

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

GESTION DE LA COMPLEXITÉ DANS LES PROJETS DE  
L'INDUSTRIE 4.0 ET DE LA TRANSFORMATION NUMÉRIQUE –  
ÉTUDE DE CAS EXPLORATOIRE NOOVELIA

MÉMOIRE PRÉSENTÉ  
COMME EXIGENCE PARTIELLE DE LA  
MAÎTRISE EN GESTION DE PROJET

PAR  
MACKI COULIBALY

MAI 2024

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

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

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

## RÉSUMÉ

L'émergence de l'industrie 4.0 en 2016 représente un défi majeur et complexe aux entreprises manufacturières qui visent le virage numérique et la transformation de leurs organisations, opérations, production, modèles d'affaires et systèmes opératifs. Cette complexité par défaut, imposée par ce nouveau paradigme, est due au besoin d'intégration de différentes technologies numériques émergentes à un modèle classique d'opération qui est majoritairement non-numérique. Ce sujet est d'actualité cependant, il est relativement peu étudié dans la littérature anglophone et surtout francophone, malgré l'importance du tournant numérique et de la complexité qui lui est liée.

La question de recherche est d'explorer et de comprendre les facteurs associés à la complexité dans les projets de l'industrie 4.0 et de ses différentes technologies dans le secteur manufacturier ainsi que d'analyser la complexité associée à la gestion des projets et des programmes et son impact sur la gestion de l'innovation. Plus précisément, cette recherche tente de répondre aux trois objectifs de recherches suivants :

1. Comprendre si l'adoption des technologies de l'industrie 4.0 par les PME manufacturières est faible en raison de leurs complexités élevées.
2. Déterminer si un intermédiaire spécialisé permet, aux PME, de réduire le niveau de complexité lié à l'adoption des technologies de l'industrie 4.0.
3. Identifier le processus de gestion de la complexité dans la gestion de projets de l'industrie 4.0.

Le sujet de recherche est pertinent puisque la recherche est structurée selon trois axes: (1) la complexité dans les projets de création et de développement des technologies 4.0 selon un créateur et un intégrateur de système, (2) la complexité dans la gestion des projets d'intégration de ces technologies afin d'assurer leur interopérabilité au niveau opérationnel et informationnel selon l'intégrateur de systèmes et finalement, (3) la complexité de la gestion des programmes et projets d'installation de ces systèmes et

solutions chez les entreprises manufacturières clientes avec le besoin d'adaptation aux systèmes existants et aux environnements d'opération tout en garantissant la continuité des opérations, l'interopérabilité, la productivité et la performance de ces entreprises en temps réel.

Également, le choix de ce sujet est pertinent, puisque ce sujet est faiblement exploré dans la littérature anglophone et surtout francophone, malgré l'importance du virage numérique et de la complexité associée à celui-ci.

## TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ .....	ii
TABLE DES MATIÈRES .....	iv
LISTE DES TABLEAUX ET DES FIGURES .....	vi
REMERCIEMENTS .....	vii
CHAPITRE 1-INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 2 - REVUE DE LITTÉRATURE .....	5
Gestion de projet; notion de complexité, de risque et d'incertitude; technologies de l'industrie 4.0 .....	6
2.1. <i>Gestion de projet</i> .....	6
2.2 <i>Complexité</i> .....	9
2.3 <i>L'incertitude et le risque</i> .....	15
2.4 <i>Industrie 4.0</i> .....	19
2.4.1 <i>Big data</i> .....	20
2.4.2 <i>Réalité augmentée</i> .....	22
2.4.3 <i>Robots autonomes</i> .....	24
2.4.4 <i>internet des objets</i> .....	25
2.4.5 <i>Fabrication additive</i> .....	27
2.4.6 <i>Cybersécurité</i> .....	29
2.4.7 <i>Simulation virtuelle</i> .....	31
2.4.8 <i>Cloud computing et Cloud manufacturing</i> .....	34
2.4.9 <i>Intégration système</i> .....	36
CHAPITRE 3 : CADRE CONCEPTUEL ET MÉTHODOLOGIE DE RECHERCHE.....	44
3.1 <i>Cadre conceptuel</i> .....	46
3.2 <i>Méthodologie de la recherche</i> .....	47
3.2.1 <i>Exposer les Théories mobilisées</i> .....	47
3.2.2 <i>Approche de l'étude</i> .....	48
3.2.3 <i>Le Design de l'étude</i> .....	50

3.2.4 Critères de sélections.....	50
3.2.5 Triangulation.....	51
3.2.6 Technique et procédures de traitement des données.....	52
3.2.7 Saturation théorique.....	52
<b>CHAPITRE 4 : COLLECTE DE DONNÉES</b> .....	<b>54</b>
Étude du cas de Noovelvia.....	56
4.1 Présentation et diagnostic de l'entreprise.....	56
4.1.1 Description de l'entreprise : Mission, vision, objectifs et valeurs.....	56
4.1.2 Type d'entreprise.....	57
4.2 Les catégories de produits et services.....	57
4.2.1 Les systèmes d'identification et de positionnement de Pluritag.....	57
4.2.2 Les logiciels d'Epsilia.....	58
4.2.3 Solutions de manutention automatisée de Divel.....	59
4.3.4 R&D.....	60
4.3 La description de la chaine de valeur de Noovelvia.....	61
4.4 L'analyse culturelle et la culture d'innovation de Noovelvia.....	66
4.4.1 Centres de développement et de fabrication.....	69
4.6 Les ressources et compétences distinctives et uniques de Noovelvia.....	69
4.7 Gestion de l'innovation et de la technologie.....	70
4.7.1 Sur quoi est basée l'innovation de Noovelvia ?.....	70
4.7.2 Noovelvia est-elle leader/pionnier ou suiveur ?.....	71
4.7.3 Comment se développe et se déroule la commercialisation des produits technologiques et complexes de Noovelvia ?.....	71
4.8 Le modèle d'affaires de Noovelvia.....	73
<b>CHAPITRE 5: ANALYSE DES RÉSULTATS</b> .....	<b>76</b>
5.1 Présentation des résultats.....	77
5.2 Analyse des résultats.....	81
5.2.1 Cadre conceptuel révisé.....	83
5.3 Discussion.....	90
<b>CHAPITRE 6 : CONCLUSIONS</b> .....	<b>92</b>
<b>RÉFÉRENCES</b> .....	<b>96</b>

## LISTE DES TABLEAUX ET DES FIGURES

### Tableaux

Tableau 1 : Observations et données recueillis lors des entrevues .....	78
Tableau 2: Typologie de projet complexe et technologique de l'industrie 4.0 .....	89

