, the manufacturing SME can identify potential Industry 4.0 projects that will enhance its position to achieve its strategic goals (Demircan Keskin, 2019; Kaiser et al., 2015; Richard et al., 2021).

Once the manufacturing SME Industry 4.0 vision and list of projects are determined, the manufacturing SME has to provide itself with the means to manage and execute this transformation. To do so, it needs to:

- Prioritize its Industry 4.0 projects to create an Industry 4.0 roadmap based on its objectives and capacity (Isikli et al., 2018; Richard et al., 2021; Vrchota et al., 2021; Yu et al., 2014);

- Define the tools, governance, and processes to manage its transformation (Brodeur et al., 2021; Mohelska & Sokolova, 2018; Richard et al., 2021);
- Define the processes and tools it will use to manage and deliver each project (Brodeur et al., 2021; Richard et al., 2021);
- Allocate resources to the transformation projects (Moeuf et al., 2019; Shinohara et al., 2017; Sony & Naik, 2019).

We then encompass these elements into the **Preparation phase** and divide them into three steps:

- **Industry 4.0 project prioritization:** The manufacturing SME prioritizes its Industry 4.0 projects into a project portfolio based on its strategic vision and current situation to create an Industry 4.0 transformation roadmap (Isikli et al., 2018; Richard et al., 2021; Vrchota et al., 2021; Yu et al., 2014).
- **Implementing an Industry 4.0 transformation management structure:** The manufacturing SME defines and implements the governance, processes, and tools that will allow it to manage and support its Industry 4.0 transformation process (Brodeur et al., 2021; Mohelska & Sokolova, 2018; Richard et al., 2021).
- **Implementing an Industry 4.0 project delivery approach:** The manufacturing SME defines and implements the processes, tools, and teams to execute and manage the Industry 4.0 projects (Brodeur et al., 2021; Richard et al., 2021).

Once the projects are identified and aligned, and the manufacturing SMEs provide themselves with the means to deliver them, they can start the **Execution phase**. The execution phase starts as an iterative process in which the manufacturing SME delivers the project, assesses what it could have done better, revises its processes and tools, and starts again with another project (Brodeur et al., 2022; Brodeur et al., 2021; Moeuf et al., 2019). As discussed in the literature review, manufacturing SMEs will approach digital transformation through iterative projects. It is then essential to divide this phase into steps that can represent this iterative approach. Through this phase, the manufacturing SME can constantly improve itself in managing and delivering its Industry 4.0 transformation (Brodeur et al., 2022; Rojko, 2017), revise its Industry 4.0 project portfolio (Brodeur et al., 2021; Shinohara et al., 2017), and ensure that the company steadily adopts the

changes brought by the technologies and processes (Brodeur et al., 2022; Hornstein, 2015; Mohelska & Sokolova, 2018). This iterative process is again divided into three steps:

- **Industry 4.0 project execution and management:** The manufacturing SME executes and manages its Industry 4.0 projects following the structure and approach it defined and put in place (Brodeur et al., 2021; Richard et al., 2021).
- **Industry 4.0 project post-mortem:** The manufacturing SME reviews its Industry 4.0 projects by analyzing if their objectives were met, if issues happened during the project, how it solved them, what it could have done to prevent them, and what it should do better or differently on the following projects (Brodeur et al., 2021; Nelson, 2007).
- **Industry 4.0 management and project delivery approach revision:** The manufacturing SME revises and implements changes to its management structure for Industry 4.0 transformation and its project delivery approach based on the project post-mortem analysis and the impact of the Industry 4.0 projects (Brodeur et al., 2022; Brodeur et al., 2021; Hornstein, 2015; Mohelska & Sokolova, 2018; Shinohara et al., 2017).

Within each phase, we will identify a list of actions to manage the Industry 4.0 transformation of manufacturing SMEs influenced by well-established critical success factors (Moeuf et al., 2019; Shinohara et al., 2017; Sony & Naik, 2019).

This framework will also serve as the foundation of a methodology relevant to practitioners, who can easily integrate these actions within their own project management processes. This framework makes it possible to identify the critical success factors that need to be supported and managed through actions at each step. It is worth mentioning that this framework will also allow us to identify if all CSFs need to be managed and supported at each step of the transformation process based on the presence or lack of actions identified.

6.4 Research methodology

To identify and position the actions, we conducted an extensive literature review on CSFs, focusing on the Industry 4.0 transformation process. We then validated the actions and their positions within the process through a Delphi–Régner survey with a panel of Industry 4.0 experts. As such, specific actions to perform at different stages of the Industry 4.0 transformation for each CSF were defined

and validated by experts. This methodology is explained in further detail in the following subsections.

6.4.1 The Delphi Methodology

The Delphi methodology aims to obtain and organize the opinions of a panel of experts on a particular subject. It can be used to explore complex subjects or to develop models. This methodology is recognized for its ability to bring forward empirical evidence led by the consensus or dissensus of a group's opinion on a subject. It is defined as “an iterative process used to collect and distill expert judgments using a series of questionnaires” (Linstone & Turoff, 1975; Rowe & Wright, 1999; Skulmoski et al., 2007). This method is typically divided into expert recruitment and multi-time data collection processes, called “iterations.” Each iteration refines the opinions and data collected in the previous iteration and returns the responses to the experts (Rowe & Wright, 1999). Comparing the opinions of multiple experts on our subject will ensure we achieve our research objectives. The iterative process stops when the research team considers its question answered and its objectives met (Skulmoski et al., 2007).

To minimize the risk of bias and ensure the experts' participation, they must remain anonymous to each other, having access only to the other participants' answers at the end of each iteration. Direct communication between the experts is forbidden. It ensures an honest opinion on the element of the questionnaire and that the opinions of other experts do not influence their own opinions at the time of answer.

Skulmoski et al. (2007) noted that the Delphi methodology is flexible. Many adaptations on how to operationalize it have been made in past research, with the two most variable elements being the number of iterations and the methods used to collect data. Given our research topic and the need to facilitate our data collection and analysis process, the Delphi method was combined with Régnier's abacus to create our exploratory data collection method. This method has been used multiple times to collect and summarize expert opinions on Industry 4.0 technologies, risks, opportunities, and impacts on manufacturing SMEs (Moeuf et al., 2019; Rosin et al., 2022).

6.4.2 The Abacus of Régnier

The abacus of Régnier is a technique that uses a panel of colours to collect experts' opinions about precise statements. Its main advantage is the speed at which it can summarize opinions thanks to its colourful visualization of results that facilitate the identification of consensus and dissensus in the experts' opinions on each statement (Maleki, 2009). The experts must choose between seven colours to express their opinion:

- Green: Completely agree with the statement;
- Light green: Somewhat agree with the statement;
- Yellow: Mixed opinion on the statement;
- Light red: Somewhat disagree with the statement;
- Red: Completely disagree with the statement;
- White: Cannot answer; and
- Black: Do not want to answer.

The experts' opinions appear in a colourful visualization synthetizing the experts' consensus and dissensus on each statement, facilitating its analysis. This study used the platform Color Insight (<http://colorinsight.fr/> accessed May 31th 2022) to create the questionnaires, distribute them to experts, collect the answers, and generate colour visualization ready for analysis.

The combination of these two methods and techniques will be referred to by the term “Delphi–Régnier” in this article.

6.4.3 Selection of Experts

The Delphi methodology's main characteristic is that it consults a group of experts, often described as a “panel of experts,” where the “expert” is defined as an “actor with recognized skills in a field and responsible for contributing to the elaboration of a judgment” (Linstone & Turoff, 1975; Maleki, 2009). As such, the constitution of the expert panel must be based on the three following criteria:

1. The experts' experience;

2. Their familiarity with the research subject;
3. Their expertise in the research subject.

To include the perspective of multiple actors with experience in the subject, we created three different categories of experts. For each category, the expert must meet the following criteria:

1. Must have analyzed, managed, or executed digital transformation projects over the past three years;
2. Must have worked for, or in collaboration, with manufacturing SMEs on digital transformation projects;
3. Must have been involved in the starting phase of digital transformation within one or multiple manufacturing SMEs.

The first criterion ensures that the expert has firsthand experience with digital transformation projects. The second criterion ensures that their experience and expertise have been developed within the context of manufacturing SMEs, the main subject of our study. Finally, the third criterion ensures that their experience and expertise are related to the digital transformation management aspect instead of the technical aspects. With these criteria, we ensured that our experts could provide an informed opinion on actions to manage the digital transformation of manufacturing SMEs.

The experts were divided into three categories, including practitioners and academic perspectives. They are the following:

- **Industrial Manager:** Member of the high management or a project/program manager of a manufacturing SME;
- **Academic:** Researcher or university professor who has conducted research on the digital transformation of manufacturing SMEs;
- **Independent Consultant:** Consultant and expert in digital transformation who has supported manufacturing SMEs in managing their digital transformations.

The size of the experts' panel can vary depending on the research. Mitchell (1991) and Ashton (1986) suggest that around 10 and 11 experts participate in a Delphi Study. Recent studies using

the Delphi-Régnier methodology were based on a panel composed of around twenty experts (Moeuf et al., 2019; Riemens et al., 2021; Rosin et al., 2022). For our study, our panel was composed of 19 experts distributed as follows: six industrials, six academics, and seven independent consultants.

6.4.4 Survey Creation

The initial questionnaire was created to validate actions to support CSFs at each phase and step of the manufacturing SME Industry 4.0 transformation process. We identified multiple actions for each step and critical success factor and asked the panel of experts to comment on the actions and their positions.

The list of actions used in the initial questionnaire was identified following a literature review of Industry 4.0 management in manufacturing SME case studies (Brodeur et al., 2021; Cimini et al., 2020; Zangiacomi et al., 2020) and from past research on similar critical success factors for the project management of IT and ERP projects (Françoise et al., 2009; Prifling, 2010). Following the model in Figure 1, we positioned each action under different steps and used the Delphi method to validate or invalidate the position of these actions within the model.

The initial questionnaire was validated by a small panel of integrator experts from the Center of Industrial Expertise of Montreal, who work on supporting digital transformation projects in manufacturing SMEs. This small panel of experts had minimal experience in Delphi surveys but several years of experience working with industrial managers and consultants in digital transformation. They identified potential misinterpretations of the questions and suggested ways to make it easier for industrial and integrator experts to interpret them.

6.4.5 Iteration Structure

The experts first answered a questionnaire of 67 statements using the Color Insight platform. The statements are shown in Appendix A. They gave their opinion by selecting different colours from Régnier's abacus. The experts were also asked to comment on their answers to justify them or add more nuance to the statements. They were also invited to submit additional statements and opinions at the end of each section of the questionnaire.

Once the first round of statements was completed, the research team reviewed and analyzed the votes and comments. Based on the results and comments, a second questionnaire of 19 statements, provided in Appendix B, was created and submitted to the participants, who answered the first questionnaire with both the results from their first questionnaire and a summary of their comments, consensus, dissensus, and suggestions.

Complementary information necessary to interpret the experts' opinions on the first questionnaire was gathered during this second iteration. Following the analysis of this information, the research team ended the study. All 19 experts participated in both rounds of the study.

As shown in Appendices C and D, the Color Insight platform generated an item matrix from the expert votes on each statement. This matrix of items classified the statements from the “most agreed to” to the “least agreed to,” helping us visualize and analyze the answers. The dissensus items appear in the middle of the matrix. The matrix was automatically generated with the “classic mode” of the platform Color Insight, and the colours were weighted from 5 for green (completely agreed with) to 1 for red (completely disagree with). Based on past evaluation thresholds in similar research (Moeuf et al., 2019; Richard et al., 2021; Rosin et al., 2022), it was decided that the experts reached a consensus when 60% of their responses agreed (green) or disagreed (red) with the statement.

6.5 Findings and discussion

During the first iteration of the study, the research team prepared the questions to validate actions to support the critical success factors of the Industry 4.0 transformation of manufacturing SMEs. For the second round, the research team prepared a second set of questions to clarify the experts' answers on two elements: The Industry 4.0 champion and the SMEs' capacity to manage and execute their Industry 4.0 transformation. After analysis of all the data, we summarized the experts' opinions into three categories:

- Steps and actions to manage the Industry 4.0 transformation;
- Dependence on the context of individual manufacturing SMEs;
- Managing the transformation through an iterative process.

The following subsection summarizes the experts' opinions and comments supporting these categories. To reference the statement presented to the experts, we used the following formula: QX-IY, where X references the questionnaire and Y references the item. For example, the reference Q1-I1.4 references Item 1.4 in the first questionnaire, which would be "Designate a Digital Transformation Champion." The questionnaires can be referred to in Appendices A and B.

6.5.1 Steps and actions to manage industry 4.0 transformation

This section synthesized the experts' answers and comments at each step presented in Figure 6.1.

6.5.1.1 Establishing a Strategic Vision for Industry 4.0 (Q1-1.1 to Q1-1.9, Q2-1.1 to Q2-1.13)

The experts' answers allowed us to verify the actions needed to align the Industry 4.0 strategy with the manufacturing SME business strategy. Even if the experts disagreed on reviewing the entire business strategy to consider digital technology, they indicated that it was necessary for the SME to align its Industry 4.0 objectives with the business strategy and to identify the business objectives that the Industry 4.0 strategy will support. An IT architecture vision must also be defined to support the company's digital transformation.

To ensure that the strategy and vision are communicated and agreed upon at the different levels of the hierarchical line, the strategy should be communicated to the manager of every department and business unit. The experts also indicated that the company should obtain a commitment from the managers and directors of these departments to support the Industry 4.0 transformation. Experts suggested that "a steering committee should be created "at this step.

They also indicated that naming an Industry 4.0 champion was necessary for our experts as it ensures that a leader will oversee the Industry 4.0 transformation. However, the experts disagreed on the champion being part of the high management team of the company or the company's CEO. Instead, they indicated that the Industry 4.0 champion should be an official position given to a manager under the SME high management or CEO. The champion should possess prior experience in IT or digital transformation projects and be responsible for educating the SME's management and employees on the principles and technologies of Industry 4.0. Finally, the champion should be

given the authority to identify and prioritize the Industry 4.0 projects and implement governance to manage the Industry 4.0 transformation process.

6.5.1.2 Current Situation Evaluation (Q1-2.1 to Q1-2.5, Q2-I2.1 to Q2-I2.5)

The experts indicated that the manufacturing SME should evaluate the performance of critical processes and technologies and evaluate its current IT infrastructure and business architecture. They also suggested that the SME evaluate its capacity to execute and manage its Industry 4.0 transformation. To do so, it should assess its financial abilities, its employees' expertise and experience in Industry 4.0 technologies and projects, its internal project management and continuous improvement processes, its employees' and managers' resistance to change, and any external help available.

Finally, the experts agreed that the SME should involve the company's management and key employees in the evaluation process and communicate the evaluation results to the company's management.

6.5.1.3 Industry 4.0 Projects/Opportunities Identification (Q1-I3.1 to Q1-I3.6)

Once the Industry 4.0 strategic visions and objectives are established and the current situation of the manufacturing SME is assessed, it is now possible to identify Industry 4.0 projects that could fill the gap between the current situation and the vision, leading to the creation of an Industry 4.0 projects portfolio. The experts indicated that the Industry 4.0 project objectives needed to be aligned with the SME's Industry 4.0 strategy and business strategy objectives. Industry 4.0 projects should be able to solve business and operations issues, ensuring that some projects fit into the continuous improvement strategy of the SME. While identifying the different Industry 4.0 projects, the experts indicated that IT infrastructure and architecture projects supporting the Industry 4.0 projects should also be identified.

In this step, the SME should define each project's scope and objectives and assess its technology prerequisites, schedule, budget, and potential risks. The SME should identify the resources and expertise needed for each project at this stage. Finally, many experts suggested that a steering committee should be involved in identifying and validating the Industry 4.0 project portfolio.

6.5.1.4 Industry 4.0 Projects Prioritization (Q1-I4.1 to Q1-I4.6, Q2-I1.9, Q2-I2.6)

When prioritizing the project portfolio, the experts indicated that many elements should be considered: the priority of the strategic objectives, the access to financial resources, the technology prerequisite between projects, and the overall capacity of the SME to execute and manage their projects. Some suggested that the SME should first identify *quick-win* projects to gain their employees' and management's confidence in the transformation, that a steering committee should be involved in the prioritization process, and that the champion should manage this process. Some experts also suggested tools and techniques that support the prioritization process, such as the impact vs. effort matrix and Industry 4.0 roadmaps.

Finally, the experts indicated that the prioritization should be validated with the company's high management team and communicated to managers and employees.

6.5.1.5 Implementing an Industry 4.0 Transformation Management Structure (Q1-I5.1 to Q1-I5.4, Q2-I1.10)

The Industry 4.0 management structure is defined by a set of processes used to manage and monitor the Industry 4.0 transformation. The experts considered that the champion should have the authority to implement the required management and governance structure. The experts also found it necessary to implement a communication management plan and a formal change management process.

When asked about what should be added to these elements, the experts indicated that a steering committee should be part of the governance structure to ensure the commitment of the other department of the company. They also suggested that SMEs should manage the changes generated by the Industry 4.0 projects and perform organizational changes if needed. Finally, the experts suggested that the SME implement tools and processes to manage the support function (helpdesk), continuously improve the new solutions, and identify and gather new Industry 4.0 project proposals.

6.5.1.6 Implementing an Industry 4.0 Project Delivery Approach (Q1-I6.1 to Q1-I6.12)

In parallel with establishing the Industry 4.0 management structure, the manufacturing SME must decide how it will deliver its projects. The expert panel indicated that an Industry 4.0 project manager role should be created. Furthermore, internal resources with the right expertise should be identified and allocated to the projects. If not available within the company, they should be hired as new employees or external integrators and consultants. They also indicated that the roles and responsibilities of each team member and the project stakeholder should be identified and documented to enhance teamwork. The SME should also implement tools and processes to facilitate communication coordination and collaboration between the team members.

To ensure that the project management process is effective, the experts indicated that the SME should introduce tools and processes to plan, monitor, and manage the project's schedule, budget, and risk plan. The inclusion of a communication plan for each project was also highly recommended.

As for the delivery approach itself, the experts did not agree on which approach to use. Some suggested using an iterative and agile approach, involving a quick succession of proof-of-concept, prototype, validation, and deployment phases for smaller projects. Others preferred a cascade approach for larger projects. Overall, they commented that the approach for delivering projects depends on the specific characteristics of the projects considered.

6.5.1.7 Industry 4.0 Projects Execution and Management (Q1-I7.1 to Q1-I7.9)

To ensure that the Industry 4.0 projects are appropriately managed and executed, the experts indicated that regular follow-up on the progress of the projects should be performed with the project managers and the Industry 4.0 champion as per the established governance process. The experts also highlighted that the budget and schedule should be revised and adapted based on the project's progress. The project manager should ensure coordination, communication, and collaboration between the team members and the project stakeholders during the projects.

Knowledge management was also a considerable concern for the experts. They suggested that changes to the IT infrastructure and architecture and the new processes and technologies

implemented within the Industry 4.0 projects should be adequately documented. A support process for the technology users should be implemented and documented. Of course, they also suggested creating a training program and documentation for the employees on the new processes and technologies implemented.

The experts disagreed on the need to validate the project stakeholders' choice of the selected Industry 4.0 technologies during project execution. As some experts mentioned, if the project scope was defined as the "implementation of System X," the technology validation or feasibility analysis should be performed before the project starts. However, if the project scope is defined as a function, for example, "measuring the efficiency of our CNC machines," then the technology used to perform the function must be identified and validated with the stakeholders in the first phases of the project before being deployed.

6.5.1.8 Industry 4.0 Projects Post-Mortem (Q1-I8.1 to Q1-I8.3)

The experts insisted that a post-mortem at the end of each Industry 4.0 project must be performed. They indicated that the project's stakeholders, the project team, and the employees and managers of the department in which the Industry 4.0 project took place should all be involved. They also indicated that the post-mortem activity was also the right moment to evaluate how the Industry 4.0 management structure and delivery approach positively or negatively affected the project.

In order to properly perform the post-mortem, the experts suggested evaluating the following for each project:

- The critical success factor of each Industry 4.0 project;
- The gap between the estimated and actual budget and schedule;
- The presence or absence of internal expertise needed for the project;
- The relationship with external partners and suppliers on the project;
- The performance of the project team members as per their roles and responsibilities.