### Figures

Figure 1: Domaines de fabrications où la réalité augmentée apporte de la valeur (Fraga-Lamas et al., 2018; Zogopoulos et al., 2017).....	24
Figure 2 : Structure d'un système cyberphysique Keil (2017).....	30
Figure 3 : Le processus de création d'un jumeau numérique (du physique, au virtuel...) (Tao et al., 2018).....	34
Figure 4 : Complexité des technologies de l'industrie 4.0.....	38
Figure 5 : Freins et obstacles à l'implantation des technologies liées à l'usine intelligente (Baromètre industriel québécois, 11e édition, 2020).....	40
Figure 6 : Pourcentage d'intégration de 10 technologies numériques par des PME manufacturières québécoises (Baromètre industriel québécois, 11e édition, 2020).....	41
Figure 7 : Nombre de technologies numériques déjà intégrées (sur une possibilité de 10) par des PME manufacturières québécoises (Baromètre industriel québécois, 11e édition, 2020).....	43
Figure 8 : Cadre conceptuel de la recherche.....	47
Figure 9 : Chaîne de valeur de Noovelvia .....	61
Figure 10 : Organigramme agile de Noovelvia .....	68
Figure 11 : Modèle d'affaires de Noovelvia .....	74
Figure 12 : Cadre conceptuel révisé.....	84
Figure 13 : Les types de projet complexe utilisés par Noovelvia .....	87
Figure 14: Processus d'intermédiation de Noovelvia - adoption des technologies par les PME ...	91
Figure 15 : Gestion de la complexité durant les projets complexes et technologiques de l'industrie 4.0.....	95

## **REMERCIEMENTS**

Hani Sarkis, mon directeur de recherche

## **CHAPITRE 1-INTRODUCTION**

Aujourd'hui, le monde est en perpétuel changement. Les entreprises évoluent donc de plus en plus dans un environnement qui change constamment. En 1995, Genest et Nguyen aussi expriment l'idée que toutes les entreprises évoluent dans un environnement en perpétuel changement, peu importe leur taille. Elles sont soumises à de nombreux phénomènes exogènes qui perturbent le bon fonctionnement de leurs activités planifiées. Face à ce constat, l'adoption de la gestion de projet comme mode de gestion semble plus appropriée pour les entreprises qui souhaitent s'adapter et atteindre leurs objectifs plus facilement. Surtout que la gestion de projet est un domaine plus flexible, transversal et impliquant l'intégration de plusieurs connaissances, technologies, compétences et habiletés.

Ce caractère évolutif de l'environnement peut se refléter par l'apparition de phénomènes difficiles à prévoir et à gérer. Que les sources soient exogènes ou endogènes, l'impact sur la gestion des projets peut se faire ressentir. Il s'agit de phénomènes que l'on peut considérer comme complexes pour le projet et les gestionnaires qui ont en la charge.

De plus, nous vivons une révolution industrielle qui se caractérise par l'essor fulgurant de nouvelles technologies plus performantes les unes que les autres. Cela a lieu dans nos vies quotidiennes ainsi que dans tous les domaines d'activités, à un tel point que les technologies de l'information sont indispensables à la société dans son ensemble. Cela ajoute de la complexité pour les gestionnaires et les PME. À travers nos lectures, nous remarquons que de nombreux auteurs traitent de la notion d'incertitude et de risque lorsqu'il s'agit d'étudier la complexité. De ce fait, nous allons brièvement aborder les notions de risques et d'incertitudes, de sorte à en apprendre davantage sur la notion de complexité liée à l'adoption des technologies de l'industrie 4.0 par les PME.

Dans cette recherche nous cherchons à comprendre, analyser, et identifier la complexité dans les projets de l'industrie 4.0.

La question de recherche est la suivante : quels sont les facteurs associés à la complexité dans les projets de l'industrie 4.0 ?

Nous nous sommes fixé trois objectifs de recherches qui sont les suivants :

1. Comprendre si l'adoption des technologies de l'industrie 4.0 par les PME manufacturières est faible en raison de leurs complexités élevées.
2. Déterminer si un intermédiaire spécialisé permet, aux PME, de réduire le niveau de complexité lié à l'adoption des technologies de l'industrie 4.0.
3. Identifier le processus de gestion de la complexité.

Pour mener à bien ce travail de recherche, cela implique donc une focalisation sur trois piliers essentiels. L'étude de la revue de littérature porte essentiellement sur la gestion de projet; la complexité puis finalement il est très important de faire un état de la revue de littérature en rapport avec les technologies de l'industrie 4.0.

Une méthodologie de recherche qualitative sera privilégiée et cela se fera notamment à travers des entrevues semi-dirigées auprès de personnes clés étant légitimes pour apporter des réponses à nos interrogations. Une étude de cas sera menée dans une entreprise qui s'appelle Noovelia et qui est un fournisseur d'équipement industriel, ayant un mode de fonctionnement basé sur la gestion de projets (technologiques).

La pertinence de notre sujet s'appuie sur l'idée que l'utilisation des technologies de l'industrie 4.0 par les PME permettrait de faciliter la gestion des projets en favorisant l'atteinte des objectifs de manière plus efficiente et efficace. Cependant, la complexité de ces technologies n'incite pas réellement à leur adoption. Cette recherche devra éclairer les lecteurs sur la gestion de la complexité dans les projets de l'industrie 4.0. La recherche devra également mettre en lumière des moyens de réduire cette complexité pour que les PME manufacturières puissent adopter et intégrer les technologies de l'industrie 4.0.

Le chapitre un constitue la partie introductive, ensuite le chapitre deux correspond à la revue de littérature ainsi que l'élaboration du cadre conceptuel. Le chapitre trois nous permettra de préciser la perspective de la recherche en détaillant l'approche méthodologique retenue. Dans le chapitre quatre, nous allons présenter les résultats en discutant sur leur pertinence par rapport à notre objectif de recherche. Finalement, dans le dernier chapitre il sera question de conclure la recherche, notamment en émettant des pistes de réflexion pour les futures recherches. Aussi, nous allons discuter des limites et d'éventuelles contributions.

Cette étude s'intéresse uniquement aux entreprises manufacturières évoluant dans le secteur technologique et fonctionnant avec un mode de gestion par projet.

Après avoir exposé les objectifs de cette étude dans le chapitre introductif, nous allons nous pencher sur le prochain chapitre qui est consacré à la revue de littérature sur la gestion de projet, la notion de complexité et finalement, les technologies de l'industrie 4.0.

## **CHAPITRE 2 - REVUE DE LITTÉRATURE**

## **Gestion de projet; notion de complexité, de risque et d'incertitude; technologies de l'industrie 4.0**

Dans ce chapitre du travail, il s'agit de mettre en lumière l'état de la revue de littérature concernant principalement nos domaines de recherche. En effet, l'étude porte essentiellement sur trois champs de recherche donc :

1. La gestion de projet
2. La notion de complexité
3. Les technologies de l'industrie 4.0.

Après avoir terminé ce chapitre, nous serons en mesure de définir un cadre conceptuel et également nous pourrons exposer la méthodologie de recherche choisie pour mener la recherche afin de répondre totalement ou partiellement aux hypothèses de recherche ainsi qu'à l'objectif de recherche initial.

### ***2.1. Gestion de projet***

La gestion d'un projet revient à évoluer au sein d'un environnement temporaire où l'on connaît au préalable la date de début et de fin du travail à réaliser. L'exécution du travail répond à un besoin spécifique et l'organisation temporaire est mise en place pour une durée limitée liée à un objectif ponctuel, et qui a pour vocation à être dissoute ou transformée une fois l'objectif atteint. En effet, les projets sont conceptualisés comme des organisations temporaires (Lundin et Söderholm, 1995). Le caractère temporaire des organisations temporaires est leur élément crucial et unique caractéristique qui les distingue des autres formes d'organisation, et donc des organisations permanentes (Janowicz-Panjaitan et al., 2009). On peut définir un projet comme une équipe de projet disposant des ressources (matérielles, financières, humaines et informationnelles) nécessaires et d'un temps limité afin de mettre en œuvre les stratégies adéquates pour la réussite du projet avec l'obligation de respecter certains niveaux de qualité prédéfinis. Il

y a évidemment d'autres parties prenantes internes (gestionnaires, autres employés, fondateurs ou fondatrice,) et externes (gouvernement, fournisseur, société civile, actionnaires, clients et créanciers) au projet qui l'impactent ou peuvent l'impacter.

Bredillet (2007) affirme que jusqu'au milieu des années 1980, l'intérêt pour la gestion de projets se limitait à l'ingénierie, la construction, la défense et les technologies de l'information. Depuis le début des années 50, la gestion de projet est considérée comme une « discipline » académique (Cleland & Gareis, 2006, p. 1). Cependant, certains secteurs d'activités tels que la défense et sécurité nationale, l'ingénierie informatique ainsi que les activités de construction de bâtiments et de travaux publics utilisent depuis bien longtemps un mode de fonctionnement qui est identique sinon très similaire à la gestion de projet. En effet, selon Bredillet (1999) et Garel (2003), la gestion de projet est un champ disciplinaire qui se distingue du management ou encore de la gestion des opérations par son histoire et ses dynamiques de définition et d'évolution. D'autres auteurs soutiennent l'idée que la gestion de projet est devenue un processus commercial essentiel pour de nombreuses entreprises, tant au niveau stratégique qu'opérationnel (Perminova et al., 2008).

Selon Frame (1994) et Turner (1999), depuis 60 ans, les organisations utilisent de plus en plus les projets et les programmes pour les aider à atteindre leurs objectifs stratégiques, tout en faisant face à une complexité, une incertitude et une ambiguïté croissantes qui affectent les organisations et l'environnement socio-économique dans lesquelles opèrent (Gareis, 2005). Les sociétés de projet doivent faire face à de nombreux défis aujourd'hui, telles que l'orientation client, l'amélioration continue, le nombre croissant et la complexité des projets ainsi que l'internationalisation entre autres (Perminova et al., 2008). D'après Morris (1997), les organisations, tant publiques que privées, ont entrepris des projets depuis des millénaires, mais ce que nous comprenons comme une gestion moderne des projets et des programmes a été utilisé et développé à partir de la fin des années 1940, sous l'impulsion du développement économique après la Seconde Guerre mondiale et la course aux armements.

Bredillet (2007) indique à travers ses recherches que les projets, en tant que processus stratégiques, modifient les conditions de l'entreprise dans son environnement en y permettant l'allocation des ressources et des compétences nécessaires pour créer un avantage concurrentiel et d'autres sources de valeur. Pollack et Adler (2016, Table, pp. 128-129) soutiennent la même pensée en montrant que l'utilisation de la gestion de projet est associée à la rentabilité des PME. Si l'on se base sur les réflexions de ces nombreux auteurs, il semble que la gestion de projet soit un mode de gestion qui est plus avantageux pour les organisations commerciales. De plus, un grand nombre d'auteurs met en évidence l'idée que la gestion de projet n'est pas un domaine nouveau, mais que sa formalisation en tant que discipline académique et domaine d'activité est assez récente.

La gestion d'un projet implique l'élaboration d'une équipe de projet constitué de personnes ayant des profils variés et des compétences distinctives qui leur permettront de travailler en toute collaboration et confiance afin d'atteindre les objectifs du projet. Évidemment un projet peut également se terminer par un échec et dans ce cas de figure, les objectifs initiaux ne sont pas atteints ou sont partiellement atteints. Plusieurs auteurs s'accordent sur le fait que les projets sont différents, que leur succès peut être jugé de différentes manières et qu'ils peuvent exiger des profils de compétence différents pour leur gestion réussie (Crawford et al., 2005, 2006 ; Shenhar & Dvir, 2004 ; Turner & Müller, 2006). À cet effet, Gareis et Huemann (2007) nous indiquent que le développement de compétences pertinentes à tous les niveaux, individuel, collectif, organisationnel et social, est considéré comme un élément clé pour améliorer les performances. C'est pourquoi les programmes éducatifs et la recherche en gestion de projet ont également connu une croissance rapide au cours des trois dernières décennies pour soutenir le besoin de compétences et le domaine de connaissances sous-jacent (Atkinson, 2006 ; Umpleby, et al., 2004). Ainsi, les compétences (individuelles et organisationnelles) sont à la source de l'avantage concurrentiel et de la création de valeur (Bredillet, 2004 ; De Geus, 1997 ; Stata, 1989).

## ***2.2 Complexité***

Sanders (1998) révèle que, dans la littérature sur la gestion, les sciences de l'organisation et la science de la complexité (le paradigme de la complexité) sont généralement opposées à la science newtonienne (le paradigme de la complication), soulignant la dichotomie et les contradictions entre l' " ancien état d'esprit " et la " nouvelle pensée ". D'ailleurs à cet égard, Genelot (1998) l'explique très bien en écrivant que la complication désigne un empilement et une imbrication de dispositifs de tout ordre dont on peut venir à bout avec du temps et de l'expertise. De plus, la complication est destinée à être contrôlable. À l'inverse, la complexité désigne la multiplicité de facteurs à prendre en compte, l'imprévisibilité et l'émergence. Selon Morin (2005), la complexité est liée à un certain mélange d'ordre et de désordre. Les recherches de Baccarini (1996) ont permis d'identifier la différenciation et l'interdépendance comme étant les deux critères fondamentaux pour mieux comprendre la complexité au sein des organisations. La différenciation étant le nombre d'acteurs et d'intervenants prenant part au projet. Pour ce qui est de l'interdépendance, elle représente tous les liens qui les unissent à travers la gestion du projet. Raison pour laquelle les gestionnaires de projet sont confrontés à un grand niveau de complexité et à différents niveaux.