6.5.1.9 Industry 4.0 Management and Project Delivery Approach Revision (Q1-I9.1 to Q1-I10.5)

Based on the results of the post-mortem, potential revision to the Industry 4.0 management structure and project delivery approach could be needed. As such, the experts indicated that the manufacturing SME should revise its communication plan, governance, project management tools, and processes and suggested revising the role and responsibilities of the project team members, all of them on a necessity basis instead of on a systematic basis.

The experts also suggested it was the right moment to evaluate new Industry 4.0 project proposals and revise the project portfolio based on the completed project results. The experts also insisted that a proper technological survey should be included when reviewing the project portfolio and roadmap.

With each change to the tools, processes, and governance structure, proper project team training might also be necessary. The experts indicated that with these revisions, some organizational changes, such as revisions to the organizational chart and adding new tools and processes, might be needed and should be identified and managed to ensure that the Industry 4.0 transformation is adequately supported. Finally, the experts indicated that changes and revisions should be validated by the stakeholder, communicated to the employees and managers, and documented.

6.5.2 Dependence on the Context of Individual Manufacturing SMEs

The experts also commented on the overall management processes and actions needed to manage the Industry 4.0 transformation of manufacturing SMEs. One recurring theme was how each manufacturing SME's context differed from another and could affect the presence and position of actions needed to support the CSF. Even if they highly suggested that the Industry 4.0 champion should not be the company's CEO, multiple experts claimed that, for smaller SMEs with a flat hierarchy, the CEO could indeed act as the champion. In other contexts, the champion could also be the project manager or supervise them.

Another element dependent on the context of the SME is the definition of the scope of the Industry 4.0 projects and the delivery approach to be used. We already discussed this element in Section 6.5.1.6. In addition, based on the experts' comments, the scope could be defined in any way that

suits the manufacturing SME's objectives. The delivery approach could be created based on existing project management processes. It also applies to the project prioritization process. Even if the experts indicated multiple elements to analyze to help prioritization, one SME could decide to prioritize based on only a subset of these mentioned elements. Another SME could decide to prioritize based on other elements.

In summary, even if the experts indicated multiple actions that a manufacturing SME should perform, how it interprets these actions and which actions it will perform will depend on its context.

6.5.3 Managing the Transformation through an Iterative Process

Multiple experts mentioned that the Industry 4.0 transformation should be an iterative process. How to manage it and the actions needed to achieve its critical success factors would change over time. This led multiple experts to suggest that the SME should execute them more simply and then use the revision process to expand it. For example, the steering committee created at the beginning of the transformation could include only the champion, the CEO, and the director of operations. However, the steering committee could be revised to include other departments and stakeholders over time. The same recommendation could be applied to the project management tools and processes: The SME could start with essential tools like a high-level schedule and budget and revise them to include more advanced project management tools, processes, and techniques, such as earned value calculation, in subsequent projects.

Some experts also mentioned that manufacturing SMEs should give themselves the tools, processes, and means to explore solutions through a succession of small and fast proof-of-concept projects. It would allow them to better understand Industry 4.0 technologies, gain maturity, and identify how they could support their business strategies. Unfortunately, the experts did not provide any specific practical actions on that matter. They commented that the elements put in place by the identified actions of this research should reflect an iterative process.

6.6 Main Results and Limitations

This research's main objective was to develop a methodology to manage manufacturing SME Industry 4.0 transformation plans through the operationalization of CSFs. Based on comments from and the results of a Delphi–Régner study with a panel of experts in the digital transformation of

manufacturing SMEs, we identified specific actions to be performed at different phases and steps of the Industry 4.0 management process, as seen in Tables 1–3. Each action has been positioned within its respective steps and phase.

As we can see, different actions are necessary to support the CSFs at the different steps and phases of the Industry 4.0 transformation management process, and not all the CSFs are present within each step. As seen in Table 6.1, the actions in the identification phases are mainly used to ensure the alignment of the Industry 4.0 strategy with the business strategy and to establish the leadership needed to manage the transformation. They are also used to align the hierarchical line of the company, ensuring the Industry 4.0 projects are appropriately defined as ways to improve the processes and operations of the company and ensuring that the strategy and the list of projects are appropriately communicated at the different levels of the company.

The actions for the preparation phase in Table 6.2 are used to prioritize the list of projects based on the manufacturing SME's strategic objectives and capacity and to ensure a management structure involving the right stakeholders, the tools and processes to manage the project portfolio and organizational changes are implemented. Actions to support the management and execution of each project are also present, as well as actions to ensure that the manufacturing SME puts together a project team able to deliver the projects. Finally, actions to ensure the SME's hierarchical line alignment are implemented, as well as to ensure that the project roadmap, management tools, processes, and governance are communicated.

Table 6.1 - Actions to support CSF in the Identification phase.

Identification Phase	Critical Success Factors	Actions
Establishing a strategic vision for Industry 4.0	Align Industry 4.0 strategy to business strategy	- Review the strategic financial and operational objectives of the company. - Identify the strategic financial and operational objectives that the Industry 4.0 strategy will support. - Define funding and granting strategy to support the Industry 4.0 transformation. - Define, as part of the Industry 4.0 vision, an IT architecture and infrastructure.
	Leadership	- Appoint an Industry 4.0 champion who will answer to the high management of the manufacturing SME. - Ensure that the Industry 4.0 champion is familiar with the concept, technologies, and principles of Industry 4.0. - Ensure that the Industry 4.0 champion possesses experience in digital transformation and manufacturing. - Determine the level of authority of the Industry 4.0 champion.
	Alignment along hierarchical line	- Create a steering committee tasked with overlooking the Industry 4.0 transformation. - Validate the digital transformation strategy with the management of all the departments and business units of the manufacturing SME. - Obtain a commitment to support the Industry 4.0 transformation strategy from the directors and managers of the SME.
	Communication management	Communicate the Industry 4.0 strategic vision to all of the employees and managers of the manufacturing SMEs.
	Conduct a study prior to Industry 4.0 projects	- Execute a diagnosis of the critical business process and technologies targeted by the Industry 4.0 strategic vision. - Assess the current IT infrastructure and architecture. - Assess the company's financial means. - Assess the current project management and continuous improvement process. - Assess the employees' and managers' level of resistance to change toward Industry 4.0. - Assess the employees' expertise and experience on Industry 4.0 projects and technologies.
Current situation evaluation	Alignment along hierarchical line	- Involve the management of the different departments and business units in the evaluation process. - Involve key employees in the evaluation process.
	Communication management	Communicate the results of the evaluation with the management of the company.
	Align Industry 4.0 strategy to business strategy	- Identify the Industry 4.0 projects based on the current situation analysis and the Industry 4.0 strategic vision. - Align the Industry 4.0 projects' objectives with the business strategy and Industry 4.0 strategy.
	Alignment along hierarchical line	Ensure that the steering committee is involved in the identification process.
Industry 4.0 project/opportunity identification	Project management	- For each project, define the scope and assess the prerequisites, schedule, budget, and potential risks. - For each Industry 4.0 project, assess the expertise and resources needed to execute them.
	Continuous improvement strategy	- Identify Industry 4.0 projects able to solve business and operational issues. - Identify IT infrastructure and networking projects needed to support Industry 4.0 projects and the Industry 4.0 strategy.

Table 6.2 - Actions to support CSF in the Preparation phase.

Preparation Phase	Critical Success Factors	Actions
Industry 4.0 project prioritization	Align Industry 4.0 strategy to business strategy	• Compare the Industry 4.0 projects' objectives with the priority of the strategic objectives. • Compare the Industry 4.0 projects' funding with the funding and granting strategy. • Evaluate the Industry 4.0 projects' technology pre-requisites. • Create an impact vs. effort matrix to classify the projects based on impact and the SME's capabilities to deliver them. • Position the Industry 4.0 projects within an Industry 4.0 roadmap.
	Alignment along hierarchical line	• Ensure that the steering committee is involved in the prioritization process. • Validate the Industry 4.0 projects' roadmaps with the SME high management team.
	Communication management	• Communicate the Industry 4.0 projects' roadmaps at every level of the company.
Implementing an Industry 4.0 transformation management structure	Alignment along hierarchical line	• Create and implement an Industry 4.0 transformation governance. • Ensure that the steering committee is involved with the Industry 4.0 transformation governance.
	Communication management	• Create and implement a communication plan to update the SME's management and employees.
	Continuous improvement strategy	• Implement tools and processes to manage support and improvement functions once 4.0 projects are completed. • Implement tools and processes to identify and gather new Industry 4.0 project propositions.
	Organizational culture and change management	• Create and implement a change management plan. • Ensure that the change management plan involves change management as part of the Industry 4.0 projects. • Ensure that the change management plan involves change management needed to manage and support the Industry 4.0 transformation.
Implementing an Industry 4.0 project delivery approach	Project management	• Implement project management tools and processes to plan, monitor, and manage the Industry 4.0 project. • For each Industry 4.0 project, identify the stakeholders. • Implement tools and processes to mitigate the risk of Industry 4.0 projects.
	Teamwork and team composition	• Create and assign an Industry 4.0 project manager role. • Identify and allocate internal resources for Industry 4.0 projects. • Ensure that the team members are familiar with the principles and technologies of Industry 4.0. • Identify and hire missing external resources needed to execute the Industry 4.0 projects.
	Communication management	• Create a communication and training plan for each Industry 4.0 project. • Implement tools and processes to facilitate communication, coordination, and collaboration between the team members.
	Employees' training and knowledge management	• Establish and document the stakeholders' and team members' roles and responsibilities.

Table 6.3 - Actions to support CSF in the Execution phase

Execution Phase	Critical Success Factors	Actions
Industry 4.0 project execution and management	Project management	Control and adjust the project's budget and schedule during the project execution.
	Teamwork and team composition	Ensure the coordination and collaboration between the team members, external resources, and stakeholders of the projects.
	Communication management	Perform regular follow-up on the progress of Industry 4.0 projects at different levels of governance.
	Employees' training and knowledge management	- Document change to the IT infrastructure and architecture of the company. - Document the new processes and technologies implemented. - Create, implement, and document a support process for each new technology. - Train employees on how to use the new technologies and processes.
Industry 4.0 project post-mortem	Project management	- Perform a project post-mortem after each Industry 4.0 project. - Identify the critical success factors of each Industry 4.0 project. - Evaluate the gap between the estimated and actual budget and schedule. - Identify elements from the transformation management structure and project delivery approach that negatively impacted the project.
	Alignment along hierarchical line	- Involve the stakeholders of the project in the post-mortem. - Obtain feedback from the employees and managers of the departments where the technology was implemented.
	Teamwork and team composition	- Evaluate the presence or absence of internal expertise needed for the project. - Evaluate the performance of the project teams as per their roles and responsibilities. - Evaluate the relationship with external partners and suppliers on the projects.
Industry 4.0 management and project delivery approach revision	Align Industry 4.0 strategy to business strategy	- Evaluate the propositions for new Industry 4.0 projects. - Revise the project portfolio and roadmap.
	Alignment along hierarchical line	- Revise the governance of the Industry 4.0 transformation. - Validate the revision and the change with the proper stakeholders and steering committee.
	Communication management	- Revise the communication plan for the Industry 4.0 transformation. - Communicate the revision to the project team, steering committee, and stakeholders
	Project management	- Revise the project management tools and processes to better plan, monitor, and execute the projects. - Train the project teams on the revised tools and processes.
	Teamwork and team composition	Revise the role and responsibilities of the project teams.
	Organizational culture and change management	Identify organizational change to better support the management of the Industry 4.0 transformation of the company.

For the execution phase seen in Table 6.3, nearly all the CSFs are involved except *Conducting a study prior to Industry 4.0 projects*. Indeed, actions to ensure excellent communication and collaboration between the project teams, external contractors, and the stakeholders of the Industry 4.0 projects are present in the Project execution and management steps. Actions to properly train

the employees and manage the knowledge developed during the Industry 4.0 projects are also present. Meanwhile, actions to review the performance of the implemented processes and tools to support and manage the Industry 4.0 projects are presented in the Industry 4.0 project post-mortem step. Finally, actions to revise and implement changes to the processes, tools, project portfolio, and roadmap are presented in the Industry 4.0 management and project delivery approach revision step.

While past research on CSFs only identified a list of actions to support each CSF (Denolf et al., 2015; Françoise et al., 2009; Nfuka & Rusu, 2011), within each step and phase, the proposed methodology identifies and positions the actions needed to support the CSFs of Industry 4.0 transformation in manufacturing SMEs. It allows an SME to clearly identify the actions it needs at its current Industry 4.0 transformation step and plan the following actions accordingly. It also allows the SME to identify the CSFs it must implement at its current step, allowing it to gradually and iteratively implement all the CSFs needed to successfully manage its Industry 4.0 transformation.

When comparing these actions to past studies, similarities can be found. For each CSF, actions from other models that can be applied to the context of manufacturing SMEs could be found. For example, all past models indicate the necessity of allocating resources to the project teams and ensuring that tools and processes are implemented to manage the project scope, schedule, and budget. The same actions can be found in our study and are aligned with best project management practices. Similar actions can also be found within the *Align the Industry 4.0 strategy with the business strategy* CSF, with actions to align the ERP and supply chain system implementation with the business strategy. The *Communication management* CSF is also supported by similar actions between our study and other studies on CSFs.

However, some differences, influenced by the context of the Industry 4.0 transformation process of manufacturing SMEs, can be found, mainly within the *Leadership* and *alignment along hierarchical line* CSF. While past studies indicated that the champion must be part of the company's top management (Denolf et al., 2015; Françoise et al., 2009), our results indicate that, in the context of manufacturing SMEs, the champion should not be a top executive within the company but rather a manager supervised by the top executives. Our results also indicated the importance of creating a steering committee to supervise the Industry 4.0 transformation, while

past studies did not. Finally, since the past studies aimed at identifying actions within a single project, none considered actions aimed at reviewing the project portfolio, management structure, and project delivery approach in an iterative manner. Our study also includes actions to support the *Continuous improvement strategy* CSF, which is not part of past models since they were not developed to be used in the context of iterative projects.

When looking at these actions, many of them were not specific to the context of manufacturing SMEs and could be applied to larger organizations that decide to perform their digital transformation through a set of iterative projects. Critical success factors like *Align industry 4.0 strategy to business strategy* or *Leadership* are not specific to manufacturing SMEs and are valid for larger organizations. Thus, the actions to implement and support them will be similar between large and small companies. However, the steps and phases within which the actions take place can differ between large and small organizations, especially if the large company does not follow an iterative approach to its digital transformation.

Moreover, these actions were primarily identified in response to the challenges of manufacturing SMEs, their context, and the critical factors identified to support their digital transformations. We also validated these actions with a panel of experts with specific experience in manufacturing SMEs and the managers of manufacturing SMEs. The actions have not been validated by experts specialized in the digital transformation of large organizations.

The limitation of the presented methodology resides within the actions themselves. The actions presented in this research are exclusively associated with the CSFs identified earlier. As such, this research did not introduce actions linked to the creation and management of deliverables within each step of the Industry 4.0 transformation process. This research also does not present the sequence and dependencies of these actions within and between each step. Since the objective of this paper is to propose a methodology to manage the digital transformation of manufacturing SMEs by the operationalization of well-established CSFs, we did not test the performance of this methodology within a manufacturing SME. Future research could present a complete and generic model to manage the Industry 4.0 transformation of manufacturing SMEs by adding, sequencing, and linking these actions with different deliverables and actions meant to execute and manage Industry 4.0 projects. Future research could also evaluate the difference between this methodology

and other methodologies specialized in large organizations. Finally, future research could also validate and enhance this methodology by testing it within manufacturing SMEs.

6.7 Conclusion

This paper proposed a methodology to manage the Industry 4.0 transformation process of manufacturing SMEs through the operationalization of CSFs. A literature review was performed to determine the list of actions and position them within the steps and phases of an Industry 4.0 transformation process. These actions were then submitted to a panel of Industry 4.0 experts using a Delphi–Régnier methodology. Based on the opinions of these experts, a methodology was developed and proposed.

This study's main theoretical contribution is the following: By proposing a list of actions complementing the information already available in the literature with a study performed with both practitioners and academics, the study of CSFs in Industry 4.0 was enriched. In addition, by positioning these actions into the different steps, we can identify the timely impact of CSFs in the overall Industry 4.0 transformation process.

This study also has practical implications. The identified actions can serve managers and consultants in digital transformation projects by helping them better plan and execute their Industry 4.0 transformation plans. Indeed, the methodology provides a list of specific actions facilitating the occurrence of the CSFs needed for transformation.

This study possesses limitations worth mentioning. Since it was performed using a panel of experts, this study involves a subjective bias related to the choice of experts from the researchers' academic and professional networks. It was difficult for the research to be completely free from this potential bias despite the research team's desire for neutrality and the attention paid to the complementarity and coherence of the profiles when selecting the experts. Furthermore, a small number of professionals validated the list of actions. We could have obtained more accurate results and complementary information by performing the study with a higher number of experts.

Another limitation is that our research is mainly qualitative. Since we aimed to propose a methodology to manage the Industry 4.0 transformation of manufacturing SMEs, the scope of our study and its prospective aspect did not allow us to envision a more quantitative approach. On the

other hand, our research methodology allowed us to collect empirical data from expert opinions to identify the main actions to support the critical success factors needed to manage the Industry 4.0 transformation of manufacturing SMEs.

Future research could involve studying the presence of said actions within multiple manufacturing SMEs and analyzing the impact of the presence or absence of said actions on the performance, challenge, and risks linked to their Industry 4.0 transformation plans. Since most actions highly depend on the specific context of the manufacturing SME, future research could identify which specific elements of an SME context should be considered and how specific actions should be performed in each case. Finally, since the model was not empirically validated in a manufacturing SME, future researchers could test the methodology and enhance it with their results to assess its effectiveness and generalize it.

CHAPITRE 7 DISCUSSION GÉNÉRALE

Ce chapitre revient sur les éléments importants qui ressortent des trois articles présentés dans les chapitres 4 à 6. Tout d'abord, un sommaire des contributions de chacun des articles est présenté afin de démontrer comment chacun répond aux objectifs de recherche. Ensuite, les liens entre les articles et les contributions seront explorés au travers d'éléments communs entre ceux-ci. Finalement, afin de mettre en pratique les éléments discutés, des recommandations sur les phases, étapes et livrables de gestion de la transformation 4.0 en PME manufacturière, basées sur les résultats des trois articles, sont élaborées.

7.1 Contributions des articles aux objectifs spécifiques

Par le biais des trois articles de cette thèse, plusieurs contributions ont été apportées. L'article 1 décrit les changements organisationnels adoptés par le partenaire industriel afin de faciliter la gestion de sa transformation numérique et propose deux approches permettant de gérer ces changements organisationnels. Cet article a démontré que la PME manufacturière adopte de façon itérative des changements proactifs et réactifs de petite envergure qui lui permette de projet en projet d'améliorer ses processus et sa gouvernance et de mettre en place les ressources nécessaires à la gestion et l'exécution de ses projets numériques. Il démontre également comment la présence d'une culture d'innovation au sein de la PME permet de faciliter l'adoption de ses changements. De ce fait, l'article répond complètement à l'objectif spécifique **OS2** et permet de répondre partiellement à l'objectif spécifique **OS1**.

L'article 2 démontre l'approche de réalisation, les processus, la gouvernance et les outils de gestion de projet de portefeuille de projet qui ont été adoptés par le partenaire industriel afin de gérer sa transformation numérique dans un contexte de collaboration avec une autre PME manufacturière. L'article démontre comment les caractéristiques de la PME ont influencé l'adoption des approches, outil, processus et règle de gouvernance et comment ces éléments ont évolué sur une période de 18 mois en réponse à différents facteurs interne et externe. Cet article démontre également comment les approches, outils, processus et la gouvernance de gestion sont tout d'abord adoptés sous une forme simple et fonctionnelle et se complexifient dans le temps au fur et à mesure que l'entreprise exécute sa transformation et évolue avec elle. De ce fait, cet article permet de répondre à l'objectif spécifique **OS1** et à l'objectif spécifique **OS3**. Par le biais de cet article, les différentes phases et

étapes de la gestion de la transformation numérique en début et fin de collaboration sont décrites, permettant de répondre partiellement à l'objectif spécifique **OS4**.

L'article 3 propose une approche d'opérationnalisation des facteurs de succès critiques de la transformation numérique en PME manufacturière. De ce fait, l'article propose une liste d'actions permettant d'implanter et de supporter les facteurs de succès critiques à l'intérieur des phases et étapes de gestion de la transformation numérique en PME manufacturière. Ces phases, étapes et actions proviennent de la littérature ainsi que des observations en recherche-intervention et permettent ainsi de répondre à l'objectif spécifique **OS4**. Ces phases, étapes et actions ont été soumises aux critiques d'un panel composé de 19 experts en transformation numérique au travers d'une méthode Delphi-Régnier. Ces critiques ont permis de raffiner la liste des actions et leur positionnement à l'intérieur des phases et étapes, et ont permis d'approfondir les actions nécessaires pour certains des facteurs critiques. Les commentaires des experts ont également permis d'identifier certaines relations de cause à effet entre les actions. De ce fait, l'article 3 répond également à l'objectif spécifique **OS5**.

7.2 Thématiques communes des articles et de la thèse

Deux thématiques communes ressortent des travaux de cette thèse et des articles. Tout d'abord, l'utilisation d'une approche itérative pour gérer la transformation numérique, approche qui semble beaucoup plus adapter au contexte des PME manufacturières en pleine transformation et venant fortement influencer la façon dont celle-ci est gérée. Également, puisque notre méthodologie de recherche nous a permis de suivre un partenaire industriel pendant plus de 2 ans, l'évolution de la façon dont la transformation numérique est gérée et l'encadrement de cette évolution, influencée encore une fois par le contexte de la PME manufacturière, sont également ressortis.

7.2.1 Approche itérative de la transformation numérique en PME manufacturière

Le premier élément commun à l'ensemble des articles et à cette thèse est l'utilisation d'une approche itérative pour lancer et gérer les projets de transformation numérique en PME manufacturière. En effet, aussi bien par nos observations auprès du partenaire industriel que par les commentaires recueillis des experts de l'étude Delphi-Régnier, les PME manufacturières semblent

avoir beaucoup plus de succès dans leur transformation numérique si celles-ci effectuent leur transformation au moyen d'une succession de « petits projets rapides l'un après l'autre ». La réalisation de projets en successions permet d'aller chercher un certain momentum dans la transformation numérique en assurant une livraison constante de solutions conduisant chacune à l'obtention de gains distincts. Celle-ci facilite également l'acceptation et l'adoption des technologies auprès des employés en assurant la mise en place de petits changements incrémentaux qui seront beaucoup plus faciles à enseigner et implanter.

Les experts ont également mentionné l'importance de démarrer une transformation numérique par des projets simples facilement atteignables avec les capacités actuelles de l'entreprise, et d'entamer graduellement des projets de plus en plus complexes. À la suite de la mise en place et de l'adoption de projets numériques plus simples et atteignables, il sera possible pour la PME manufacturière d'apprendre à maîtriser, pas à pas, ces nouvelles technologies et ainsi de progresser plus facilement dans sa transformation numérique. En apprenant de l'implantation de ces technologies plus simples, la PME manufacturière acquiert de nouvelles compétences numériques et est donc en mesure d'identifier plus facilement la suite logique à sa transformation numérique et de gérer plus efficacement ses prochains projets.

Bien entendu, l'utilisation d'une approche itérative affecte la façon dont la transformation et les projets en tant que tels doivent être gérés. La PME manufacturière doit donc définir une vision de sa transformation numérique pouvant être divisée en plusieurs petits projets. Ces projets doivent être alignés non seulement à cette vision, mais également aux problématiques d'affaires et opérationnelles de l'entreprise. Cet alignement permet donc à la PME de rapidement obtenir des gains sur chacun des projets, peu importe la taille estimée de ces gains. La constance des projets de transformation, plutôt que leur taille et impact, devient donc un élément important à considérer et à gérer. Finalement, une gestion itérative signifie également que la PME manufacturière doit mettre en place la gouvernance, les processus et les outils servant à établir un premier portefeuille de projets numériques, gérer l'exécution de ces projets, en mesurer les résultats, et assurer une mise à jour régulière de ce portefeuille.

7.2.2 Apprentissage et évolution des outils et processus de gestion

Le deuxième élément commun aux trois articles est l'évolution des outils et processus servant à la gestion de la transformation numérique. L'article 1 démontre bien comment les outils, processus et la gouvernance permettant de gérer le portefeuille de projets numériques collaboratifs ont évolué sur une période de 18 mois. En effet, les outils et processus ont tout d'abord été implantés dans une forme simplifiée et se sont ensuite complexifiés. L'article 2, quant à lui, a mis en évidence l'ensemble des changements organisationnels effectués à la gouvernance, aux processus et à la charte organisationnelle de l'entreprise, qui encore une fois se sont complexifiés au fur et à mesure de la transformation numérique. Des commentaires du panel d'experts de l'article 3 ont également fait mention de la nécessité d'introduire en premier lieu des outils et processus simples en démarrage de transformation et de les ajuster ensuite au besoin.

De ce fait, démarrer avec la mise en place d'outils, de processus et d'une structure de gestion de la transformation numérique simplifiés facilite le lancement de celle-ci et ainsi le démarrage rapide des premiers projets de cette transformation. Au fur et à mesure que la PME exécute et complète ses projets numériques, des besoins plus complexes de suivi, de gouvernance et de gestion des projets, mais également du portefeuille de projets, vont apparaître.

Par exemple, la gouvernance pourrait être révisée afin de faciliter la coordination entre l'équipe de transformation numérique et les responsables des différents départements de l'entreprise, comme ce fut le cas lors de la recherche-intervention. Cette gouvernance plus complexe aurait pu être établie au lancement de la transformation numérique. Cependant, les besoins de coordination avec les différents responsables de département sur une base régulière n'étaient pas nécessaires pour les premiers projets numériques. L'absence de cette gouvernance plus complexe n'a pas empêché l'équipe de transformation numérique de livrer les premiers projets numériques du partenaire industriel, mais s'est avérée par la suite nécessaire lors du démarrage d'un projet numérique impliquant une présence continue de l'équipe de transformation numérique sur le plancher d'usine.

L'évolution de ces outils et processus peut être réalisée de façon proactive aux projets, comme ce fut le cas pour la gouvernance du partenaire industriel, ou encore réactive à l'apparition soudaine de besoins ou de problématiques. Par exemple, lors de l'exécution d'un projet d'implantation d'une plateforme et de rapport d'intelligence d'affaires au sein du partenaire industriel, la direction de

l'entreprise a soulevé la problématique d'un manque de visibilité sur l'avancement du projet et sur la création des rapports d'intelligence d'affaires. Afin de répondre à cette problématique, l'équipe de transformation numérique a décidé de remplacer sa méthode de gestion de projet traditionnelle par une méthode de gestion de projet agile, lui permettant de livrer chaque mois un volet des rapports d'intelligence d'affaires. Cette méthode de gestion de projet a permis de donner plus de visibilité à l'avancement des rapports d'intelligence d'affaires et à la mise en place de la plateforme, ainsi que d'assurer une livraison continue de solution répondant aux besoins de la haute direction du partenaire industriel.

Les outils et processus ont également évolué en réponse à l'apprentissage et à la montée en maturité de l'entreprise partenaire dans la gestion de sa transformation numérique. Alors que l'entreprise gère sa transformation à l'aide de ces outils, processus et gouvernance, celle-ci apprend à les maîtriser et prend en maturité. Alors qu'elle progresse dans son apprentissage, elle est en mesure d'identifier des besoins en gestion et suivi non satisfaits par les outils et processus implantés. Elle définit et implante donc des changements à ces outils et processus afin de répondre à ces nouveaux besoins. Le cycle d'apprentissage et de maturité recommence avec ces nouveaux changements amenant à l'identification de nouveaux besoins de gestion et de suivi de la transformation numérique. La PME manufacturière peut donc mettre en place des outils et processus favorisant l'évolution de ses outils et processus de gestion de la transformation numérique.

7.3 Recommandations pratiques

Afin de faciliter la gestion de sa transformation numérique, la PME manufacturière tire avantage de prendre en compte la nature itérative de sa transformation numérique, en mettant en place une succession de projets numériques simples qui pourront se complexifier par la suite. Pour ce faire, elle privilégie d'adopter une démarche lui permettant d'identifier des projets de transformations numériques à l'intérieur d'un portefeuille de projets, de les prioriser, de les exécuter et de les réviser sur une base régulière. Elle doit également implanter des outils et processus pour gérer sa transformation numérique, en prenant en compte son niveau de maturité de gestion et en assurant la présence d'une démarche lui permettant de faire évoluer ses outils et processus en fonction de son apprentissage et de la complexité changeante de son portefeuille de projets et de son processus de gestion.

Nous recommandons donc les phases, étapes et livrables suivants afin de faciliter la gestion de la transformation 4.0 tels que présentés dans la Figure 7.1. Un total de trois phases et de neuf étapes permettant à la PME manufacturière de planifier, lancer et gérer la transformation numérique sont présentées. Ces recommandations sont basées aussi bien sur la littérature que sur les observations en entreprise de la recherche-intervention et sur les commentaires du panel d'experts de l'étude Delphi-Régnier. Celles-ci débutent tout d'abord avec une phase d'identification dont l'objectif est la création d'un portefeuille de projets alignés avec la stratégie d'affaires de l'entreprise. Vient ensuite une phase de démarrage durant laquelle la PME manufacturière pourra prioriser ses projets et mettre en place les outils, processus et la structure nécessaire pour la gestion de sa transformation numérique. Suit finalement une phase d'exécution de la transformation numérique qui inclut des étapes et livrables de rétroaction sur le portefeuille de projets numériques et sur les outils, processus et la structure de gestion de la transformation numérique. Ces boucles de rétroactions sont basées sur les éléments discutés dans les sections 7.2 et 7.2.2 et sont au cœur des recommandations pratiques pour faciliter la gestion de la transformation numérique des PME manufacturières.

La Figure 7.1 est composée de plusieurs éléments. Tout d'abord les rectangles représentent les étapes incluses dans chaque phase, alors que les cercles représentent les extrants/intrants de ces étapes. Un code de couleur est également appliqué. Les éléments en vert sont complètement supportés par la littérature scientifique. Les éléments en jaune sont supportés de façon indirecte par la littérature scientifique et confirmée par ce projet de recherche. Les éléments en bleu sont peu ou pas supportés par la littérature scientifique et sont principalement basés sur les résultats du projet de recherche.

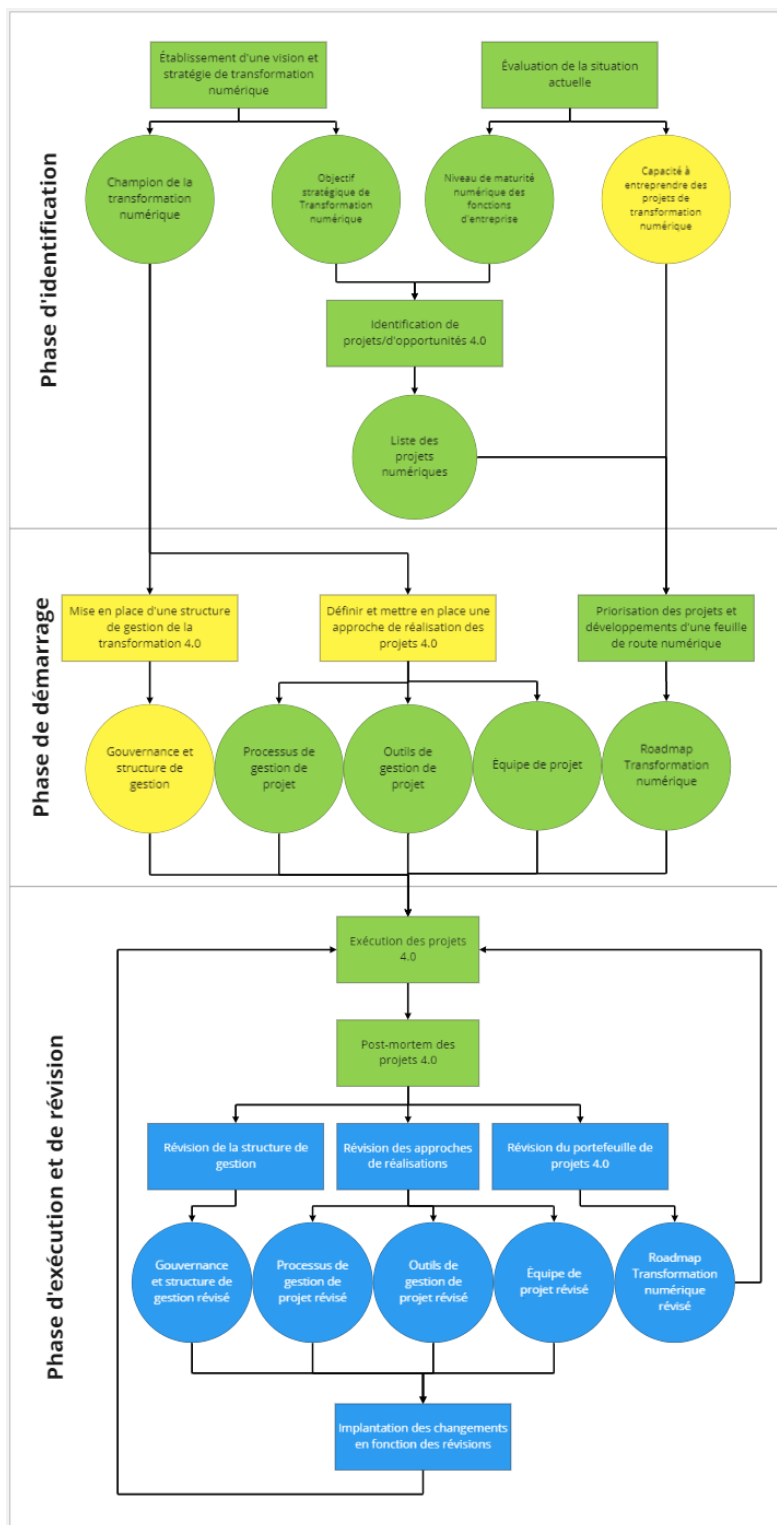


Figure 7.1 – Phases, étapes et livrables de gestion de la transformation 4.0 pour les PME manufacturières

7.3.1 Phase d'identification

La phase d'identification, présentée dans la Figure 7.2, a pour objectif d'identifier les projets qui composeront le portefeuille initial de projets de transformation numérique de la PME et ainsi de planifier cette transformation numérique. Tel que mentionné dans la littérature sur les échelles de maturité et sur les facteurs critiques de succès en transformation numérique, il est nécessaire pour la PME manufacturière de définir une vision stratégique claire de sa transformation numérique, de l'aligner sur sa stratégie d'affaires et d'identifier des projets lui permettant de l'atteindre.

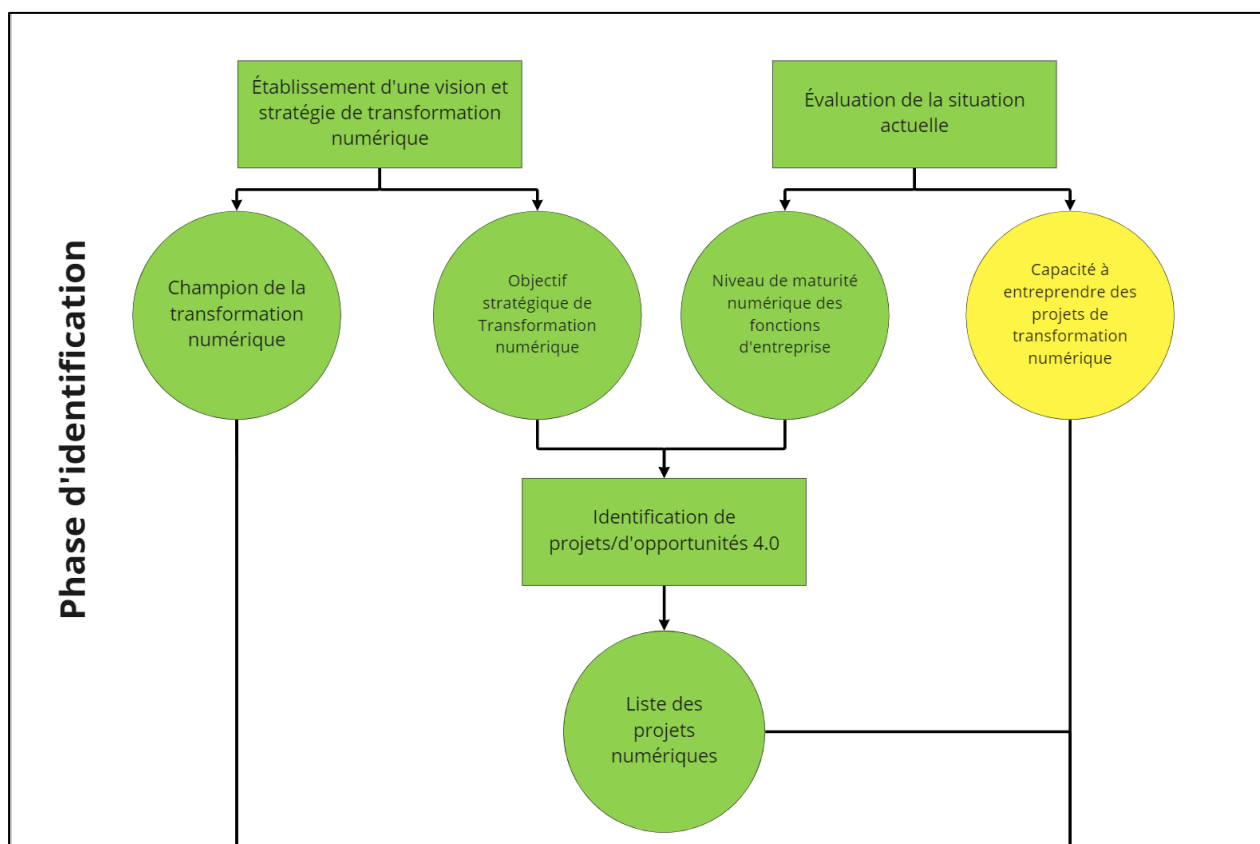


Figure 7.2 – Phase d'identification

Établissement d'une vision stratégique de transformation numérique : Comme son nom l'indique, cette étape consiste à établir une vision stratégique. Au cours de cette étape, la PME s'assure de définir des objectifs financiers et opérationnels qui seront supportés par les projets de transformation numérique. Considérant le contexte de stratégie court-terme des PME, le panel

d'experts a suggéré qu'une vision de haut niveau soit établie sur un horizon de trois (3) ans et que des objectifs spécifiques soient établis sur un horizon d'un an. Tel que décrit par Moeuf et al. (2019), la PME peut également assurer que sa vision stratégique numérique soit alignée et supporte sa stratégie d'affaires. Lors de cette étape, la PME peut également nommer un Champion de la transformation numérique qui aura pour mission de mettre en œuvre cette stratégie et d'assurer la présence d'un leadership constant autour de l'initiative (Françoise et al., 2009; Moeuf et al., 2019; Pozzi et al., 2021).

Évaluation de la situation actuelle : Alors que la vision stratégique permet de déterminer où l'entreprise désire se diriger, cette étape détermine son point de départ. L'évaluation de la situation actuelle possède deux objectifs : déterminer le niveau de maturité numérique des fonctions d'entreprise et déterminer la capacité de l'entreprise à réaliser ses projets numériques. Déterminer la maturité numérique des fonctions de l'entreprise sert à évaluer les forces et faiblesses de ses processus et de ses systèmes en termes de numérisation et ainsi à identifier les éléments qui devront être adressés au travers des projets de transformation numérique. L'évaluation de la maturité numérique a été traitée plusieurs fois dans la littérature depuis quelques années et a mené à la création d'outils et de modèles de maturité 4.0 (Leyh et al., 2016; Mittal, Khan, et al., 2018; Schumacher et al., 2016). Des outils et modèles commerciaux et gouvernementaux ont également été développés et utilisés par des praticiens depuis quelques années. Cela est notamment le cas d'outil comme l'Audit 4.0 du ministère de l'Économie et de l'Innovation du Québec. La PME peut donc utiliser ces outils et modèles afin de déterminer la maturité numérique de ses processus et fonction d'entreprise. Les experts de l'étude Delphi-Régnier ont cependant mis en garde contre l'utilisation de ces outils pour évaluer l'ensemble des processus et fonctions de la PME. Plusieurs ont mentionné qu'il serait préférable pour l'entreprise de définir d'avance des processus ou fonctions à enjeux dont l'amélioration pourrait supporter les objectifs stratégiques et ainsi d'effectuer une analyse de maturité numérique en profondeur sur ces processus et fonction à enjeux, diminuant ainsi l'effort et facilitant le processus d'évaluation.