Selon Daniel et Daniel (2017) , ils sont confrontés à une grande variété de conditions de gestion de projet, et ne peuvent pas vraiment savoir quelle approche de gestion de projet est la mieux adaptée à la complexité de leur projet. Ils poursuivent que les gestionnaires impliqués dans des systèmes complexes doivent faire face à des événements difficiles à prévoir ou à interpréter correctement, même rétrospectivement. Baccarini (1996) et Williams (2002) considèrent que les projets fonctionnent comme des systèmes complexes.

À travers leurs recherches, P.A Daniel et C. Daniel (2017) suggèrent que l'analyse de la littérature sur l'incertitude en gestion de projet révèle des similitudes avec l'analyse de la littérature sur la complexité: les deux littératures sont considérées comme non unifiées,

et chaque concept est susceptible d'être confondu avec l'autre. Ainsi, la complexité définit la structure et la dynamique du projet en tant que système (système de production et système de gestion), et l'incertitude définit les conditions de prise de décision du système de gestion (le gestionnaire en tant que décideur) (P.A Daniel & C. Daniel, 2017). C'est pourquoi l'identification des éléments pertinents de l'incertitude contextuelle au moyen de l'analyse de l'environnement ou d'autres modèles analytiques est une partie importante de la gestion de projet (Nikander & Eloranta, 1997; Youker, 1992), (cité par Perminova, 2008).

Selon Frame (2002) les projets ont toujours été complexes et Williams (1999) ajoute à cela que cette complexité s'accroît avec le temps. D'ailleurs plusieurs auteurs (Maylor et al., 2008 ; Sargut & Mcgrath, 2011) confirment cela en indiquant que les résultats sont imprévisibles en raison d'interactions en constante évolution, même si les conditions de départ peuvent être connues. Selon P.A. Daniel et C. Daniel (2017), la complexité dans les projets est régulièrement associée à l'incertitude, mais ces deux constructions ne sont pas clairement différenciées afin de comprendre leur rôle spécifique dans la théorie de la gestion de projet. Ils ajoutent que la compréhension des modèles mentaux est cruciale dans le sens où la capacité de prédiction de ces modèles de décision définit le niveau d'incertitude que les gestionnaires de projet doivent aborder, et a un impact sur le niveau de complexité du projet dans son ensemble.

Après avoir clarifié la définition du concept de la complexité, comme cela a été fait pour clarifier la notion de projet, il serait intéressant de relever les différentes approches ou les courants de pensée qui ont été déterminés par les principaux chercheurs dans le domaine.

À travers ses recherches, Weaver (1948) indique que les scientifiques ont abordé la complexité de trois manières spécifiques: les problèmes de " simplicité ", les problèmes de " complexité désorganisée " et les problèmes de " complexité organisée ". Selon P.A.

Daniel et C. Daniel (2017), les deux premières approches sont fondamentalement basées sur un paradigme déterministe, considérant que les êtres humains peuvent simplifier la réalité complexe pour la contrôler par la régulation. En revanche, la troisième approche est ancrée dans un paradigme non déterministe, considérant que: les êtres humains sont des agents intrinsèquement subjectifs et incertains quant à leur environnement et leur avenir ; et une organisation globale émerge des interactions des agents locaux (Heylighen et al., 2007).

En effet, à travers leurs recherches, certains auteurs se sont focalisés sur les phénomènes produisant des effets inattendus sur le projet (complexité structurelle). La complexité structurelle se concentre sur les interactions produisant des effets inattendus qui ne peuvent être expliqués ou déduits (Daniel, 2010). Autrement dit, on se concentre plutôt ici sur des événements émanant de l'environnement externe. Tandis que d'autres se sont davantage penchés sur l'identification et la compréhension des processus qui génèrent des changements imprévisibles dans le système. La complexité dynamique se concentre sur les processus qui génèrent des changements imprévisibles dans les systèmes (Floriciel et al., 2016).

D'après Daniel et Daniel (2017), le paradigme déterministe se caractérise essentiellement par trois éléments: une grande importance accordée à la planification ; l'influence du modèle de contrôle cybernétique ; et une faible sensibilité aux influences environnementales. Ce paradigme est fortement dominé par la recherche opérationnelle (Pinto & Winch, 2016), et se concentre sur la rigueur opérationnelle afin d'éviter et d'anticiper les situations complexes. Morris (2010) a contribué de manière significative à l'augmentation des performances de la gestion de projet avec les méthodologies de planification de projet par phase dans les années 1960. PA. Daniel et C. Daniel (2017), à travers leurs recherches, révèlent que dans le paradigme de la planification et du contrôle, le comportement du sous-système de production (identifié comme un phénomène) est caractérisé par la stabilité (soumis uniquement à la variation), et le sous-système de

gestion peut prédire le comportement du sous-système de production grâce à sa répétition (expériences passées).

Selon d'autres auteurs tels que Padalkar<sup>3</sup> et Gopinath (2016b), le paradigme non déterministe a vu le jour en raison de la complexité croissante des projets. Pour essayer de clarifier les effets des événements imprévisibles entraînant des phénomènes de complexité et ayant un impact sur la gestion des projets, Cooke-Davies et al., (2007) ont utilisé les théories des systèmes caractérisées par l'imprévisibilité et l'instabilité (comme la théorie du chaos, les structures dissipatives et les systèmes adaptatifs complexes) pour identifier les aspects théoriques qui devraient être analysés dans la science de la gestion de projet: non-linéarité, émergence, instabilité et imprévisibilité radicale. La recherche non déterministe emploie non seulement la complexité, mais aussi l'incertitude (suivant la définition plus large de la gestion de projet de Turner) comme lentilles principales, mais les deux concepts restent ambigus, empêchant ce paradigme d'avancer (Padalkar & Gopinath, 2016a).

De nombreux auteurs évoquent l'importance des modèles mentaux dans la gestion d'un projet. D'après Senge (1990), les modèles mentaux sont des généralisations (ou même des images) qui influencent la façon dont nous comprenons et agissons dans le monde. De plus, Chermack (2003), Ruona et Lynham (2004) indiquent que ces modèles mentaux sont constamment ajustés, affinés et recréés dans des environnements dynamiques soumis à des changements constants, afin de jouer un rôle important dans la construction et l'interprétation de la réalité. Ce qui permet ainsi de décomplexifier des situations de résolution de problème complexe. Un modèle mental est une structure cognitive qui nous permet de décrire, d'expliquer et de prédire le but, la forme, la fonction et l'état d'un système (Rouse & Morris, 1986); il établit des connaissances causales sur le fonctionnement du système (Moray, 1998). Les modèles mentaux guident, dessinent et fournissent la base à travers laquelle les individus interprètent et construisent le sens de la vie dans les organisations (Weick, 1990). La modélisation des systèmes est un outil

permettant de prendre des décisions dans des conditions d'incertitude, car les décisions peuvent être testées avec des conséquences hypothétiques (Morecroft, 1983). D'ailleurs, Qazi et al., (2016) ont effectué des travaux de recherche récents illustrant la pertinence des approches de modélisation concernant les décideurs pour les projets complexes et incertains. Forrester (1961) et Sterman (2001), grâce à la théorie générale des systèmes, avaient déjà souligné l'importance des modèles mentaux dans la prise de décisions des gestionnaires lorsqu'ils interagissent avec la réalité.

Puisque les modèles mentaux participent à la simplification des prises de décisions en contexte de gestion de la complexité dans les projets. Nous pensons qu'il est judicieux d'expliquer le fonctionnement et l'intérêt des modèles mentaux dans cette partie qui est consacrée à la revue de la littérature sur la complexité.

Grâce à leurs nombreuses recherches en matière de gestion de projet et plus particulièrement celle de la connaissance organisationnelle, Nonaka et Takeuchi sont deux auteurs japonais qui ont largement contribué aux avancées dans ce domaine. Ils se sont longtemps employés à développer des idées allant dans le sens de la rationalisation des connaissances au sein des entreprises. En 1991, Nonaka propose un modèle conceptuel qui représente un cercle vertueux favorisant la création de connaissances au niveau organisationnel et interorganisationnel. Il suggère qu'il y a quatre stades fondamentaux (socialisation, extériorisation, intériorisation et combinaison) qui constituent le processus de création, de diffusion, de rétention et de réutilisation au sein de l'entreprise.

Premièrement, la socialisation permet aux individus d'interagir pour partager des connaissances tacites, notamment à travers leurs expériences. Durant l'extériorisation, des concepts explicites vont émerger à l'issue de discussions et réflexions collectives. Selon Lièvre et al. (2016), il ne s'agit plus d'un transfert direct de connaissances, mais d'un processus de codification qui prend par exemple la forme d'un langage, d'images, ou de modèles qui sont partagés au sein d'un groupe. Ce processus permet de tendre vers une

clarification des connaissances tacites favorisant ainsi la création de connaissances explicites.

Ensuite, une fois que les concepts sont clarifiés, convertis en quelque chose de tangible et concret comme un prototype, un protocole ou un mécanisme opératoire. Cela permet ainsi la construction d'un archétype pertinent. Lièvre et al. (2016) indique que cette étape est comparable à un processus de rationalisation et de dissémination des connaissances codifiées au sein de l'organisation. C'est la combinaison.

Concernant l'intériorisation pour boucler le cercle vertueux, le nouveau concept qui a été créé, codifié et modélisé se déplace vers un nouveau cycle de création de connaissances explicite en connaissances tacites. La mise en pratique des connaissances codifiées facilite l'émergence de connaissances tacites permettant d'amorcer une nouvelle étape de socialisation (Lièvre et al., 2016). Les connaissances tacites sont donc partagées, comprises et ensuite formaliser par tous les membres de l'organisation afin d'obtenir des connaissances explicites qui facilitent le déroulement des activités en réduisant considérablement les phénomènes de complexité et de floues. Cependant, Nonaka et Takeuchi définissent quelques conditions favorisant la création du savoir au sein de l'organisation dont:

1. Une intention organisationnelle définissant le type de connaissances qui doivent être développées et le système de gestion permettant sa mise en œuvre;
2. La diffusion d'idées originales qui émanent d'individus autonomes au sein des équipes;
3. L'adoption de comportement proactif et agile pour créer une rupture des routines, un chaos créatif qui renforce l'engagement subjectif des individus;
4. La mise en œuvre de pratique favorisant la redondance et la circulation d'informations au-delà des exigences opérationnelles immédiates; l'accès rapide à la plus large variété d'informations qu'un individu peut juger nécessaires.

### ***2.3 L'incertitude et le risque***

S'agissant des notions d'incertitude et de risque, comme la complexité, nous pensons qu'elles peuvent représenter des menaces pour le bon fonctionnement d'un projet. Nous avons donc jugé nécessaire d'établir un bref état de la littérature sur le risque et l'incertitude afin de parcourir et exposer les réflexions d'auteurs qui pourront par la suite, nous aider à confirmer ou infirmer notre hypothèse initiale.

Jaafari (2001) voit l'incertitude du projet comme la probabilité que la fonction objective n'atteigne pas la valeur cible prévue, ou comme une probabilité inconnue d'occurrence d'un événement. L'incertitude correspond à des situations où les décideurs ne peuvent pas consolider les observations passées pour former une probabilité subjective ou des fréquences relatives pour le futur, rajoute Davidson (1991). D'après Perminova et al., (2008), tout projet comporte un niveau élevé d'incertitude avec des effets tant positifs que négatifs.

Selon Daniel et Daniel (2017), le projet et son environnement est en perpétuel changement, ce qui souligne l'importance de la réflexion comme moyen d'identifier les dangers et les opportunités potentiels, afin que le choix entre les activités alternatives puisse être fait le plus rapidement possible. Dans certains ouvrages de gestion de projet, le risque est défini comme un événement incertain (Project Institut de gestion, 2000 et 2004). D'ailleurs de nombreux chercheurs (Chapman & Ward, 2003 ; Green, 2001; Jaafari, 2001) clament que la gestion des risques du projet devrait être appelée la gestion de l'incertitude du projet. Selon Perminova et al. (2008), la manière dont les gestionnaires de projet perçoivent l'incertitude dépend de leurs compétences, intuitions et jugements.

En 1921, Frank Knight a établi une distinction entre le risque et l'incertitude. Selon lui, le risque est défini comme une incertitude pour laquelle une probabilité peut être calculée (avec des données historiques par exemple) ou au moins être estimée (en faisant des scénarios de projection) mathématiquement. Formellement, risque = (la probabilité

qu'un certain événement se produise) \*(les conséquences s'il se produit). L'incertitude concerne, par opposition à la notion du risque, des événements non statistiques, qui sont essentiellement uniques ou considérés comme tels. En d'autres termes, les risques sont des événements soumis à une probabilité quantifiable, tandis que l'incertitude fait référence à des événements pour lesquels il est impossible de définir des probabilités numériques. De plus, il associe le risque aux pertes et l'incertitude aux gains potentiels.

L'incertitude est une situation dans laquelle il est impossible de calculer la probabilité du risque. En partant de ce raisonnement, nous pouvons considérer que l'incertitude est une plus grande menace que le risque. Perminova et al. (2008) nous font savoir que la vision traditionnelle de la gestion des risques liés aux projets (ainsi que de la gestion de projet dans son ensemble), souligne l'importance de la planification comme l'une des principales routines, soutenant d'autres activités telles que l'identification, l'analyse, le suivi et le contrôle des risques. C'est la même idée qu'exprime le PM BOOK (2017) en expliquant que les causes ou les conditions du risque proviennent de l'environnement du projet ou de l'organisation, comme les multiples projets en cours, les mauvaises pratiques de gestion, la dépendance à l'égard des participants externes, etc. Atkinson et al. (2006) mettent en garde quant à la confusion qui peut avoir lieu entre le risque et l'incertitude, car cela tend à concentrer l'attention sur la planification et le contrôle opérationnel, au détriment des questions stratégiques.