En parallèle, la PME évalue sa capacité à réaliser des projets de transformation numérique. La recherche-intervention a démontré comment le partenaire industriel a implanté différents changements afin de supporter sa transformation et de se donner la capacité de réaliser ses projets.

La PME peut ainsi évaluer si elle possède les ressources (financières et humaines), les processus, les outils, la culture et l'expertise nécessaire pour exécuter ses projets de transformation numérique. Pour ce faire, celle-ci peut utiliser des outils d'échelle de « readiness » de la littérature (Basl, 2018; Brozzi et al., 2018; Schumacher et al., 2016) ainsi que vérifier si elle possède déjà certains des facteurs de succès critiques à la gestion de projets de transformation numérique (Moeuf et al., 2019; Müller, R. et al., 2012; Shinohara et al., 2017; Vrchota et al., 2021).

Identification des projets 4.0 : Une fois les objectifs stratégiques définis et l'évaluation de la maturité numérique des fonctions d'entreprises effectuée, la PME peut définir des projets et des regroupements de projets numériques nécessaires pour combler les lacunes des fonctions d'entreprise afin d'atteindre les objectifs. Ces projets pourront par la suite être introduits à l'intérieur d'un portefeuille de projets numériques.

Pour chacun de ces projets, la PME établit convenablement les objectifs de chacun des projets, évalue les ressources nécessaires pour leur réalisation et indique toutes les interdépendances possibles entre eux et entre des systèmes existants et futurs. Afin de déterminer ces éléments, la PME peut utiliser les pratiques décrites dans la littérature existante (section 2.3.3), se référer aux conseils de praticiens ou encore à ses propres processus internes. Une fois cette étape complétée, la PME possède donc un portefeuille de projets numériques pour atteindre ses objectifs stratégiques.

7.3.2 Phase de démarrage

La phase de démarrage a pour objectif la mise en place des outils, processus, règles de gouvernance et structures qui supporteront la réalisation des projets numériques de l'entreprise. Le projet de recherche ainsi que la littérature sur les facteurs de succès critiques ont démontré la nécessité de mettre en place différents outils, processus et structure afin de faciliter la transformation numérique de la PME manufacturière. Comme illustré dans la Figure 7.3, la phase de démarrage possède trois étapes pouvant être exécutées en parallèle.

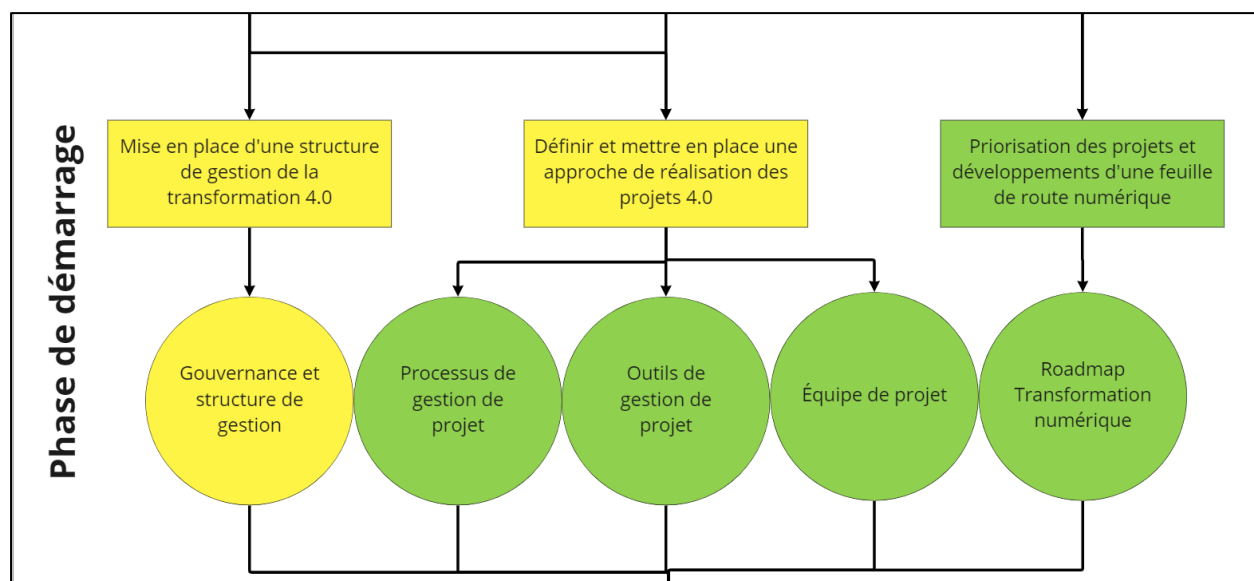


Figure 7.3 – Phase de démarrage

Priorisation des projets et développement d'une feuille de route numérique : Cette étape consiste à prioriser la liste de projets selon les interdépendances des projets, les objectifs de l'entreprise ainsi que la capacité de la PME à réaliser ses projets. Plusieurs outils peuvent être utilisés pour effectuer cette priorisation, tels que des feuilles de route ou encore des matrices effort-impact. La priorisation et les critères pour y arriver vont varier entre les PME. Cependant les experts de l'étude Delphi recommandent de prioriser en premier avec des projets simples rapidement atteignables, les « low-hanging fruits », qui ne sont pas en fonction d'autres projets 4.0 et qui peuvent être réalisés avec les capacités actuelles de la PME. Cette approche de priorisation a également été utilisée par le partenaire industriel. Il a également été recommandé que la priorisation soit effectuée par le Champion de la transformation numérique ou encore un comité avisier. Une fois la priorisation effectuée, la PME obtient une feuille de route des projets de son portefeuille de projets.

Mise en place d'une structure de gestion de la transformation 4.0 : En parallèle de la priorisation des projets 4.0, la PME définit et adopte des processus et une structure pour gérer le portefeuille de projets, effectuer le suivi des réalisations et assurer que les problématiques et opportunités puissent être escaladées aux bonnes parties prenantes. Il en ressort que l'une des premières actions du Champion de la transformation numérique est d'implanter une gouvernance

de la transformation numérique. Cette gouvernance peut prendre différentes formes selon le contexte de la PME manufacturière. Cependant, l'un des points soulevés par les experts était la nécessité de créer un comité de pilotage composé de membres de la direction de la PME. Les rôles de ce comité incluent notamment le suivi du portefeuille de projets, la priorisation des projets, l'attribution des ressources et la résolution de problématiques nécessitant l'intervention d'un directeur. Également, la gouvernance peut prendre une forme simplifiée avec uniquement deux niveaux, une rencontre d'équipe de projets et une rencontre du comité de pilotage, en début de transformation, puis évoluer par la suite selon les besoins et le contexte de la PME.

Définir et mettre en place une approche de réalisation des projets 4.0 : en fonction des projets identifiés, le Champion de la transformation numérique définit et implante les outils et processus pour planifier et gérer les projets de transformation numérique. Selon les projets du portefeuille, une approche de réalisation par un processus de gestion de projet traditionnelle, dit Cascade, pourrait être recommandée. Une approche de gestion de projet agile pourrait également être recommandée. Peu importe l'approche sélectionnée, la PME peut s'assurer de mettre en place un minimum d'outils et de processus permettant le suivi des projets 4.0 en fonction de l'approche de prédilection. Si la PME possède déjà des outils et processus de gestion de projets, celle-ci peut les utiliser. Le Champion pourra également assembler une première équipe de projet et nommera un gestionnaire de projet, et définira leurs rôles et responsabilités. Enfin, il pourra assurer la mise en place d'outils et de processus favorisant la communication et la collaboration au sein de l'équipe.

Une fois que les projets sont priorisés et que la PME a instauré une première structure, une première équipe et des premiers outils et processus de gestion de projets, celle-ci peut lancer sa transformation numérique et démarrer l'exécution de ses premiers projets.

7.3.3 Phase d'exécution et de révision

La phase d'exécution et de révision, présentée dans la Figure 7.4, est une phase itérative dont l'objectif est la réalisation des projets 4.0 ainsi que la révision des outils, processus et structures de la gestion de la transformation numérique, tel que discuté dans les sections 7.2 et 7.2.2. Cette phase contient en effet deux boucles itératives, une rattachée au portefeuille de projets et une autre rattachée à la structure de gestion et aux approches de réalisation. Tel que discuté dans la section 7.2.2, les boucles d'itération permettant de mettre à jour la structure, les outils et les processus de

gestion de la transformation numérique découlent directement du contexte et des caractéristiques spécifiques des PME manufacturières.

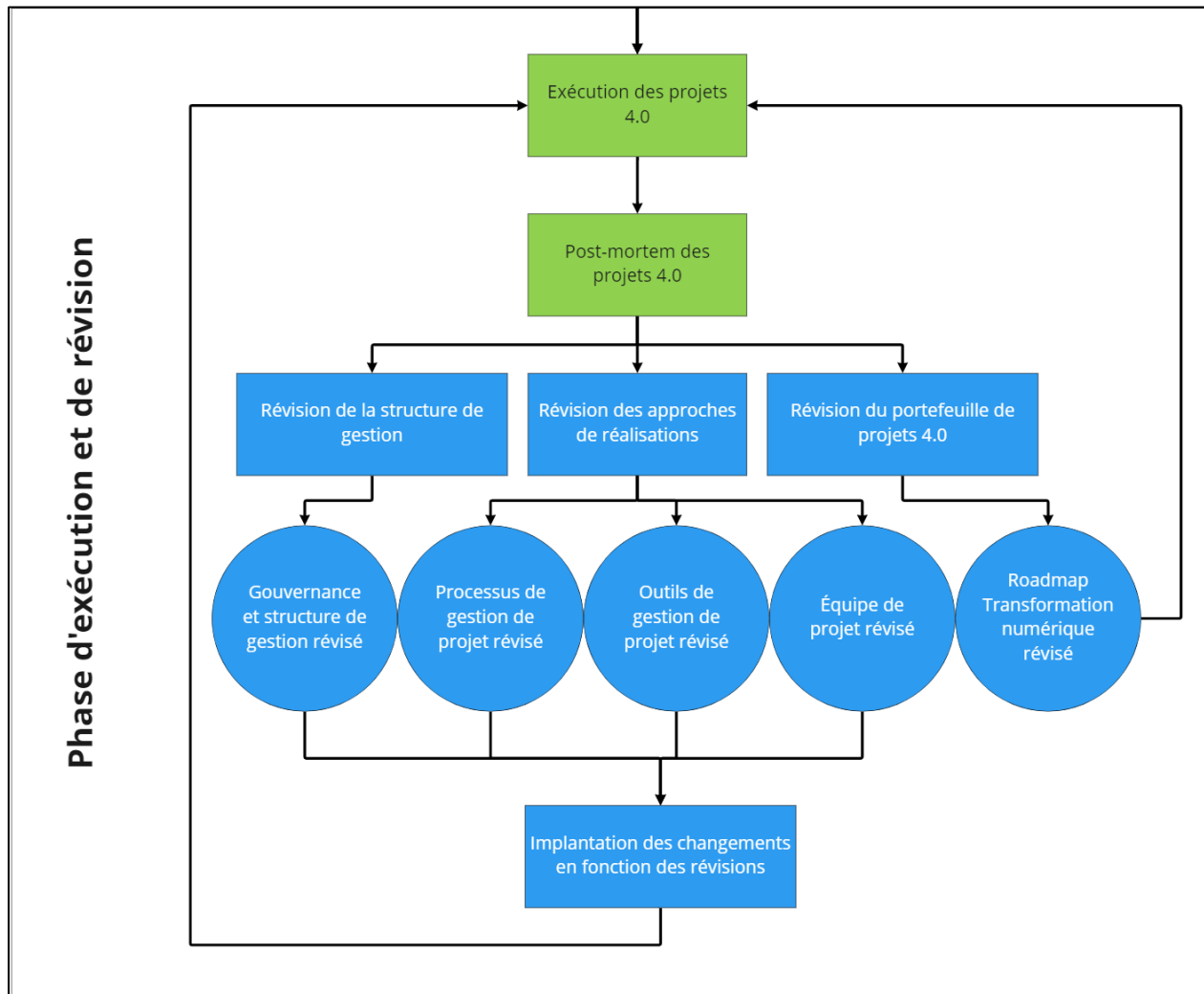


Figure 7.4 – Phase d’exécution et de révision

Exécution des projets 4.0 : Comme son nom l’indique, l’étape d’exécution de projet représente l’étape durant laquelle le projet 4.0 est géré et suivi en utilisant les outils et processus de gestion de projet ainsi que la structure de gestion de la transformation numérique définie lors de la phase de démarrage. La littérature en gestion de projet numérique est déjà très extensive, la PME peut donc suivre les meilleures pratiques de l’industrie afin de gérer et de réaliser ses projets numériques en fonction des outils et processus qu’elle a adoptés.

Post-mortem des projets 4.0 : À la suite de chaque projet, un post-mortem de celui-ci est effectué. L'objectif du post-mortem, une pratique reconnue et établie en gestion de projet, est de mettre de l'avant les éléments qui ont favorisé la réussite du projet ainsi que d'identifier des pistes de solutions aux problématiques qui ont nui au projet 4.0. Au cours de ce post-mortem, la PME identifiera les éléments de la structure des outils et des processus de gestion de la transformation numérique qui ont facilité et nuit à la réalisation du projet. Une analyse des causes fondamentales de ces éléments peut être effectuée par la PME manufacturière.

Révision de la structure, des outils et des processus de gestion de la transformation numérique : Une fois les causes des problématiques déterminées lors du post-mortem du projet, la PME peut identifier des pistes d'amélioration et de révision de sa structure et de ses outils et processus de gestion. Ces révisions peuvent inclure l'ajout d'outil de suivi de projets additionnels ou encore l'implantation de nouveaux indicateurs de performance assurant un meilleur contrôle du projet. Des changements à la gouvernance et aux règles de communication avec les parties prenantes de la transformation numérique peuvent également survenir. Finalement, des modifications à l'équipe de projet, sa composition ou encore ses rôles et responsabilités peuvent être mis de l'avant. Il est à mentionner qu'une révision de la structure, des outils et des processus n'est pas systématique à la fin de chaque projet 4.0. Si un projet 4.0 s'est bien déroulé et que les outils et processus n'ont pas nui au projet, ceux-ci n'auront pas besoin d'être révisés.

Révision du portefeuille de projets : Une révision du portefeuille de projets peut également survenir à la suite du post-mortem. Tel qu'observé lors de la recherche-intervention, de nouvelles opportunités de projets 4.0 peuvent survenir à la suite de la réalisation de projets. Des événements internes et externes à l'entreprise peuvent également venir influencer l'ordre de priorité des projets du portefeuille, rajouter de nouveaux projets ou encore retirer des projets.

7.4 Conclusion

Ce chapitre a tout d'abord mis de l'avant la nature itérative de la gestion de la transformation numérique des PME manufacturières telle qu'observée au travers du projet de recherche. Il a également mis de l'avant les éléments d'apprentissages organisationnels et d'évolution des outils, processus et pratiques permettant aux PME de démarrer une transformation numérique avec un minimum d'outil et ensuite de faire évoluer ces outils et processus en fonction de leurs besoins et

de la complexité grandissante de leurs projets. Finalement, ce chapitre a présenté plusieurs recommandations pratiques sous forme de phases, d'étapes et de livrables facilitant la gestion de la transformation numérique de la PME manufacturière, en capitalisant sur plusieurs bonnes pratiques de la littérature, sur la nature itérative des projets de transformations 4.0 ainsi que sur l'aspect évolutif des outils et processus décrits plus tôt. Le chapitre suivant présentera la conclusion de ce projet de recherche.

CHAPITRE 8 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

L'objectif principal de cette recherche était de faciliter et d'améliorer la transformation numérique vers l'Industrie 4.0 en proposant des recommandations de gestion de la transformation 4.0 adaptées au contexte des PME manufacturières. Pour ce faire, nous avons entamé une recherche en deux volets débutant par une recherche-intervention auprès d'un partenaire industriel et terminant avec une étude Delphi-Régnier auprès d'un panel d'experts. La recherche-intervention a permis d'obtenir les données empiriques du partenaire industriel qui ont servi à mieux comprendre le processus de transformation numérique d'une PME manufacturière et ses caractéristiques et ainsi mener à une définition initiale d'une approche de gestion de la transformation numérique. La recherche Delphi-Régnier auprès d'un panel d'experts a permis de confronter cette approche de gestion initiale auprès de l'avis d'experts et de la faire évoluer en se basant sur leurs commentaires et suggestions. En tout, cette méthodologie de recherche a permis d'atteindre l'ensemble des sous-objectifs de recherche, par le biais de la soumission et publication de trois articles scientifiques.

Cette étude est porteuse de quatre contributions théoriques distinctes. Tout d'abord, celle-ci a permis de décrire le processus de transformation numérique d'une PME manufacturière, permettant ainsi de mettre de l'avant des données empiriques préliminaires sur la façon dont les PME lancent et gèrent leur transformation numérique. Également, cette étude a permis de comprendre comment le contexte d'une PME manufacturière affecte son approche de gestion et sa transformation numérique, mettant de l'avant la nature évolutive de son approche au fur et à mesure que des projets sont réalisés. Cette étude a également permis d'identifier les actions et livrables permettant de faciliter la gestion de la transformation numérique, le tout intégré dans une proposition d'approche en phases et sous-étapes de gestion de la transformation numérique en PME manufacturière.

Cette étude amène également deux contributions pratiques importantes pour les gestionnaires et praticiens responsables de la gestion de la transformation numérique en PME manufacturière. Tout d'abord, puisque les PME manufacturières ne possèdent pas nécessairement une gouvernance, des processus et des outils leur permettant de rapidement et efficacement mettre en œuvre une stratégie de transformation numérique, cette étude permet de sensibiliser les praticiens à l'importance d'adopter une approche itérative et évolutive. Elle propose également plusieurs recommandations pratiques et détaille l'approche de gestion sous forme de phases, d'actions et de livrables sur

lesquels les praticiens peuvent s'appuyer et prendre action lors de la gestion des projets de transformations numériques et de l'implantation des outils et processus nécessaires pour son suivi et sa gestion.

Finalement, cette étude comporte également deux contributions méthodologiques. Tout d'abord elle met de l'avant une approche de recherche itérative entre recherche-intervention et revue de littérature dans un contexte d'étude sur l'industrie 4.0. Les recherches-intervention en Industrie 4.0 sont encore très rares et sont utilisées généralement dans un contexte de description d'une étude de cas. Lors de notre étude, nous avons effectué plusieurs boucles d'itération entre les éléments observés en recherche-intervention et la revue de littérature. Ces itérations ont permis de mieux comprendre les phénomènes observés permettant ainsi de mieux déterminer les éléments à implanter et tester pour faciliter la gestion de la transformation numérique du partenaire industriel. Également, cette étude met de l'avant une combinaison d'approche entre la recherche-intervention et une étude Delphi-Régnier. Les deux méthodologies de recherche ont été utilisées à maintes reprises dans la recherche sur l'Industrie 4.0 en PME manufacturière, cependant celles-ci n'ont pas été combinées jusqu'à présent. Cette combinaison d'approches de recherche a engendré un ensemble de données empiriques riches sur la transformation numérique du partenaire industriel, nécessaires pour l'élaboration d'une première définition détaillée de l'approche de gestion de la transformation 4.0, dont les éléments ont ensuite pu être soumis à un panel d'experts au cours de l'étude Delphi-Régnier.

Cette étude comprend toutefois plusieurs limitations. Tout d'abord, la généralisation des résultats de cette étude et des recommandations proposées reste restreinte par la nature de notre méthodologie de recherche. Cependant plusieurs aspects restent transférables au sein d'entreprise possédant un contexte similaire. Tel que discuté au Chapitre 7, le contexte de la PME affecte grandement le détail des actions et des étapes que celles-ci suivront pour gérer le lancement et l'exécution de sa transformation numérique. La pandémie de Covid-19 a également affecté grandement les priorités et les processus du partenaire industriel, celui-ci ayant mis fin au projet de recherche-intervention en début de pandémie après avoir mis en veille l'ensemble de ses projets de transformation numérique et mis à pied son équipe. De ce fait, le projet de recherche-intervention a pris fin plus tôt que prévu, forçant l'équipe de recherche à ne pouvoir utiliser que les observations

entre janvier 2018 et mars 2020. Finalement, les données ont été analysées par un seul membre de l'équipe de recherche. Cette limitation a été causée par la difficulté d'interpréter les données sans une connaissance approfondie du contexte organisationnel du partenaire industriel. Afin de pallier cette limitation, le chercheur principal a partagé et échangé à plusieurs reprises sur les éléments observés en entreprises auprès de gestionnaires et d'employés du partenaire industriel ainsi qu'auprès de l'équipe de recherche. En perspective et en évaluant les limitations rencontrées lors de cette recherche, il serait possible d'augmenter la qualité de cette étude et d'enrichir les résultats par l'implication de partenaires industriels additionnels. Inclure des partenaires industriels additionnels à la recherche permettrait d'aider à la généralisation des résultats et ainsi de vérifier si certains des éléments observés sont spécifiques au partenaire industriel ou communs aux différentes PME. Une façon d'y arriver aurait été d'inclure un questionnaire et des entrevues avec différentes PME manufacturières afin d'identifier comment celles-ci ont abordé leur transformation numérique et comment leur contexte a impacté leur choix d'approche de gestion.

À la suite de ce projet de recherche, plusieurs avenues de recherche pourraient être poursuivies afin de valider davantage les recommandations proposées vers une généralisation ou encore bonifier son contenu. Tout d'abord, des recherches futures pourraient tenter d'identifier et d'analyser les éléments spécifiques du contexte de la PME affectant son processus de gestion de la transformation numérique. Considérant que le contexte d'une entreprise peut être divisé en plusieurs éléments, notamment la culture de l'entreprise, sa taille et ses processus internes (Smallbone et al., 1995), il serait important au cours de futures recherches de déterminer quels éléments affectent la capacité d'une PME manufacturière à lancer et gérer sa transformation numérique et comment ces éléments affectent son approche de gestion de la transformation numérique. Un autre projet de recherche potentiel serait d'évaluer les recommandations pratiques proposées au chapitre 7, et de vérifier leurs effets sur la facilité de gestion de la transformation numérique au sein de plusieurs PME manufacturières.

Pour finir, cette thèse a permis de tisser un pont entre la pratique vécue par les PME et la théorie développée par la recherche académique. Des recherches futures pourraient donc s'inspirer de cette approche méthodologique afin de mieux comprendre les problématiques vécues par les PME et leur fonctionnement et ainsi de développer des solutions tangibles à ces problématiques.

RÉFÉRENCES

- Agarwal, R., Gao, G., DesRoches, C., & Jha, A. K. (2010). Research Commentary—The Digital Transformation of Healthcare: Current Status and the Road Ahead. *Information Systems Research*, 21(4), 796-809. <https://doi.org/10.1287/isre.1100.0327>
- Ahlskog, M., Bruch, J., & Jackson, M. (2017). Knowledge integration in manufacturing technology development. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 28(8), 1035-1054. <https://doi.org/10.1108/Jmtm-03-2017-0051>
- Akdil, K. Y., Ustundag, A., & Cevikcan, E. (2018). Maturity and Readiness Model for Industry 4.0 Strategy. Dans *Industry 4.0: Managing The Digital Transformation* (p. 61-94). Springer International Publishing.
- Al-Kloub, B., Al-Shemmeri, T., & Pearman, A. (1997). The role of weights in multi-criteria decision aid, and the ranking of water projects in Jordan. *European Journal of operational research*, 99(2), 278-288.
- Ali, I., & Aboelmaged, M. G. S. (2022). Implementation of supply chain 4.0 in the food and beverage industry: perceived drivers and barriers. *International Journal of Productivity and Performance Management*, 71(4), 1426-1443. <https://doi.org/10.1108/Ijppm-07-2020-0393>
- Alvarez-García, B., & Fernández-Castro, A. (2018). A comprehensive approach for the selection of a portfolio of interdependent projects. An application to subsidized projects in Spain. *Computers & Industrial Engineering*, 118, 153-159.
- Amaral, A., & Peças, P. (2021a). A Framework for Assessing Manufacturing SMEs Industry 4.0 Maturity. *Applied Sciences*, 11(13), 6127. <https://doi.org/10.3390/app11136127>
- Amaral, A., & Peças, P. (2021b). SMEs and Industry 4.0: Two case studies of digitalization for a smoother integration. *Computers in Industry*, 125, 103333. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2020.103333>
- Amberg, M., & Lang, M. (2009). *Fostering IT-based innovations through innovation-conducive it project portfolio management*. ICACTE 2009 - Proceedings of the 2nd International Conference on Advanced Computer Theory and Engineering (vol. 2, p. 1543-1548).
- Andres, B., & Poler, R. (2016). Models, guidelines and tools for the integration of collaborative processes in non-hierarchical manufacturing networks: a review. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 29(2), 166-201. <https://doi.org/10.1080/0951192x.2014.1003148>
- Anggrahini, D., Kurniati, N., Karningsih, P., Parenreng, S., & Syahroni, N. (2018). *Readiness Assessment Towards Smart Manufacturing System for Tuna Processing Industry in Indonesia*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (vol. 337, p. 012060). <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/337/1/012060/pdf>
- Archer, N. P., & Ghasemzadeh, F. (1999). An integrated framework for project portfolio selection. *International Journal of Project Management*, 17(4), 207-216.

- Arcidiacono, F., Ancarani, A., Mauro, C. D., & Schupp, F. (2019). Where the Rubber Meets the Road. Industry 4.0 Among SMEs in the Automotive Sector. *IEEE Engineering Management Review*, 47(4), 86-93. <https://doi.org/10.1109/emr.2019.2932965>
- Armenakis, A. A., & Bedeian, A. G. (1999). Organizational change: A review of theory and research in the 1990s. *Journal of Management*, 25(3), 293-315. <https://doi.org/10.1177/014920639902500303>
- Ashton, R. H. (1986). Combining the judgments of experts: How many and which ones? *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, 38(3), 405-414.
- Barratt, M. (2004). Understanding the meaning of collaboration in the supply chain. *Supply Chain Management-an International Journal*, 9(1), 30-42. <https://doi.org/10.1108/13598540410517566>
- Baskerville, R., & Myers, M. D. (2004). Special Issue on Action Research in Information Systems: Making is Research Relevant to Practice - Foreword. *Mis Quarterly*, 28(3), 329-335. <https://doi.org/10.2307/25148642>
- Baskerville, R., & WoodHarper, T. (1996). A critical perspective on action research as a method for information systems research. *Journal of Information Technology*, 11(3), 235-246. <https://doi.org/10.1177/026839629601100305>
- Basl, J. (2017). Pilot Study of Readiness of Czech Companies to Implement the Principles of Industry 4.0. *Management and Production Engineering Review*, 8(2), 3-8. <https://doi.org/10.1515/mper-2017-0012>
- Basl, J. (2018). *Analysis of Industry 4.0 Readiness Indexes and Maturity Models and Proposal of the Dimension for Enterprise Information Systems*. International Conference on Research and Practical Issues of Enterprise Information Systems (p. 57-68).
- Bathallath, S., Smedberg, Å., & Kjellin, H. (2016). Managing project interdependencies in IT/IS project portfolios: a review of managerial issues. *International journal of information systems and project management*, 4(1), 67-82.
- Bathallath, S., Smedberg, Å., & Kjellin, H. (2017). Impediments to Effective Management of Project Interdependencies: A Study of IT/IS Project Portfolios. *Journal of Electronic Commerce in Organizations*, 15(2), 16-30. <https://doi.org/10.4018/Jeco.2017040102>
- Belinski, R., Peixe, A. M. M., Frederico, G. F., & Garza-Reyes, J. A. (2020). Organizational learning and Industry 4.0: findings from a systematic literature review and research agenda. *Benchmarking: An International Journal*, 27(8), 2435-2457. <https://doi.org/10.1108/bij-04-2020-0158>
- Benitez, G. B., Ayala, N. F., & Frank, A. G. (2020). Industry 4.0 innovation ecosystems: An evolutionary perspective on value cocreation. *International Journal of Production Economics*, 228, 107735. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107735>
- Benyouci, S. (2017). *La transition numérique des PME aérospatiales et la gestion du changement dans un contexte d'Industrie 4.0* [Masters Thesis, Polytechnique Montréal].

- Bhattacharyya, R., Kumar, P., & Kar, S. (2011). Fuzzy R&D portfolio selection of interdependent projects. *Computers & Mathematics with Applications*, 62(10), 3857-3870. <https://doi.org/10.1016/j.camwa.2011.09.036>
- Bibby, L., & Dehe, B. (2018). Defining and assessing industry 4.0 maturity levels - case of the defence sector. *Production Planning & Control*, 29(12), 1030-1043. <https://doi.org/10.1080/09537287.2018.1503355>
- Bierwolf, R. (2017). Towards project management 2030: why is change needed? *IEEE Engineering Management Review*, 45(1), 21-26.
- Borangui, T., Trentesaux, D., Thomas, A., Leitão, P., & Barata, J. (2019). Digital transformation of manufacturing through cloud services and resource virtualization. 108, 150-162.
- Bouyssou, D. (1990). Building criteria: a prerequisite for MCDA. Dans *Readings in multiple criteria decision aid* (p. 58-80). Springer.
- Brettel, M., Friederichsen, N., Keller, M., & Rosenberg, M. (2014). How virtualization, decentralization and network building change the manufacturing landscape: An Industry 4.0 Perspective. *International Journal of Information and Communication Engineering*, 8(1), 37-44.
- Brettel, M., Klein, M., & Friederichsen, N. (2016). The relevance of manufacturing flexibility in the context of Industrie 4.0. *Research and Innovation in Manufacturing: Key Enabling Technologies for the Factories of the Future - Proceedings of the 48th Cirp Conference on Manufacturing Systems*, 41, 105-110. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.12.047>
- Brodeur, J., Deschamps, I., & Lakiza, V. (19 March 2017 2017). *NPD implementation: Beyond Best Practices* The ISPIM Innovation Summit, Toronto, Canada.
- Brodeur, J., Deschamps, I., & Pellerin, R. (2022). Organizational Changes Approaches to Facilitate the Management of Industry 4.0 Transformation in Manufacturing SMEs. *[Manuscript submitted for publication]*.
- Brodeur, J., Pellerin, R., & Deschamps, I. (2021). Collaborative approach to digital transformation (CADT) model for manufacturing SMEs. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 33(1), 61-83. <https://doi.org/10.1108/jmtm-11-2020-0440>
- Brozzi, R., D'Amico, R., Monizza, G. P., Marcher, C., Riedl, M., & Matt, D. (2018). *Design of Self-assessment Tools to Measure Industry 4.0 Readiness. A Methodological Approach for Craftsmanship SMEs*. IFIP International Conference on Product Lifecycle Management (p. 566-578).
- Brynjolfsson, E., & Hitt, L. M. (2000). Beyond computation: Information technology, organizational transformation and business performance. *Journal of Economic Perspectives*, 14(4), 23-48. <https://doi.org/10.1257/jep.14.4.23>
- Buonanno, G., Themistocleous, M., Faverio, P., Pigni, F., Ravarini, A., Sciuto, D., & Tagliavini, M. (2005). Factors affecting ERP system adoption. *Journal of Enterprise Information Management*, 18(4), 384-426. <https://doi.org/10.1108/17410390510609572>
- Canada. (2019). *State of the Canadian Aerospace Industry 2019*.

- Canetta, L., Barni, A., & Montini, E. (2018). *Development of a Digitalization Maturity Model for the manufacturing sector*. 2018 IEEE International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC) (p. 1-7).
- Cao, G., Clarke, S., & Lehaney, B. (1999). Towards systemic management of diversity in organizational change. *Strategic Change*, 8(4), 205-216.
- Cao, G. M., Clarke, S., & Lehaney, B. (2003). Diversity management in organizational change: Towards a systemic framework. *Systems Research and Behavioral Science*, 20(3), 231-242. <https://doi.org/10.1002/sres.530>
- Charalambous, G., Fletcher, S., & Webb, P. (2015). Identifying the key organisational human factors for introducing human-robot collaboration in industry: an exploratory study. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 81(9-12), 2143-2155. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7335-4>
- Charalambous, G., Fletcher, S. R., & Webb, P. (2017). The development of a Human Factors Readiness Level tool for implementing industrial human-robot collaboration. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 91(5-8), 2465-2475. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9876-6>
- Chen, B. T., Wan, J. F., Shu, L., Li, P., Mukherjee, M., & Yin, B. X. (2018). Smart Factory of Industry 4.0: Key Technologies, Application Case, and Challenges. *Ieee Access*, 6, 6505-6519. <https://doi.org/10.1109/Access.2017.2783682>
- Chu, C. H., Chang, C. J., & Cheng, H. C. (2006). Empirical studies on inter-organizational collaborative product development. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 6(2), 179-187. <https://doi.org/10.1115/1.2202870>
- Cimini, C., Boffelli, A., Lagorio, A., Kalchschmidt, M., & Pinto, R. (2020). How do industry 4.0 technologies influence organisational change? An empirical analysis of Italian SMEs. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 32(3), 695-721. <https://doi.org/10.1108/jmtm-04-2019-0135>
- Cisneros-Cabrera, S., Pishchulov, G., Sampaio, P., Mehandjiev, N., Liu, Z. X., & Kununka, S. (2021). An approach and decision support tool for forming Industry 4.0 supply chain collaborations. *Computers in Industry*, 125, 103391. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2020.103391>
- Clegg, S., Killen, C. P., Biesenthal, C., & Sankaran, S. (2018). Practices, projects and portfolios: Current research trends and new directions. *International Journal of Project Management*, 36(5), 762-772. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2018.03.008>
- Cubeles-Marquez, A. (2008). IT project portfolio management: the strategic vision of IT projects. *UPGRADE: The European Journal for the Informatics Professional*, 9(1), 6 pp.
- Culot, G., Orzes, G., & Sartor, M. (2019). Integration and scale in the context of Industry 4.0: the evolving shapes of manufacturing value chains. *IEEE Engineering Management Review*, 47(1), 45-51.

- Danesh, D., Ryan, M. J., & Abbasi, A. (2018). Multi-criteria decision-making methods for project portfolio management: a literature review. *International Journal of Management and Decision Making*, 17(1), 75-94.
- Danjou, C., Rivest, L., & Pellerin, R. (2016). *Industrie 4.0: des pistes pour aborder l'ère du numérique et de la connectivité*. CEFRIO. CEFRIO.
- De Carolis, A., Macchi, M., Kulvatunyoo, B., Brundage, M. P., & Terzi, S. (2017). *Maturity models and tools for enabling smart manufacturing systems: comparison and reflections for future developments*. IFIP International Conference on Product Lifecycle Management (p. 23-35).
- De Carolis, A., Macchi, M., Negri, E., & Terzi, S. (2017). *A maturity model for assessing the digital readiness of manufacturing companies*. IFIP International Conference on Advances in Production Management Systems (p. 13-20).
- de Sousa Jabbour, A. B. L., Jabbour, C. J. C., Foropon, C., & Godinho Filho, M. (2018). When titans meet – Can industry 4.0 revolutionise the environmentally-sustainable manufacturing wave? The role of critical success factors. *Technological Forecasting and Social Change*, 132, 18-25. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2018.01.017>
- Della Corte, V. (2018). Innovation through coopetition: Future directions and new challenges. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, 4(4), 47.
- Demircan Keskin, F. (2019). A two-stage fuzzy approach for Industry 4.0 project portfolio selection within criteria and project interdependencies context. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, 27(1-2), 65-83. <https://doi.org/10.1002/mcda.1691>
- Denolf, J. M., Trienekens, J. H., Wognum, P. M., van der Vorst, J. G. A. J., & Omta, S. W. F. (2015). Towards a framework of critical success factors for implementing supply chain information systems. *Computers in Industry*, 68, 16-26. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2014.12.012>
- Dervin, B. (1998). Sense-making theory and practice: An overview of user interests in knowledge seeking and use. *Journal of knowledge management*.
- Dillinger, F., Bernhard, O., Kagerer, M., & Reinhart, G. (2022). Industry 4.0 implementation sequence for manufacturing companies. *Production Engineering*, 1-14. <https://doi.org/10.1007/s11740-022-01110-5>
- Drossel, W. G., Meinel, F., Bucht, A., & Kunze, H. (2018). Smart materials for smart production - a cross-disciplinary innovation network in the field of smart materials. *15th Global Conference on Sustainable Manufacturing*, 21, 197-204. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.02.111>
- Elenkov, D. S., & Manev, I. M. (2005). Top management leadership and influence on innovation: The role of sociocultural context. *Journal of Management*, 31(3), 381-402. <https://doi.org/10.1177/0149206304272151>
- Erol, S., Jager, A., Hold, P., Ott, K., & Sihm, W. (2016). Tangible Industry 4.0: a scenario-based approach to learning for the future of production. *6th Cirp Conference on Learning Factories*, 54, 13-18. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.03.162>

- Fitzgerald, M., Kruschwitz, N., Bonnet, D., & Welch, M. (2014). Embracing digital technology: A new strategic imperative. *MIT sloan management review*, 55(2), 1.
- Flood, R. L. (1995). *Solving problem solving: A potent force for effective management*. John Wiley & Sons Incorporated.
- Flores-Garcia, E., Bruch, J., Wiktorsson, M., & Jackson, M. (2021). Decision-making approaches in process innovations: an explorative case study. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 32(9), 1-25. <https://doi.org/10.1108/Jmtm-03-2019-0087>
- Foster, M. (1972). An introduction to the theory and practice of action research in work organizations. *Human relations*, 25(6), 529-556.
- Fraga-Lamas, P., Fernandez-Carames, T. M., Blanco-Novoa, O., & Vilar-Montesinos, M. A. (2018). A Review on Industrial Augmented Reality Systems for the Industry 4.0 Shipyard. *IEEE Access*, 6, 13358-13375. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2808326>
- Françoise, O., Bourgault, M., & Pellerin, R. (2009). ERP implementation through critical success factors' management. *Business Process Management Journal*, 15(3), 371-394. <https://doi.org/10.1108/14637150910960620>
- Fraser, K., Harris, H., & Luong, L. (2007). Team-based cellular manufacturing: A review and survey to identify important social factors. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 18(6), 714-730. <https://doi.org/10.1108/17410380710763877>
- Frey, T., & Buxmann, P. (2011). *The importance of governance structures in it project portfolio management*. 19th European Conference on Information Systems - ICT and Sustainable Service Development, ECIS 2011, June 9, 2011 - June 11, 2011, Helsinki, Finland (p. Emerald; et al.; Palgrave Macmillan; Pearson Education; SAP University Alliances; Tieto).
- Frey, T., & Buxmann, P. (2012). *It project portfolio management - A structured literature review*. 20th European Conference on Information Systems, ECIS 2012, June 10, 2012 - June 13, 2012, Barcelona, Spain.
- Gamache, S. (2019). *Stratégie de mise en oeuvre de l'industrie 4.0 dans les petites et moyennes entreprises manufacturières Québécoises*, Université du Québec à Trois-Rivières].
- Gamache, S., Abdul-Nour, G., & Baril, C. (2019/01/01/ 2019). *Development of a Digital Performance Assessment Model for Quebec Manufacturing SMEs* Procedia Manufacturing. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.01.196>
- Gamache, S., Abdalnour, G., & Baril, C. (2017). *Toward industry 4.0: Studies and practices in Quebec smes* 47th International Conference on Computers and Industrial Engineering: How Digital Platforms and Industrial Engineering are Transforming Industry and Services, CIE 2017, Lisbon, Portugal.
- Gamache, S., Abdalnour, G., & Baril, C. (2020). Evaluation of the influence parameters of Industry 4.0 and their impact on the Quebec manufacturing SMEs: The first findings. *Cogent Engineering*, 7(1), 1771818. <https://doi.org/10.1080/23311916.2020.1771818>
- Ganzarain, J., & Errasti, N. (2016). Three stage maturity model in SME's toward industry 4.0. *Journal of Industrial Engineering and Management (JIEM)*, 9(5), 1119-1128.