D'après Perminova et al. (2008), en standardisant et en modularisant les processus et les procédures, en rendant les expériences acquises facilement accessibles au sein de l'équipe du projet, on est mieux préparé à être plus flexible en fonction des différentes situations qui se présentent. Cela étant dit, ils apportent plus de précisions en spécifiant qu'il existe des contraintes et des zones floues que ni le client ni la société de projet n'est en mesure de reconnaître à un stade précoce. De plus, Schrader et al. (1993), indiquent que lors du lancement d'une nouvelle entreprise, les dirigeants en savent souvent très peu, et sont incapables de reconnaître et d'articuler les variables et leurs relations fonctionnelles.

Selon certains auteurs, les gestionnaires ne peuvent pas contrôler tous les éléments susceptibles de générer de l'incertitude et d'autres avancent que les gestionnaires ignorent les sources d'incertitude (Ford & Hegarty, 1984; March, 1981). Perminova et al. (2008) se basent sur les conclusions de Karl Weick pour émettre l'idée que les entreprises peuvent saisir des opportunités à travers les situations d'incertitude en les transformant en effet positif sur le projet. En effet, selon Chapman et Ward (2002), qui a mené plusieurs études dans le domaine de la gestion des risques liés aux projets expliquent que l'incertitude peut avoir des impacts négatifs sur les résultats du projet, comme des changements susceptibles d'apporter de nouvelles opportunités au projet.

Selon Asensio (2017) il y aurait, deux conceptions de l'incertitude qui peuvent être distinguée. Celle qui imprègne la théorie générale, selon laquelle l'avenir ne suit pas des lois de probabilité prédéterminées, à laquelle nous nous référons en termes d'incertitude fondamentale, et l'approche rattachée à Frank Knight mettant en avant la capacité limitée de l'entendement humain à connaître les vraies probabilités. Perminova et al. (2008) indiquent que l'identification et la prescription de moyens permettant aux gestionnaires de réduire ou d'absorber les conséquences négatives de l'incertitude environnementale, a été reconnue comme une variable importante dans l'explication de la stabilité et de la performance organisationnelles.

D'après Perminova et al. (2008), les entreprises gérants des projets deviennent moins flexibles et sont incapables d'accumuler les connaissances ainsi que l'expérience nécessaire pour faire face aux phénomènes d'incertitudes, car des considérations telles que l'amélioration continue, la pensée centrée sur le client, l'apprentissage réfléchi sont souvent laissées de côté.

Selon les écrits de Turner et Crochane (1993) puis Williams (2002), le risque apparaît comme un facteur important de complexité. Or Vidal et Marle (2008) partagent le raisonnement inverse en considérant la complexité comme une source directe ou indirecte

du risque. Que le risque soit une source ou une conséquence de la complexité, il semble bien que le nombre de risques, leur probabilité d'occurrence et leurs impacts sur le projet puissent en effet contribuer à la complexité du projet (Bosch-Rekvelt et al., 2011).

Plusieurs auteurs semblent partager le même point de vue, car premièrement, selon Davies et al. (2006), les chefs de projet peuvent utiliser les expériences acquises au cours d'un projet pour le projet suivant sous la forme de processus et de procédures standardisées et efficaces. Cela permet évidemment de réduire les facteurs de complexité lors de la gestion du projet. Également, Perminova et al. (2008) estiment que la répétitivité de ces procédures, non seulement d'une entreprise à l'autre, mais aussi à différentes étapes du projet, est l'élément central du succès des pratiques de gestion des risques liés aux projets. La planification des procédures (identification, analyse des risques, plan de réponse aux risques puis suivi et contrôle) de réponse aux risques est une partie importante de la garantie qu'il n'y aura pas d'impact négatif sur le résultat du projet (Perminova et al., 2008). Cependant, de nombreux auteurs font remarquer que même si la gestion des risques du projet est souvent considérée comme un processus de cycle de vie (Jaafari, 2001; PMBOOK, 2000; PMBOK, 2004), son application pratique montre que les procédures liées à la prévision de l'avenir ne sont pas répétées à chaque étape du projet (Perminova et al., 2008).

À cette étape de la recherche, nous avons abordé la notion de complexité, de risque, d'incertitude et celle de la gestion de projet. La revue de la littérature existante montre un lien évident entre toutes ces notions confirme l'idée que nous avons eu de les étudier ensemble afin de dégager la de connaissances utiles et pertinentes afin de favoriser la réussite des projets futurs. Cette première partie de la revue de littérature permet d'ores et déjà d'avoir une certaine réflexion concernant notre première hypothèse de recherche. L'industrie 4.0 est le prochain élément que nous devons étudier et cela devrait également nous lancer sur des pistes de réflexion concernant notre première hypothèse.

## 2.4 Industrie 4.0

Dans cette partie du travail, il s'agit de découvrir le paradigme des nouvelles technologies de l'industrie 4.0 dans le contexte de la gestion d'un projet. En effet, malgré les différentes avancées majeures dans le domaine au cours de ces dernières années, il reste encore des éclaircissements à apporter quant aux liens existants entre les nombreuses technologies et leurs utilités dans le monde de la gestion des projets. De plus, on constate que les entreprises manufacturières sont confrontées à des difficultés concernant la mise en place d'outils technologiques qui peuvent, a priori, faciliter leurs activités de production. En effet, les défis actuels de l'industrie manufacturière peuvent être abordés par cette technologie, en traitant la complexité des systèmes, avec des éléments de problèmes incertains qui ne peuvent être résolus avec les modèles mathématiques habituels (Lachenmaier et al., 2017; Zúñiga et al., 2017;).

Peruzzini et al. (2017) soutiennent que l'industrie 4.0 rendra la fabrication intelligente et adaptative en utilisant des systèmes flexibles et collaboratifs pour résoudre les problèmes et prendre les meilleures décisions. Cette révolution a déjà commencé depuis plusieurs années, mais elle s'est fortement accrue durant les 20 dernières années, en se caractérisant, entre autres, par l'addition de 9 composantes essentielles (Gilchrist, 2016; Motyl et al., 2017; Saucedo-Martinez et al., 2017) qui constituent toutes des disciplines technologiques à elles seules, mais dont l'intégration commune correspond à la 4e révolution technologique.