- García de Soto, B., Agustí-Juan, I., Joss, S., & Hunhevicz, J. (2019). Implications of Construction 4.0 to the workforce and organizational structures. *International Journal of Construction Management*, 22(2), 205-217. <https://doi.org/10.1080/15623599.2019.1616414>
- Gehrke, L., Kühn, A. T., Rule, D., Moore, P., Bellmann, C., Siemes, S., . . . Standley, M. (2015). A discussion of qualifications and skills in the factory of the future: A German and American perspective. *VDI/ASME Industry*, 4, 1-28.
- Georgopoulou, E., Lalas, D., & Papagiannakis, L. (1997). A multicriteria decision aid approach for energy planning problems: The case of renewable energy option. *European Journal of Operational Research*, 103(1), 38-54. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(96\)00263-9](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(96)00263-9)
- Ghadge, A., Kara, M. E., Moradlou, H., & Goswami, M. (2020). The impact of Industry 4.0 implementation on supply chains. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 31(4), 669-686. <https://doi.org/10.1108/Jmtm-10-2019-0368>
- Ghobakhloo, M. (2018). The future of manufacturing industry: a strategic roadmap toward Industry 4.0. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 29(6), 910-936. <https://doi.org/10.1108/Jmtm-02-2018-0057>
- Gleisberg, E., Zondag, H., & Chaudron, M. R. V. (2008). *An empirical study into the state of practice and challenges in IT project portfolio management*. EUROMICRO 2008 - Proceedings of the 34th EUROMICRO Conference on Software Engineering and Advanced Applications, SEAA 2008, September 3, 2008 - September 5, 2008, Parma, Italy (p. 248-257). <https://doi.org/10.1109/SEAA.2008.45>
- Gökalp, E., Şener, U., & Eren, P. E. (2017). *Development of an assessment model for industry 4.0: industry 4.0-MM*. International Conference on Software Process Improvement and Capability Determination (p. 128-142).
- Gölzer, P., & Fritzsche, A. (2017). Data-driven operations management: organisational implications of the digital transformation in industrial practice. *Production Planning & Control*, 28(16), 1332-1343. <https://doi.org/10.1080/09537287.2017.1375148>
- Gupta, M., & Cawthon, G. (1996). Managerial implications of flexible manufacturing for small/medium-sized enterprises. *Technovation*, 16(2), 77-94.
- Halse, L. L., & Ullern, E. F. (2017). *Getting ready for the fourth industrial revolution: innovation in small and medium sized companies*. IFIP WG 5.7 International Conference on Advances in Production Management Systems, APMS 2017, September 3, 2017 - September 7, 2017, Hamburg, Germany (vol. 513, p. 247-254). https://doi.org/10.1007/978-3-319-66923-6_29
- Hansen, L. K., & Kræmmergard, P. (2014). Discourses and Theoretical Assumptions in IT Project Portfolio Management. *International Journal of Information Technology Project Management*, 5(3), 39-66. <https://doi.org/10.4018/ijitpm.2014070103>
- Heberle, A., Lowe, W., Gustafsson, A., & Vorrei, Ö. (2017). Digitalization Canvas - Towards Identifying Digitalization Use Cases and Projects. *Journal of Universal Computer Science*, 23(11), 1070-1097. <https://doi.org/10.3217/jucs-023-11-1070>

- Henriksen, A. D., & Traynor, A. J. (1999). A practical R&D project-selection scoring tool. *Ieee Transactions on Engineering Management*, 46(2), 158-170. <https://doi.org/10.1109/17.759144>
- Hlady-Rispal, M. (2015). Une stratégie de recherche en gestion-L'étude de cas. *Revue française de gestion*, 41(253), 251-266.
- Hornstein, H. A. (2015). The integration of project management and organizational change management is now a necessity. *International Journal of Project Management*, 33(2), 291-298. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2014.08.005>
- Howe, C., & Dumitru, S. (2017). *Quebec Aerospace 2017*. G. B. Reports.
- Hult, M., & Lennung, S. A. (1980). Towards a Definition of Action Research - a Note and Bibliography. *Journal of Management Studies*, 17(2), 241-250. <https://doi.org/DOI.10.1111/j.1467-6486.1980.tb00087.x>
- IGI Global. *What is Maturity Level*. <https://www.igi-global.com/dictionary/maturity-metrics-health-organizations-information/18046>
- Institut de la statistique du Québec. (2012 2012). *Statistiques principales du secteur de la fabrication, pour l'activité manufacturière et l'activité totale, PME et grandes entreprises, par sous-secteur du SCIAN et région administrative, Québec, 2004-2012*. <http://www.stat.gouv.qc.ca/statistiques/secteur-manufacturier/pme/manuf-pme-fabrication-act-tot-2004-2012.html>
- Isikli, E., Yanik, S., Cevikcan, E., & Ustundag, A. (2018). Project Portfolio Selection for the Digital Transformation Era. Dans *Industry 4.0: Managing The Digital Transformation* (p. 105-121). Springer International Publishing.
- Jie, J., Dignum, V., Yao-Hua, T., & Overbeek, S. (2011). *A Context-aware Inter-organizational Collaboration Model Applied to International Trade*. Electronic Government. 10th IFIP WG 8.5 International Conference (EGOV 2011), 28 Aug.-2 Sept. 2011, Berlin, Germany (p. 308-319). https://doi.org/10.1007/978-3-642-22878-0_26
- Johansson, P. E., & Wallo, A. (2019). Exploring the work and competence of interactive researchers. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 31(8), 1539-1559. <https://doi.org/10.1108/jmtm-09-2018-0307>
- Jones, M. D., Hutcheson, S., & Camba, J. D. (2021). Past, present, and future barriers to digital transformation in manufacturing: A review. *Journal of Manufacturing Systems*, 60, 936-948.
- Jung, K., Kulvatunyoo, B., Choi, S., & Brundage, M. P. (2016). *An overview of a smart manufacturing system readiness assessment*. IFIP International Conference on Advances in Production Management Systems (p. 705-712).
- Kaiser, M. G., El Arbi, F., & Ahlemann, F. (2015). Successful project portfolio management beyond project selection techniques: Understanding the role of structural alignment. *International Journal of Project Management*, 33(1), 126-139. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2014.03.002>

- Karasakal, E., & Aker, P. (2017). A multicriteria sorting approach based on data envelopment analysis for R&D project selection problem. *Omega-International Journal of Management Science*, 73, 79-92. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2016.12.006>
- Kazantsev, N., Bogomolova, I., Radyukm, A., & Sukhanova, E. (2018). *Demand-driven collaboration in the aerospace industry 4.0: Application of subject-oriented process management*. 2018 Workshops Subject-Oriented in Digitalization and Community Support, and Work-In-Progress Contributions at S-BPM ONE, SBPM-ONE-WS-WiP 2018, April 5, 2018 - April 6, 2018, Linz, Austria (vol. 2074).
- Khan, A., & Turowski, K. (2016). *A survey of current challenges in manufacturing industry and preparation for industry 4.0*. Proceedings of the First International Scientific Conference "Intelligent Information Technologies for Industry"(IITI'16) (p. 15-26).
- Killen, C. P., Jugdev, K., Drouin, N., & Petit, Y. (2012). Advancing project and portfolio management research: Applying strategic management theories. *International Journal of Project Management*, 30(5), 525-538. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2011.12.004>
- Killen, C. P., & Kjaer, C. (2012). Understanding project interdependencies: The role of visual representation, culture and process. *International Journal of Project Management*, 30(5), 554-566. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2012.01.018>
- Konopik, J., Jahn, C., Schuster, T., Hoßbach, N., & Pflaum, A. (2021). Mastering the digital transformation through organizational capabilities: A conceptual framework. *Digital Business*, 100019.
- Kuehnle, H., & Wagenhaus, G. (4-6 June 2007 2007). *Collaborative innovation in small and medium sized Extended Enterprises*. 2007 IEEE International Technology Management Conference (ICE) (p. 1-8).
- Kundisch, D., & Meier, C. (2011). *IT/IS Project Portfolio Selection in the Presence of Project Interactions-Review and Synthesis of the Literature*. *Wirtschaftsinformatik* (p. 64).
- Labbe, M. (26/08/2021 2021). *Energy consumption of AI poses environmental problems*. <https://www.techtarget.com/searchenterpriseai/feature/Energy-consumption-of-AI-poses-environmental-problems>
- Laforet, S., & Tann, J. (2006). Innovative characteristics of small manufacturing firms. *Journal of Small Business and Enterprise Development*, 13(3), 363-380. <https://doi.org/10.1108/14626000610680253>
- Lavikka, R., Smeds, R., & Jaatinen, M. (2015). A process for building inter-organizational contextual ambidexterity. *Business Process Management Journal*, 21(5), 1140-1161. <https://doi.org/10.1108/Bpmj-12-2013-0153>
- Lawson, C. P., Longhurst, P. J., & Ivey, P. C. (2006). *The application of a new research and development project selection model in SMEs*. Synthesis and Modifications of Nano-Structures Materials by Energetic Ion Beams Proceedings on the Indo German Workshop on synthesis, February 20, 2005 - February 24, 2005 (vol. 26, p. 242-250). <https://doi.org/10.1016/j.technovation.2004.07.017>

- Lazarova-Molnar, S., Mohamed, N., & Al-Jaroodi, J. (2018). *Collaborative data analytics for industry 4.0: challenges, opportunities and models*. 2018 Sixth International Conference on Enterprise Systems (ES), 1-2 Oct. 2018, Los Alamitos, CA, USA (p. 100-107). <https://doi.org/10.1109/ES.2018.00023>
- Leitão, P., Colombo, A. W., & Karnouskos, S. (2016). Industrial automation based on cyber-physical systems technologies: Prototype implementations and challenges. *Computers in Industry*, 81, 11-25. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2015.08.004>
- Levinthal, D., & March, J. G. (1981). A model of adaptive organizational search. *Journal of economic behavior & organization*, 2(4), 307-333.
- Levy, A., & Merry, U. (1986). *Organizational transformation: Approaches, strategies, theories*. Greenwood Publishing Group.
- Levy, M., & Powell, P. (1998). SME flexibility and the role of information systems. *Small Business Economics*, 11(2), 183-196. <https://doi.org/10.1023/A:1007912714741>
- Lewin, K. (2016). Frontiers in Group Dynamics. *Human Relations*, 1(1), 5-41. <https://doi.org/10.1177/001872674700100103>
- Leyh, C., Bley, K., Schäffer, T., & Forstenhäusler, S. (2016). *SIMMI 4.0-a maturity model for classifying the enterprise-wide it and software landscape focusing on Industry 4.0*. 2016 Federated Conference on Computer Science and Information Systems (FedCSIS) (p. 1297-1302).
- Leyh, C., Schaffer, T., Bley, K., & Bay, L. (2017). The Application of the Maturity Model SIMMI 4.0 in Selected Enterprises. *Amcis 2017 Proceedings*. [Go to ISI>://WOS:000560002503047](https://doi.org/10.1007/978-3-319-60002-5_3047)
- Liebrecht, C., Kandler, M., Lang, M., Schaumann, S., Stricker, N., Wuest, T., & Lanza, G. (2021). Decision support for the implementation of Industry 4.0 methods: Toolbox, Assessment and Implementation Sequences for Industry 4.0. *Journal of Manufacturing Systems*, 58, 412-430. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.12.008>
- Linstone, H. A., & Turoff, M. (1975). *The delphi method*. Addison-Wesley Reading, MA.
- Lu, Y. (2017). Industry 4.0: A survey on technologies, applications and open research issues. *Journal of Industrial Information Integration*, 6, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2017.04.005>
- Ludwig, T., Kotthaus, C., Stein, M., Durt, H., Kurz, C., Wenz, J., . . . Wulf, V. (2016). Arbeiten im Mittelstand 4.0 – KMU im Spannungsfeld des digitalen Wandels. *HMD Praxis der Wirtschaftsinformatik*, 53(1), 71-86. <https://doi.org/10.1365/s40702-015-0200-y>
- Majchrzak, A., Markus, M. L., & Wareham, J. (2016). Designing for digital transformation: Lessons for information systems research from the study of ICT and societal challenges. *MIS quarterly*, 40(2), 267-277.
- Maleki, K. (2009). *Méthodes quantitatives de consultation d'experts: Delphi, Delphi public, Abaque de Régnier et impacts croisés*. Editions Publibook.

- Manavalan, E., & Jayakrishna, K. (2019). A review of Internet of Things (IoT) embedded sustainable supply chain for industry 4.0 requirements. *Computers & Industrial Engineering*, 127, 925-953. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.11.030>
- McKinsey Digital. (2015). *Industry 4.0: How to navigate digitization of the manufacturing sector*. McKinsey & Company. M. Company.
- McLaren, T., Head, M., & Yuan, Y. F. (2002). Supply chain collaboration alternatives: understanding the expected costs and benefits. *Internet Research*, 12(4), 348-364. <https://doi.org/10.1108/10662240210438416>
- Meade, L. M., & Presley, A. (2002). R&D project selection using the analytic network process. *Ieee Transactions on Engineering Management*, 49(1), 59-66. <https://doi.org/10.1109/17.985748>
- Miji, D. R. (2017). *Proposal of approach to organizational project management in the process of digital transformation*. 25th Telecommunications Forum, TELFOR 2017, November 21, 2017 - November 22, 2017, Belgrade, Serbia (vol. 2017-January, p. 1-4). <https://doi.org/10.1109/TELFOR.2017.8249278>
- Mitchell, V. W. (1991). The Delphi technique: An exposition and application. *Technology Analysis & Strategic Management*, 3(4), 333-358.
- Mittal, S., Khan, M. A., Purohit, J. K., Menon, K., Romero, D., & Wuest, T. (2019). A smart manufacturing adoption framework for SMEs. *International Journal of Production Research*, 58(5), 1555-1573. <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1661540>
- Mittal, S., Khan, M. A., Romero, D., & Wuest, T. (2018). A critical review of smart manufacturing & Industry 4.0 maturity models: Implications for small and medium-sized enterprises (SMEs). *Journal of Manufacturing Systems*, 49, 194-214. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2018.10.005>
- Mittal, S., Romero, D., & Wuest, T. (2018). *Towards a Smart Manufacturing Maturity Model for SMEs (SM 3 E)*. IFIP International Conference on Advances in Production Management Systems (p. 155-163).
- Modrak, V., Soltysova, Z., & Poklemba, R. (2019). Mapping Requirements and Roadmap Definition for Introducing I 4.0 in SME Environment. Dans *Advances in Manufacturing Engineering and Materials* (p. 183-194). Springer.
- Moeuf, A., Lamouri, S., Pellerin, R., Tamayo-Giraldo, S., Tobon-Valencia, E., & Eburdy, R. (2019). Identification of critical success factors, risks and opportunities of Industry 4.0 in SMEs. *International Journal of Production Research*, 58(5), 1384-1400. <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1636323>
- Moeuf, A., Pellerin, R., Lamouri, S., Tamayo-Giraldo, S., & Barbaray, R. (2018). The industrial management of SMEs in the era of Industry 4.0. *International Journal of Production Research*, 56(3), 1118-1136. <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1372647>
- Mohelska, H., & Sokolova, M. (2018). Management Approaches for Industry 4.0-the Organizational Culture Perspective. *Technological and Economic Development of Economy*, 24(6), 2225-2240. <https://doi.org/10.3846/tede.2018.6397>

- Moica, S., Ganzarain, J., Ibarra, D., & Ferencz, P. (2018). *Change made in shop floor management to transform a conventional production system into an "Industry 4.0": Case studies in SME automotive production manufacturing*. 2018 7th International Conference on Industrial Technology and Management (ICITM) (p. 51-56).
- Morris, T., & Wood, S. (1991). Testing the Survey Method - Continuity and Change in British Industrial-Relations. *Work Employment and Society*, 5(2), 259-282. <https://doi.org/10.1177/0950017091005002007>
- Mueller, E., Chen, X. L., & Riedel, R. (2017). Challenges and Requirements for the Application of Industry 4.0: A Special Insight with the Usage of Cyber-Physical System. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 30(5), 1050-1057. <https://doi.org/10.1007/s10033-017-0164-7>
- Müller, J. M. (2019). Business model innovation in small- and medium-sized enterprises. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 30(8), 1127-1142. <https://doi.org/10.1108/jmtm-01-2018-0008>
- Müller, J. M., Buliga, O., & Voigt, K.-I. (2018). Fortune favors the prepared: How SMEs approach business model innovations in Industry 4.0. *Technological Forecasting and Social Change*, 132, 2-17.
- Müller, J. M., Kiel, D., & Voigt, K.-I. (2018). What Drives the Implementation of Industry 4.0? The Role of Opportunities and Challenges in the Context of Sustainability. *Sustainability*, 10(1), 247. <https://www.mdpi.com/2071-1050/10/1/247>
- Müller, J. M., Veile, J. W., & Voigt, K.-I. (2020). Prerequisites and incentives for digital information sharing in Industry 4.0—An international comparison across data types. *Computers & Industrial Engineering*, 148, 106733.
- Müller, R., Söderland, J., & Jugdev, K. (2012). Critical success factors in projects. *International Journal of Managing Projects in Business*, 5(4), 757-775. <https://doi.org/10.1108/17538371211269040>
- Müller, R., & Turner, R. (2007). The Influence of Project Managers on Project Success Criteria and Project Success by Type of Project. *European Management Journal*, 25(4), 298-309. <https://doi.org/10.1016/j.emj.2007.06.003>
- Nelson, R. R. (2007). IT project management: Infamous failures, classic mistakes, and best practices. *MIS Quarterly executive*, 6(2).
- Nfuka, E. N., & Rusu, L. (2011). The effect of critical success factors on IT governance performance. *Industrial Management & Data Systems*, 111(8-9), 1418-1448. <https://doi.org/10.1108/02635571111182773>
- Orlikowski, W. J. (1996). Improvising organizational transformation over time: A situated change perspective. *Information Systems Research*, 7(1), 63-92. <https://doi.org/10.1287/isre.7.1.63>
- Oztemel, E., & Gursev, S. (2020). Literature review of Industry 4.0 and related technologies. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 31(1), 127-182. <https://doi.org/10.1007/s10845-018-1433-8>

- Pasmore, W. A., & Fagans, M. R. (1992). Participation, Individual Development, and Organizational-Change - a Review and Synthesis. *Journal of Management*, 18(2), 375-397. <https://doi.org/10.1177/014920639201800208>
- Patton, M. Q. (2014). *Qualitative Research & Evaluation Methods, 4th Edition*. Sage Publications; 4th ed. edition.
- Piccarozzi, M., Aquilani, B., & Gatti, C. (2018). Industry 4.0 in Management Studies: A Systematic Literature Review. *Sustainability*, 10(10), 3821. <https://doi.org/10.3390/su10103821>
- Pisching, M. A., Pessoa, M. A. O., Junqueira, F., dos Santos, D. J., & Miyagi, P. E. (2018). An architecture based on RAMI 4.0 to discover equipment to process operations required by products. *Computers & Industrial Engineering*, 125, 574-591. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2017.12.029>
- Pozzi, R., Rossi, T., & Secchi, R. (2021). Industry 4.0 technologies: critical success factors for implementation and improvements in manufacturing companies. *Production Planning & Control*, 1-21. <https://doi.org/10.1080/09537287.2021.1891481>
- Prifling, M. (2010). *IT project portfolio management - A matter of organizational culture?* 14th Pacific Asia Conference on Information Systems, PACIS 2010, July 9, 2010 - July 12, 2010, Taipei, Taiwan (p. 761-772).
- Prifti, L., Knigge, M., Kienegger, H., & Krcmar, H. (2017). *A Competency Model for "Industrie 4.0" Employees*. 13th International Conference on Wirtschaftsinformatik, St. Gallen, Switzerland (p. 46-60).
- Prince, C., Petitjean, C., Benyouci, S., Beaulieu, R., & Nolet, D. (2016). CRIAQ and CARIC: An Innovation Journey-Insights on How to Build Successful Research and Development Collaborations in Aerospace: The Case of the Quebec and Canadian Ecosystems. *Journal of Innovation Management*, 4(2), 6-15.
- Project Management Institute. (2013). *The Standard for Portfolio Management - Third Edition*. Project Management Institute.
- PWC. (2016). *Industry 4.0: Building the digital enterprise*. Price Waterhouse and Coopers. P. W. a. Coopers.
- Raymond, L., & Uwizeyemungu, S. (2007). A profile of ERP adoption in manufacturing SMEs. *Journal of Enterprise Information Management*, 20(4), 487-502. <https://doi.org/10.1108/17410390710772731>
- Reyck, B. D., Grushka-Cockayne, Y., Lockett, M., Calderini, S. R., Moura, M., & Sloper, A. (2005). The impact of project portfolio management on information technology projects. *International Journal of Project Management*, 23(7), 524-537. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2005.02.003>
- Richard, S., Pellerin, R., Bellemare, J., & Perrier, N. (2021). A business process and portfolio management approach for Industry 4.0 transformation. *Business Process Management Journal*, 27(2), 505-528. <https://doi.org/10.1108/bpmj-05-2020-0216>

- Riemens, J., Lemieux, A. A., Lamouri, S., & Garnier, L. (2021). A Delphi-Regnier Study Addressing the Challenges of Textile Recycling in Europe for the Fashion and Apparel Industry. *Sustainability*, 13(21), 11700. <https://doi.org/10.3390/su132111700>
- Robson, C. (2002). *Real world research: A resource for social scientists and practitioner-researchers*. Wiley-Blackwell.
- Rojko, A. (2017). Industry 4.0 concept: Background and overview. *International Journal of Interactive Mobile Technologies*, 11(5).
- Romanelli, E., & Tushman, M. L. (1994). Organizational Transformation as Punctuated Equilibrium - an Empirical-Test. *Academy of Management Journal*, 37(5), 1141-1166. <https://doi.org/10.2307/256669>
- Rosin, F., Forget, P., Lamouri, S., & Pellerin, R. (2022). Enhancing the Decision-Making Process through Industry 4.0 Technologies. *Sustainability*, 14(1), 461. <https://doi.org/10.3390/su14010461>
- Rousseau, D. M. (2006). Is there such a thing as “evidence-based management”? *Academy of management review*, 31(2), 256-269.
- Rowe, G., & Wright, G. (1999). The Delphi technique as a forecasting tool: issues and analysis. *International Journal of Forecasting*, 15(4), 353-375. [https://doi.org/10.1016/S0169-2070\(99\)00018-7](https://doi.org/10.1016/S0169-2070(99)00018-7)
- Rübel, S., Emrich, A., Klein, S., & Loos, P. (2018). *A Maturity Model for Business Model Management in Industry 4.0*. Multikonferenz Wirtschaftsinformatik, Lüneburg, Germany.
- Samaranayake, P., Ramanathan, K., & Laosirihongthong, T. (2017). *Implementing Industry 4.0—A technological readiness perspective*. 2017 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM) (p. 529-533).
- Saunders, M. N., Thornhill, A., & Lewis, P. (2009). *Research methods for business students*, 5th Edition (5th^e éd.). Pearson Education Limited.
- Schröder, C. (2016). The challenges of industry 4.0 for small and medium-sized enterprises. *Friedrich-Ebert-Stiftung: Bonn, Germany*.
- Schuh, G., Potente, T., Wesch-Potente, C., Weber, A. R., & Prote, J. P. (2014). Collaboration Mechanisms to increase Productivity in the Context of Industrie 4.0. *2nd Cirp Robust Manufacturing Conference (Romac 2014)*, 19, 51-56. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.05.016>
- Schumacher, A., Erol, S., & Sihn, W. (2016). A maturity model for assessing Industry 4.0 readiness and maturity of manufacturing enterprises. *Sixth International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production (Carv2016)*, 52, 161-166. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.07.040>
- Schumacher, A., Nemeth, T., & Sihn, W. (2019). Roadmapping towards industrial digitalization based on an Industry 4.0 maturity model for manufacturing enterprises. *12th Cirp Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering*, 79, 409-414. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.02.110>

- Scremin, L., Armellini, F., Brun, A., Solar-Pelletier, L., & Beaudry, C. (2018). Towards a Framework for Assessing the Maturity of Manufacturing Companies in Industry 4.0 Adoption. Dans *Analyzing the Impacts of Industry 4.0 in Modern Business Environments* (p. 224-254). IGI Global.
- Shakhsi-Niaei, M., Torabi, S. A., & Iranmanesh, S. H. (2011). A comprehensive framework for project selection problem under uncertainty and real-world constraints. *Computers & Industrial Engineering*, 61(1), 226-237. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2011.03.015>
- Shannak, R., & M Aldhmour, F. (2009). Grounded Theory as a Methodology for Theory Generation in Information Systems Research. *European Journal of Economics, Finance and Administrative Sciences*, 15(15), 32-50.
- Sheen, D.-P., & Yang, Y. (2018). *Assessment of Readiness for Smart Manufacturing and Innovation in Korea*. 2018 IEEE Technology and Engineering Management Conference (TEMSCON) (p. 1-5).
- Shinohara, A. C., da Silva, E. H. D. R., de Lima, E. P., Deschamps, F., & da Costa, S. E. G. (2017). *Critical Success Factors for Digital Manufacturing Implementation in the Context of Industry 4.0*. IIE Annual Conference. Proceedings, Norcross (p. 199-204).
- Singla, A. R. (2010). Challenges in Enterprise Information Systems Implementation. Dans *Enterprise Information Systems and Implementing IT Infrastructures* (p. 195-209). IGI Global.
- Skulmoski, G. J., Hartman, F. T., & Krahn, J. (2007). The Delphi method for graduate research. *Journal of Information Technology Education: Research*, 6(1), 1-21.
- Smallbone, D., Leig, R., & North, D. (1995). The characteristics and strategies of high growth SMEs. *International Journal of Entrepreneurial Behavior & Research*, 1(3), 44-62. <https://doi.org/10.1108/13552559510100657>
- Solesvik, M. Z. (2008). *Collaboration model for ship design*. Cooperative Design, visualization and Engineering. 5th International Conference, CDVE 2008, 21-25 Sept. 2008, Berlin, Germany (p. 245-248). https://doi.org/10.1007/978-3-540-88011-0_34
- Sony, M. (2018). Industry 4.0 and lean management: a proposed integration model and research propositions. *Production and Manufacturing Research-an Open Access Journal*, 6(1), 416-432. <https://doi.org/10.1080/21693277.2018.1540949>
- Sony, M., & Naik, S. (2019). Critical factors for the successful implementation of Industry 4.0: a review and future research direction. *Production Planning & Control*, 31(10), 799-815. <https://doi.org/10.1080/09537287.2019.1691278>
- Statistique Canada. (06-2016 2015). *Registre des entreprises*. https://www.ic.gc.ca/eic/site/061.nsf/fra/h_03018.html
- Stentoft, J., Jensen, K. W., Philipsen, K., & Haug, A. (2019). *Drivers and barriers for Industry 4.0 readiness and practice: a SME perspective with empirical evidence*. Proceedings of the 52nd Hawaii International Conference on System Sciences.

- Stock, T., & Seliger, G. (2016). Opportunities of Sustainable Manufacturing in Industry 4.0. *13th Global Conference on Sustainable Manufacturing - Decoupling Growth from Resource Use*, 40, 536-541. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.01.129>
- Stonehouse, G., & Pemberton, J. (2002). Strategic planning in SMEs – some empirical findings. *Management Decision*, 40(9), 853-861. <https://doi.org/10.1108/00251740210441072>
- Tantik, E., & Anderl, R. (2017). Integrated data model and structure for the asset administration shell in Industrie 4.0. *Complex Systems Engineering and Development*, 60, 86-91. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.01.048>
- Teece, D. J. (2007). Explicating dynamic capabilities: The nature and microfoundations of (sustainable) enterprise performance. *Strategic Management Journal*, 28(13), 1319-1350. <https://doi.org/10.1002/smj.640>
- Teece, D. J. (2014). The Foundations of Enterprise Performance: Dynamic and Ordinary Capabilities in an (Economic) Theory of Firms. *Academy of Management Perspectives*, 28(4), 328-352. <https://doi.org/10.5465/amp.2013.0116>
- Teece, D. J. (2018). Business models and dynamic capabilities. *Long Range Planning*, 51(1), 40-49. <https://doi.org/10.1016/j.lrp.2017.06.007>
- The Boston Consulting Group. (2015). *Industry 4.0 - The future of productivity and growth in manufacturing industries* [White Paper]. The Boston Consulting Group.
- Thompson, J. D. (2003). *Organizations in Action: Social Science Bases of Administrative Theory (1st ed.)*. Routledge.
- Tortorella, G. L., Vergara, A. M. C., Garza-Reyes, J. A., & Sawhney, R. (2020). Organizational learning paths based upon industry 4.0 adoption: An empirical study with Brazilian manufacturers. *International Journal of Production Economics*, 219, 284-294.
- Unterhofer, M., Rauch, E., Matt, D. T., & Santiteerakul, S. (2018). *Investigation of Assessment and Maturity Stage Models for Assessing the Implementation of Industry 4.0*. 2018 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM) (p. 720-725).
- Ustundag, A., & Cevikcan, E. (2017). *Industry 4.0: managing the digital transformation*. Springer.
- Veile, J. W., Kiel, D., Müller, J. M., & Voigt, K.-I. (2019). Lessons learned from Industry 4.0 implementation in the German manufacturing industry. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 31(5), 977-997. <https://doi.org/10.1108/jmtm-08-2018-0270>
- Vial, G. (2019). Understanding digital transformation: A review and a research agenda. *Journal of Strategic Information Systems*, 28(2), 118-144. <https://doi.org/10.1016/j.jsis.2019.01.003>
- Viharos, Z. J., Soós, S., Nick, G. A., Várgedő, T., & Beregi, R. J. (2017). *Non-comparative, Industry 4.0 readiness evaluation for manufacturing enterprises* 15th IMEKO TC10 Workshop on Technical Diagnostics, Budapest, Hungary.
- Vrchota, J., Rehor, P., Marikova, M., & Pech, M. (2021). Critical Success Factors of the Project Management in Relation to Industry 4.0 for Sustainability of Projects. *Sustainability*, 13(1), 281. <https://doi.org/10.3390/su13010281>

- Wang, H., Wang, G., Wen, X., & Gao, G. (2007). *Business process modeling for multi-enterprise cooperation*. 2007 IEEE International Conference on Automation and Logistics, 18-21 Aug. 2007, Piscataway, NJ, USA (p. 700-703).
- Wank, A., Adolph, S., Anokhin, O., Arndt, A., Anderl, R., & Metternich, J. (2016). Using a learning factory approach to transfer Industrie 4.0 approaches to small-and medium-sized enterprises. *6th Cirp Conference on Learning Factories*, 54, 89-94. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.05.068>
- World Economic Forum. (2019). *Fourth Industrial Revolution: Beacons of Technology and Innovation in Manufacturing*. World Economic Forum.
- Xu, L. D., Xu, E. L., & Li, L. (2018). Industry 4.0: state of the art and future trends. *International Journal of Production Research*, 56(8), 2941-2962. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1444806>
- Xu, X., & He, Y. (2022). Blockchain application in modern logistics information sharing: A review and case study analysis. *Production Planning & Control*, 1-15.
- Yea-Huey, S., Ruey-Shan, G., & Shi-Chung, C. (2004). *Inter-firm collaboration mechanism in process development and product design between foundry and fabless design house*. 2004 Semiconductor Manufacturing Technology Workshop Proceedings, 9-10 Sept. 2004, Piscataway, NJ, USA (p. 47-50).
- Yin, R. K. (2014). *Case study research: design and methods 5th ed*. SAGE Publications.
- Yu, V. F., Kuo, C. W., & Yeh, R. H. (2014). Decision Process Analysis on Project Priority Strategy: A Case Study of an ICT Design Firm. *Journal of Applied Mathematics*, 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/580851>
- Zacharia, Z., Plasch, M., Mohan, U., & Gerschberger, M. (2019). The emerging role of coopetition within inter-firm relationships. *International Journal of Logistics Management*, 30(2), 414-437. <https://doi.org/10.1108/Ijlm-02-2018-0021>
- Zangiacomi, A., Pessot, E., Fornasiero, R., Bertetti, M., & Sacco, M. (2020). Moving towards digitalization: a multiple case study in manufacturing. *Production Planning & Control*, 31(2-3), 143-157. <https://doi.org/10.1080/09537287.2019.1631468>
- Zangiacomi, A., Sacco, M., Pessot, E., De Zan, A., & Bertetti, M. (2018). *A Perspective for the Implementation of a Path Towards the Factory of the Future: The Italian Case*. 2018 IEEE International Conference on Engineering, Technology and Innovation, ICE/ITMC 2018, June 17, 2018 - June 20, 2018, Stuttgart, Germany. <https://doi.org/10.1109/ICE.2018.8436386>
- Zhang, Q., & Yang, S. (2021). Evaluating the sustainability of big data centers using the analytic network process and fuzzy TOPSIS. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(14), 17913-17927. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11443-2>
- Zhang, Q. Y., Vonderembse, M. A., & Lim, J. S. (2003). Manufacturing flexibility: defining and analyzing relationships among competence, capability, and customer satisfaction. *Journal of Operations Management*, 21(2), 173-191. [https://doi.org/10.1016/S0272-6963\(02\)00067-0](https://doi.org/10.1016/S0272-6963(02)00067-0)

- Zhong, R. Y., Xu, X., Klotz, E., & Newman, S. T. (2017). Intelligent Manufacturing in the Context of Industry 4.0: A Review. *Engineering*, 3(5), 616-630. <https://doi.org/10.1016/J.Eng.2017.05.015>
- Zhou, K., Liu, T., & Zhou, L. (2015). Industry 4.0: Towards Future Industrial Opportunities and Challenges. *2015 12th International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (Fskd)*, 2147-2152. <https://doi.org/10.1109/FSKD.2015.7382284>

ANNEXE A QUESTIONNAIRES ET RÉPONSES DELPHI-RÉGNIER

Questionnaire #1

Groupe d'item 1 : "Lors de l'établissement d'une stratégie de transformation numérique, la PME manufacturière doit:"



1.1 : Réviser sa stratégie d'affaires et son modèle d'affaires pour tenir compte des technologies numériques



1.2 : Réviser ses objectifs stratégiques financiers et opérationnels afin d'assurer l'alignement de sa stratégie 4.0 à sa stratégie d'affaires.



1.3 : Identifier les objectifs stratégiques et financiers qui seront supporter par la stratégie de transformation numérique



1.4 : Nommer un champion de la transformation numérique.



1.5 : S'assurer que le champion appartient à la haute direction



1.6 : Valider la stratégie de transformation numérique auprès de l'ensemble de ses départements et unités d'affaires



1.7 : Obtenir un engagement de la part des directeurs et gestionnaires de tous ses départements



1.8 : Communiquer sa vision stratégique de transformation numérique à l'ensemble de ses employés et gestionnaires



1.9 : Définir une vision d'architecture TI permettant de supporter sa transformation numérique.

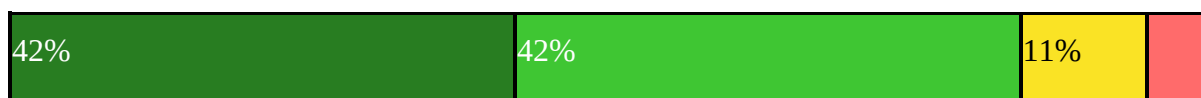
Groupe d'item 2 : "Lors de l'évaluation de la situation actuelle, la PME manufacturière doit:"



2.1 : Effectuer un diagnostic sur la performance de l'ensemble de ses processus d'affaires et technologies



2.2 : Analyser ses infrastructures et de son architecture TI et d'entreprise actuelle



2.3 : Impliquer les gestionnaires et employés de l'entreprise dans cette étape.

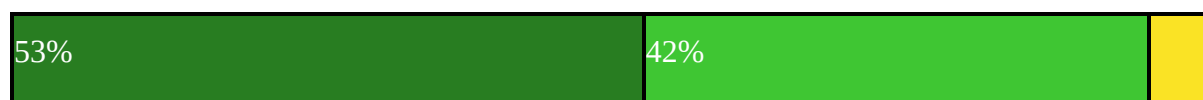


2.4 : Évaluer la capacité de l'entreprise à entreprendre des projets de transformation 4.0

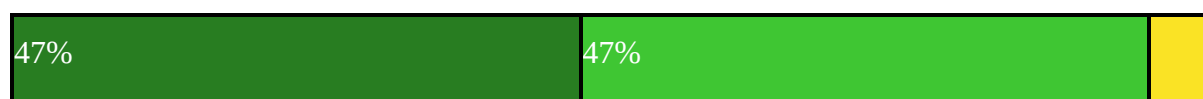
Groupe d'item 3 : "Lors de l'identification de projets 4.0, la PME manufacturière doit:"



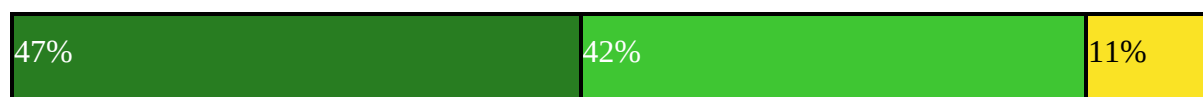
3.1 : Aligner les projets 4.0 avec les objectifs stratégiques 4.0 et de stratégie d'affaire de l'entreprise.



3.2 : Identifier pour chacun des projets 4.0 les changements potentiels d'infrastructure TI à mettre en place pour les supporter.



3.3 : Identifier des projets d'infrastructure et d'architecture TI permettant de supporter sa vision et sa stratégie 4.0.



3.4 : Effectuer une analyse des besoins en ressources et expertises pour chacun des projets 4.0.



3.5 : Définir les objectifs de chacun des projets, leur prérequis technologique, leur échéancier et budget, ainsi que les risques potentiels.



3.6 : Identifier les projets 4.0 permettant de régler des problématiques opérationnelles afin de supporter sa stratégie d'amélioration continue.

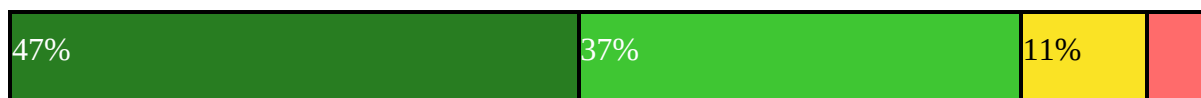
Groupe d'item 4 : "Lors de la priorisation des projets 4.0, la PME manufacturière doit:"



4.1 : Prioriser ses projets 4.0 en tenant compte de la priorité de ses objectifs stratégiques.



4.2 : Prioriser et de séquencer ses projets 4.0 en fonction de leurs prérequis technologiques.



4.3 : Prioriser et séquencer les projets 4.0 en fonction de la capacité de l'entreprise à exécuter ses projets avec succès.



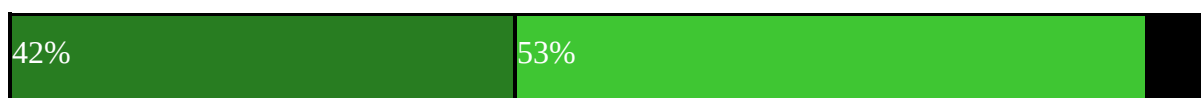
4.4 : Prioriser et séquencer des projets d'infrastructures TI qui permettront d'appuyer des projets 4.0.



4.5 : Valider la séquence et la priorisation des projets 4.0 auprès du champion et de la haute direction de l'entreprise.



4.6 : Communiquer la priorisation et la séquence des projets 4.0 aux gestionnaires et employés de l'entreprise.



4.7 : Former les employés sur les concepts généraux de l'Industrie 4.0 afin de faciliter la gestion du changement.