Pour ce faire, J. Tupa et al. (2017) expliquent que les entreprises devraient augmenter le niveau de numérisation, en travaillant ensemble dans des écosystèmes numériques avec les clients et les fournisseurs. Alcácer et Cruz-Machado (2019) expriment l'idée que l'industrie 4.0 change la façon de vivre, créant de nouveaux modèles commerciaux et de nouvelles méthodes de fabrication, renouvelant l'industrie pour ce que l'on appelle la transformation numérique. Ils rajoutent que l'industrie 4.0 peut être considérée comme une production de systèmes cyberphysiques (CPS), basée sur l'intégration de données et

de connaissances hétérogènes et peut être résumée comme un processus de fabrication interopérable, intégré, adapté, optimisé, orienté vers le service, qui est corrélé avec les algorithmes, le Big data (BD) et les hautes technologies telles que l'internet des objets (IoT) et des services (IoS), l'automatisation industrielle, la cybersécurité (CS), le Cloud Computing (CC) ou la robotique intelligente. D'après Rübmann et al. (2015) lors de la transformation numérique concernant l'industrie 4.0, les capteurs, les machines, les pièces et les systèmes informatiques seront connectés tout au long de la chaîne de valeur, au-delà d'une seule entreprise.

Du point de vue de la gestion de la production et des services, l'industrie 4.0 se concentre sur la mise en place de systèmes intelligents et communicants tels que l'interaction machine machine et personne-machine, en traitant le flux de données provenant de l'interaction de systèmes intelligents et distribués (C. Salkin et al., 2018). D'après, Alcácer et Cruz-Machado (2019), la mise en œuvre de l'industrie 4.0 doit être interdisciplinaire, c'est-à-dire qu'elle doit associer étroitement différents domaines d'activités clés.

L'étude du BCG (2015) sur l'avenir de la productivité et la croissance dans les industries manufacturières révèle que l'utilisation croissante des logiciels, de la connectivité et de l'analytique augmentera la demande d'employés ayant des compétences en développement de logiciels et en technologies de l'information, tels que des experts en mécatronique (regroupe plusieurs disciplines d'ingénierie) ayant des compétences en logiciels.

### ***2.4.1 Big data***

L'analytique basée sur de grands ensembles de données n'est apparue que récemment dans le monde de la fabrication, où elle permet d'optimiser la qualité de la production, d'économiser de l'énergie et d'améliorer le service des équipements (BCG, 2015). C'est aussi le même constat que font Tao et al. (2018), lorsqu'ils soutiennent que les méthodes

de conception traditionnelles ne peuvent pas être utilisées directement pour soutenir la conception de produits axée sur les données. Puis ils poursuivent la réflexion dans le même sens en soutenant qu'il faudrait un nouveau cadre capable de faire converger, d'intégrer et de synchroniser efficacement les données de plus en plus "volumineuses" liées au produit virtuel, au produit physique et à leurs interactions réciproques.

D'ailleurs selon plusieurs auteurs (Tao et al., 2018; Yin & Kaynak, 2015), la BD peut fournir une orientation systématique pour les activités de production connexes tout au long du cycle de vie du produit, en assurant un fonctionnement rentable du processus et sans défaut, et en aidant les gestionnaires à prendre des décisions ou à résoudre les problèmes liés à l'exploitation. À cet effet, Babiceanu et Seker (2016) indiquent que la collecte ou le stockage des données caractérisent la BD, mais la caractéristique principale de la BD est l'analyse des données et sans elle, la Big data n'a pas beaucoup de valeur.

Alcácer et Cruz-Machado (2019) indiquent qu'en utilisant le CC par le biais de l'analyse avancée, des méthodes et des outils, les données hors ligne et en temps réel sont analysées et exploitées, par exemple, l'apprentissage automatique, les modèles de prévision, entre autres. Selon Mourtzis et al. (2016), l'analyse avancée de la BD peut être utilisée comme un facilitateur, un identifiant et un facteur pour surmonter les goulots d'étranglement créés par les données générées par l'internet des objets et rajoutent que la personnalisation de masse, qui se concentre sur les besoins des marchés individualisés, repose sur l'analyse BD. De plus, la BD peut aider les fabricants à prendre des décisions plus rationnelles, plus informés et plus réactifs, permettant ainsi de disposer d'un modèle de fabrication plus compétitive sur le marché mondial (Alcácer & Cruz-Machado, 2019). Selon Sen et Ozturk (2016) le CC et la BD sont considérées comme une pièce de monnaie à deux faces: La BD est considérée comme l'application absorbante de la CC, tandis que la CC fournit l'infrastructure informatique de la BD. Pour une performance optimale de l'Ido et de l'internet industriel des objets, les entreprises manufacturières doivent obligatoirement avoir recours à la BD. En ce sens, Tao et al. (2018) confirment, à travers

leurs recherches sur la notion de jumeaux numériques, que les piliers technologiques de la conception de produits axée sur les données sont l'IdO et l'analyse de big data. Dans le contexte de l'industrie 4.0, la collecte et l'évaluation complète de données provenant de nombreuses sources différentes (équipements et systèmes de production, systèmes de gestion des entreprises et des clients) deviendront la norme pour soutenir la prise de décision en temps réel (BCG, 2015).

### ***2.4.2 Réalité augmentée***

C'est la même idée que partagent d'une part, Syberfeldt et al. (2015), puis Brewster et al. (2016) lorsqu'ils expliquent que la technologie de la RA permet d'augmenter la perception de la réalité par l'opérateur en utilisant des informations artificielles sur l'environnement, où le monde réel est rempli par ses objets. Ils définissent les caractéristiques des systèmes de RA comme suit: 1) la capacité de combiner des objets réels et virtuels dans un environnement réel, 2) la capacité d'aligner entre eux les objets réels et virtuels, et 3) la capacité de fonctionner de manière interactive, en 3D et en temps réel. Horřejší (2015) aussi confirme que le principe de la RA consiste en la combinaison de deux scénarios: 1) la réalité traitée numériquement et 2) des objets artificiels ajoutés numériquement, qui peuvent être des objets plats en 2D ou, selon d'autres définitions, ne considérer que les objets en 3D dans la scène.

Les éléments essentiels d'un système de RA utilisent des dispositifs électroniques pour visualiser directement ou indirectement une combinaison du monde réel avec des éléments virtuels (Alcácer & Cruz-Machado, 2019). Il existe plusieurs dispositifs de visualisation, dont les écrans (téléphone intelligent, tablette électronique, ordinateur, télévision), les casques holographiques, lunettes transparentes.

Selon Rentzos et al. (2013), l'utilisation de la RA peut aider à combler certaines lacunes, par exemple entre le développement de produits et les opérations de fabrication, grâce à la capacité de reproduire et de réutiliser des informations et des connaissances

numériques en même temps que les opérations d'assemblage. Elle améliore les performances humaines dans l'exécution des tâches de maintenance technique et aide à la prise de décision en matière de maintenance. C'est une technologie qui est complémentaire à la simulation (Erkoyuncu et al., 2018).

En tant que technologie en pleine évolution, l'utilisation de la RA s'est récemment étendue à différents domaines de la fabrication (Vlachou et al., 2017). Elle est par exemple très utile pour les phases de prototypage. Les technologies de RV sont de plus en plus utilisées pour soutenir le prototypage virtuel et la conception de produits (Stark et al., 2010).