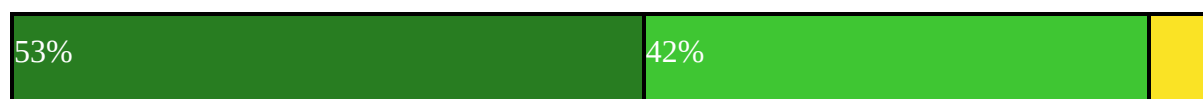
Groupe d'item 5 : "Lors de la mise en place d'une structure de gestion de la transformation 4.0, la PME doit:"



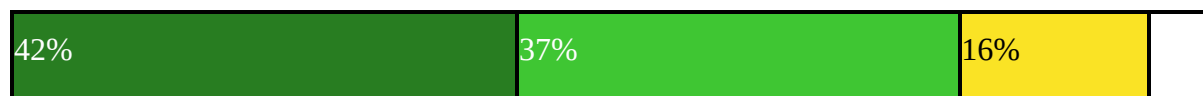
5.1 : Déterminer le niveau d'autorité dont le champion possédera pour assurer la gestion de la transformation 4.0.



5.2 : Mettre en place une gouvernance permettant de faire le suivi des projets et d'escalader les problématiques vers la direction de l'entreprise.



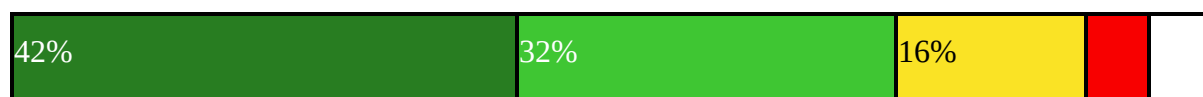
5.3 : Mettre en place un plan de communication aux employés et gestionnaires sur l'avancement de la transformation 4.0 de l'entreprise.



5.4 : Mettre en place un plan de gestion du changement proactif et des processus de changement réactif afin de faciliter la gestion du changement lors de la transformation 4.0.



5.5 : Allouer des ressources pour l'exploration de solution 4.0 et l'étude des projets avant leur réalisation.



5.6 : Aligner la structure et les processus de la transformation 4.0 avec les structures et processus internes de l'entreprise déjà existants.

Groupe d'item 6 : "Lors de la mise en place d'une approche de réalisation des projets 4.0, la PME manufacturière doit:"



6.1 : Désigner un responsable de projet se rapportant au champion afin d'assurer la gestion des projets 4.0.



6.2 : Identifier les parties prenantes des projets 4.0 et de mettre en place un plan de communication avec eux.



6.3 : Inclure une phase de prototypage ou de preuve de concept au début des projets afin de tester les solutions 4.0 avant leur déploiement.



6.4 : Créer un processus de validation des solutions 4.0 avant leur déploiement en entreprise.



6.5 : Désigner et mettre sur pied une équipe en mesure de réaliser les projets 4.0.



6.6 : Embaucher ou sous-traiter les ressources manquantes identifier pour les différents projets 4.0.



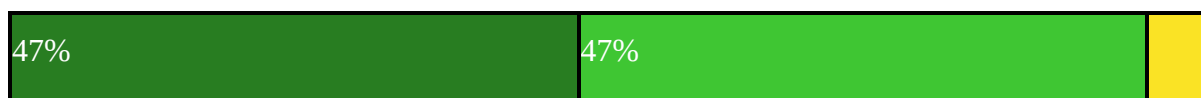
6.7 : Documenter formellement les rôles, les autorités, les responsabilités et les compétences de tous les membres de l'équipe.



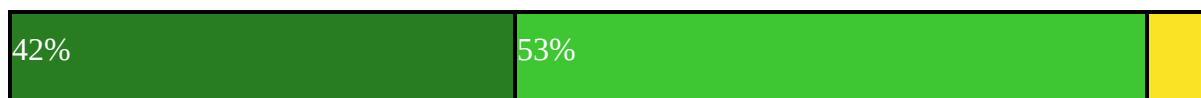
6.8 : Inclure une phase de formation aux employés à chaque projet 4.0 et pour chaque solution 4.0 déployés.



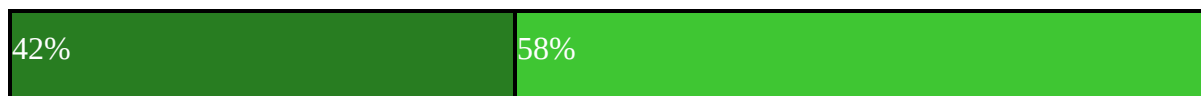
6.9 : Inclure un plan de gestion du changement à l'intérieur de chacun des plans de projet 4.0.



6.10 : Mettre en place les outils et processus de gestion de projet permettant la planification, le suivi et le contrôle des projets 4.0.



6.11 : Mettre en place les outils et processus permettant la gestion des risques identifiés pour chacun des projets.



6.12 : Mettre en place les outils et processus permettant la coordination et la collaboration entre les membres de l'équipe de projet.

Groupe d'item 7 : "Lors de l'exécution des projets 4.0, la PME manufacturière doit:"



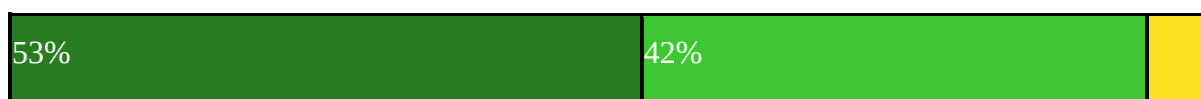
7.1 : Effectuer des suivis réguliers de l'avancement des projets 4.0 auprès du responsable de projet et du champion.



7.2 : Valider les technologies 4.0 sélectionnées auprès des parties prenantes des projets 4.0.



7.3 : Documenter et communiquer les changements apporter aux infrastructures et à l'architecture TI de l'entreprise.



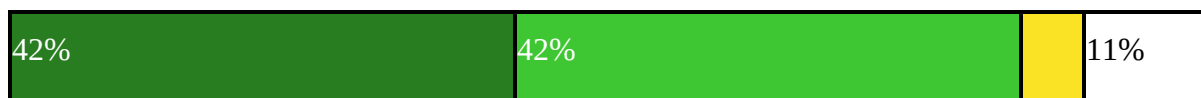
7.4 : Assurer la coordination et la collaboration entre les membres de l'équipe de projet.



7.5 : Créer une documentation et des processus de supports aux technologies 4.0 en déploiement.



7.6 : Former les employés sur les nouvelles technologies et processus découlant des projets 4.0.



7.7 : Ajuster le processus et la documentation de "onboarding" de nouveaux employés pour refléter les changements mis en place en cours de projet.

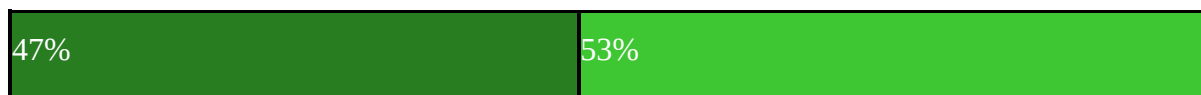


7.8 : Contrôler le budget et les échéanciers des projets 4.0.

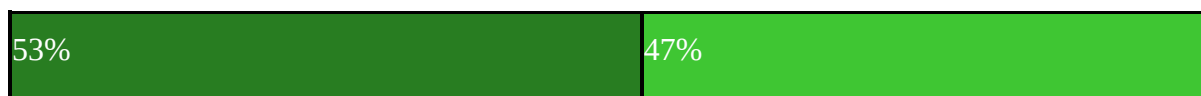


7.9 : Impliquer les employés dans la validation et la mise en place des technologies 4.0.

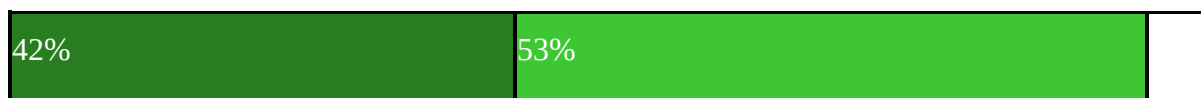
Groupe d'item 8 : "Lors des post-mortem des projets 4.0, la PME manufacturière doit:"



8.1 : Impliquer les parties prenantes des projets 4.0 lors du retour sur les projets.

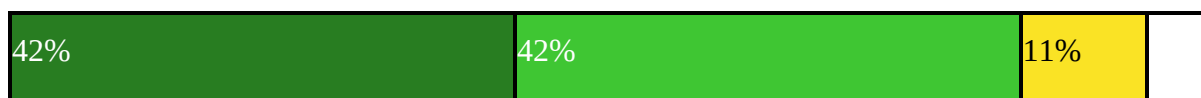


8.2 : Obtenir un retour sur le projet par les employés et les gestionnaires des départements où ont été implanté les technologies



8.3 : Identifier les éléments de la structure de gestion et de l'approche de réalisation qui ont négativement impacté la livraison du projet 4.0.

Groupe d'item 9 : "Lors de la révision de la structure, de l'approche et du portefeuille de projets 4.0, la PME doit:"



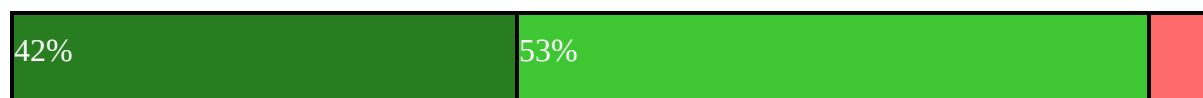
9.1 : Réviser le portefeuille de projet en fonction des gains obtenus des projets réalisés sur les objectifs stratégiques.



9.2 : Réviser le plan de communication en fonction des changements pouvant être apportés aux parties prenantes



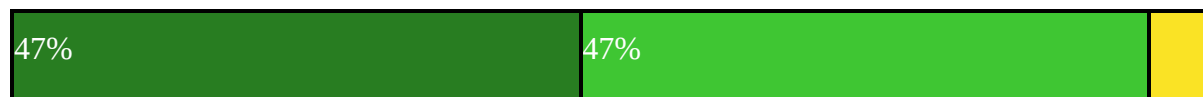
9.3 : Réviser la gouvernance de la transformation en fonction de changement devant être apporté au processus d'escalade et de suivi des projets.



9.4 : Réviser les outils et processus de gestion de projets afin d'améliorer la planification, le suivi et l'exécution des projets



9.5 : Identifier les changements organisationnels à apporter afin de supporter la mise en place des projets 4.0.



9.6 : Encourager les employés à proposer des pistes d'amélioration aux projets 4.0 et à leur gestion.

Groupe d'item 10 : "Lors de la mise en place des révisions, la PME manufacturière doit:"



10.1 : Valider les révisions à la structure et aux approches de réalisation des projets 4.0 auprès des parties prenantes.



10.2 : Valider les changements au portefeuille de projet par la haute direction de l'entreprise.



10.3 : Valider l'alignement du portefeuille de projet révisé avec les objectifs stratégiques de l'entreprise.



10.4 : Former les employés et gestionnaires sur les éléments révisés.



10.5 : Documenter les révisions et les changements organisationnels apportés.

A2. Matrice de distribution des réponses du Questionnaire #1

MATRICE DES ITEMS

Communiquer sa vision stratégique de transformation numérique à l'ensemble de ses employés et gestionnaires					
Former les employés sur les nouvelles technologies et processus découlant des projets 4.0.					
Effectuer des suivis régulier de l'avancement des projets 4.0 auprès du responsable de projet et du champion.					
Obtenir un engagement de la part des directeurs et gestionnaires de tous ses départements					
Aligner les projets 4.0 avec les objectifs stratégiques 4.0 et de stratégie d'affaire de l'entreprise.					
Identifier les parties prenantes des projets 4.0 et de mettre en place un plan de communication avec eux.					
Valider l'alignement du portefeuille de projet révisé avec les objectifs stratégiques de l'entreprise.					
Obtenir un retour sur le projet par les employés et les gestionnaires des départements où ont été implanté les tec...					
Valider la séquence et la priorisation des projets 4.0 auprès du champion et de la haute direction de l'entreprise.					
Contrôler le budget et les échéancier des projets 4.0.					
Mettre en place une gouvernance permettant de faire le suivi des projets et d'escalader les problématiques vers ...					
Assurer la coordination et la collaboration entre les membres de l'équipe de projet.					
Identifier les projets 4.0 permettant de régler des problématiques opérationnelles afin de supporter sa str...					
Identifier pour chacun des projets 4.0 les changements potentiels d'infrastructure TI à mettre en place po...					
Mettre en place un plan de communication aux employés et gestionnaires sur l'avancement de la transformation 4.0 de...					
Identifier les objectifs stratégiques et financiers qui seront supporter par la stratégie de transformation numérique					
Impliquer les parties prenantes des projets 4.0 lors du retour sur les projets.					
Mettre en place les outils et processus permettant la coordination et la collaboration entre les membres de l'équ...					
Mettre en place les outils et processus de gestion de projet permettant la planification, le suivi et le contrôle d...					
Réviser ses objectifs stratégiques financiers et opérationnels afin d'assurer l'alignement de sa stratégie 4...					
Définir les objectifs de chacun des projets, leur pré-requis technologique, leur échéancier et budget, ainsi que les...					
Identifier des projets d'infrastructure et d'architecture TI permettant de supporter sa vision et sa stratégie 4.0.					
Encourager les employés à proposer des pistes d'amélioration aux projets 4.0 et à leur gestion.					

A3. Questionnaire #2

Groupe d'item 1 : "Caractéristiques du Champion de la transformation 4.0"



1.1 : Le champion de la transformation 4.0 joue un rôle informel au sein de la PME manufacturière



1.2 : Le champion de la transformation 4.0 occupe une position officielle au sein de la PME manufacturière



1.3 : Le champion de la transformation 4.0 au sein d'une PME manufacturière doit être le PDG de l'entreprise



1.4 : Le champion de la transformation 4.0 au sein de la PME manufacturière doit être un membre de la haute direction de l'entreprise, mais pas le PDG.



1.5 : Le champion de la transformation 4.0 au sein de la PME manufacturière doit être un gestionnaire qui répond à un membre de la haute direction ou au PDG de l'entreprise.



1.6 : Le champion de la transformation 4.0 est directement responsable d'assurer le succès de la transformation 4.0 de la PME manufacturière.



1.7 : Le champion de la transformation 4.0 joue un rôle de communicateur responsable d'éduquer l'entreprise sur la transformation numérique ainsi que de communiquer l'avancement des projets d'Industrie 4.0.



1.8 : Le champion de la transformation 4.0 est responsable de l'identification des projets de transformation 4.0 dans la PME manufacturière.



1.9 : Le champion de la transformation 4.0 est responsable de la priorisation des projets de transformation 4.0 dans la PME manufacturière.



1.10 : Le champion de la transformation 4.0 est responsable de mettre sur pied une structure de gouvernance permettant le suivi des projets d'Industrie 4.0.



1.11 : Le champion de la transformation 4.0 doit assurer le rôle de gestionnaire des projets 4.0.



1.12 : S'ils ne sont pas la même personne, le gestionnaire de projets 4.0 doit se rapporter hiérarchiquement au champion de la transformation 4.0.



1.13 : Le champion de la transformation 4.0 doit posséder une expérience préalable en transformation numérique.

Groupe d'item 2 : "Capacité de l'entreprise à réaliser ses projets 4.0"



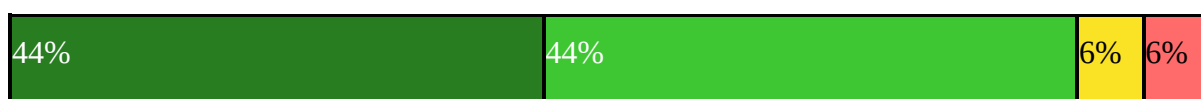
2.1 : Lorsqu'une PME manufacturière évalue sa capacité à réaliser des projets de transformation 4.0, celle-ci doit évaluer ses moyens financiers et déterminer un budget à accorder pour les projets de transformation 4.0



2.2 : Lorsqu'une PME manufacturière évalue sa capacité à réaliser des projets de transformation 4.0, celle-ci doit évaluer la disponibilité et les compétences des ressources internes de l'entreprise qui seront responsables de la mise en place de ces projets



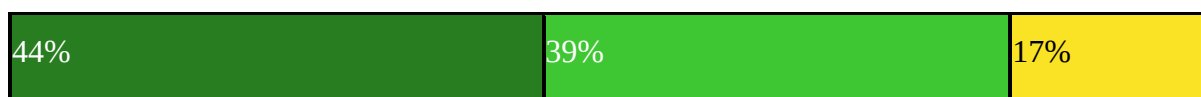
2.3 : Lorsqu'une PME manufacturière évalue sa capacité à réaliser des projets de transformation 4.0, celle-ci doit évaluer comment ses processus et pratiques internes peuvent faciliter ou entraver ses projets de transformation 4.0



2.4 : Lorsqu'une PME manufacturière évalue sa capacité à réaliser des projets de transformation 4.0, celle-ci doit évaluer le niveau d'ouverture et de réticence de ses gestionnaires et employés envers les projets considérés.



2.5 : Une PME manufacturière doit considérer l'ensemble des aides-externes potentiellement disponibles (subvention, consultants, intégrateurs, formateurs, etc.) lorsqu'elle évalue sa capacité à entreprendre sa transformation 4.0.



2.6 : Lorsqu'une PME manufacturière évalue que sa capacité à entreprendre des projets de transformation 4.0 est insuffisante, celle-ci doit identifier des projets (financement, embauche,

changement organisationnel) lui permettant d'obtenir la capacité nécessaire pour réaliser ses projets

4.0.

A4. Matrice de distribution des réponses du Questionnaire #2

MATRICE DES ITEMS

[illegible]

Gestion de la transformation 4.0 en PME manufact ...
version 1

ANNEXE B CERTIFICAT D'APPROBATION D'ÉTHIQUE

POLYTECHNIQUE
MONTREAL

UNIVERSITÉ
D'INGÉNIERIE



CERTIFICAT D'APPROBATION ÉTHIQUE

Montréal, le 13 janvier 2020

M. Jonathan Brodeur
M. Robert Pellerin
Mme Isabelle Deschamps
Département de Mathématiques et génie industriel
Polytechnique Montréal
M. Normand Sauvé, Groupe Meloche Inc.

N/Réf : CÉR-1920-37

Madame, Messieurs,

Le Comité d'éthique de la recherche de Polytechnique Montréal, selon les procédures en vigueur, en vertu des documents qui lui ont été fournis, a examiné le projet de recherche intitulé « **Lancement de la transformation 4.0 en PME manufacturière** » et conclu que le projet de recherche susmentionné répond aux normes en vigueur au chapitre de l'éthique de la recherche énoncées dans la *Politique en matière d'éthique de la recherche avec des êtres humains* de Polytechnique Montréal.

Veillez noter que le présent certificat est valable pour une durée d'un an, soit du **13 janvier 2020 au 12 janvier 2021**, pour le projet tel que qu'approuvé au Comité d'éthique de la recherche avec des êtres humains.

Veillez noter que conformément aux exigences auxquelles l'institution et son personnel sont assujettis afin d'être admissibles aux fonds des organismes subventionnaires, il est de **votre responsabilité de déposer au CÉR un rapport de suivi annuel ou un rapport final avant l'expiration du présent certificat** afin de l'informer de l'avancement de vos travaux.

Il est aussi de votre responsabilité d'informer le CÉR de **toute modification importante** qui pourrait être apportée au protocole expérimental **avant sa mise en œuvre**, de même que de **tout élément ou événement imprévu pouvant avoir une incidence sur le bien-être ou l'intégrité des participantes et participants** impliqué(e)s dans le projet de recherche. Nous vous invitons aussi à nous signaler tout problème susceptible d'avoir une incidence sur les membres de l'équipe de recherche.

Je vous souhaite bonne chance dans la poursuite de vos travaux.

Farida Cheriet, Présidente
Comité d'éthique de la recherche avec des êtres humains

cc : Guillaume Paré (DFR), Justin Carrier

Comité d'éthique de la recherche
avec des êtres humains
Tél.: 514 340-4711 poste : 3755
Fax : 514 340-4992
Courriel : ethique@polymtl.ca

Adresse postale
C.P. 6079, succ. Centre-Ville
Montréal (Québec) Canada H3C 3A7

Campus de l'Université de Montréal
2900, boul. Édouard-Montpetit
2500, chemin de Polytechnique
Montréal (Québec) Canada H3T 1J4