Selon Roy et al. (2018), la technologie de la RA peut être utilisée dans plusieurs secteurs, tels que les loisirs, le marketing, le tourisme, la chirurgie, la logistique, la fabrication, la maintenance, etc.

Les systèmes basés sur la réalité augmentée prennent en charge toute une série de services, tels que la sélection de pièces dans un entrepôt et l'envoi d'instructions de réparation sur des appareils mobiles (BCG, 2015). Rentzos et al. (2013) voient l'utilisation de la RA dans les processus de fabrication en matière de simulation, d'assistance et de guidage comme une technologie efficace pour résoudre les problèmes. L'objectif de la RA est d'améliorer les performances humaines en fournissant les informations nécessaires à une tâche spécifique donnée (Palmarini et al., 2017). D'ailleurs, Fraga-Lamas et al. (2018) ont fait remarquer que la RA permettait de supprimer la plupart des tâches administratives, car elle fournit aux utilisateurs, des informations dynamiques en temps réel.

Cette figure montre les tâches les plus pertinentes liées aux environnements industriels et aux domaines de fabrication où la RA apporte de la valeur (Fraga-Lamas et al., 2018; Zogopoulos et al., 2017).

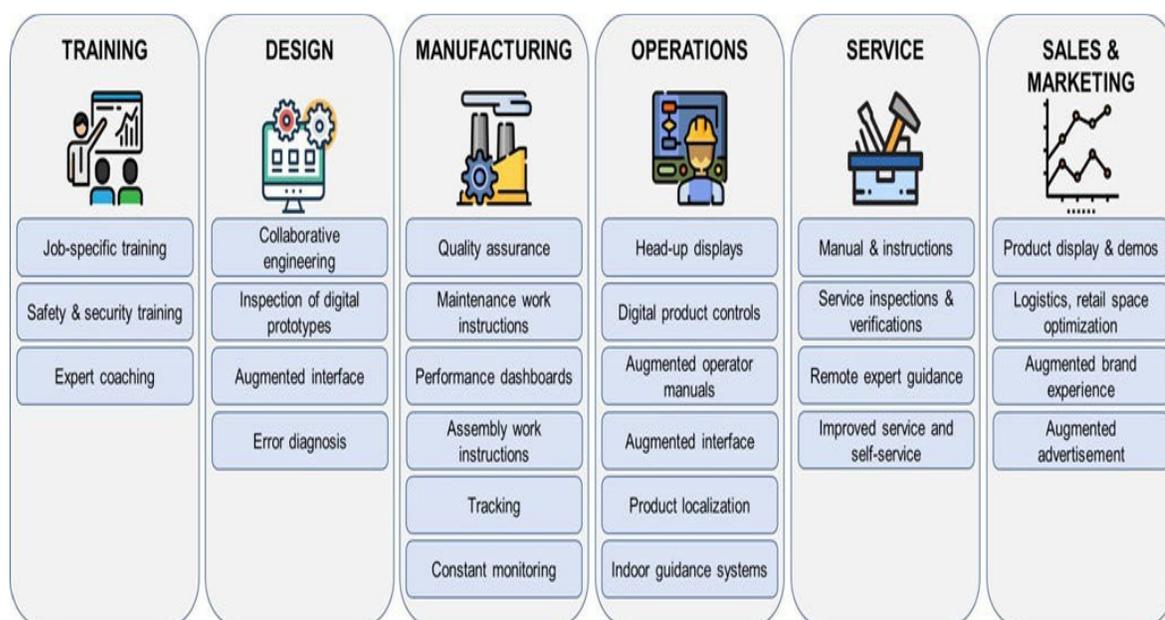


Figure 1: Domaines de fabrications où la réalité augmentée apporte de la valeur (Fraga-Lamas et al., 2018; Zogopoulos et al., 2017)

### 2.4.3 Robots autonomes

Au cours de leurs travaux, Pedersen et al. (2016) indiquent qu'actuellement, les robots sont essentiels dans les systèmes de production afin d'atteindre le niveau de flexibilité requis. Les processus tels que le développement de produits, la fabrication et les phases d'assemblage sont des processus pour lesquels les robots adaptatifs sont très utiles dans les systèmes de fabrication d'après Salkin et al. (2018). Selon une étude du BCG (2015), les robots sont de plus en plus utiles, autonomes, flexibles et coopératifs.

Le paradigme de la production évolue rapidement de la production de masse vers la production personnalisée, ce qui nécessite des robots, par exemple, en tant que technologie d'automatisation reconfigurable (Alcácer & Cruz-Machado, 2019). Ensuite, ils apportent

plus de précision en développant l'idée que cette tendance conduit à l'adaptation de la production à une plus grande variation de produits, en se concentrant idéalement sur la taille d'un lot. Selon Rüßmann et al. (2015), à terme, ils interagiront les uns avec les autres, travailleront en toute sécurité aux côtés des humains et apprendront d'eux. Ce qui est déjà une possibilité aujourd'hui.

En effet, les robots autonomes coûteront moins cher et auront un éventail de capacités plus large que ceux utilisés aujourd'hui dans l'industrie manufacturière (BCG, 2015). Les robots dotés d'IA adaptatives et flexibles peuvent faciliter la fabrication de différents produits et, par conséquent, réduire les coûts de production, soulignent Salkin et al. (2018).

En effet, cela laisse place au développement d'un nouveau type de robot spécifiquement conçu pour communiquer avec les humains dans les lieux de conception et fabrication. Ils sont appelés les cobots. Selon plusieurs auteurs (Makrini et al., 2018; Weiss & Huber, 2016;), les cobots sont une catégorie de robots spécialement conçus pour interagir directement et physiquement avec les humains, dans le cadre d'une coopération étroite. En effet discutant de l'amélioration de la collaboration humains-machines, Rüßmann et al. (2015) indiquent que le robot recevra la directive de percer un trou à un certain endroit, sélectionnera le bon outil et déterminera comment atteindre cet objectif plutôt que de recevoir des instructions précises pour faire tourner ses différents segments de bras. En poursuivant sa directive plus objective, il peut interagir avec d'autres robots pour coordonner les mouvements de leurs bras respectifs afin de maximiser la production globale. Il pourrait également travailler côte à côte avec des humains.

#### ***2.4.4 internet des objets***

Bortolini et al. (2017) mettent en avant l'idée que l'internet des objets correspond à la présence omniprésente, dans un but commun, de diverses choses ou objets qui interagissent et coopèrent entre eux, en numérisant tous les systèmes physiques. Choi et Chung (2017) confirment par leurs écrits que l'internet des objets peut être réalisé grâce à

la RFID connectée, aux réseaux de capteurs sans fil (WSN), aux intergiciels, au CC, aux logiciels d'application de l'IdO et aux réseaux définis par logiciel (SDN), qui sont les principales technologies habilitantes. Taaoua et al. (2018) affirment que grâce à l'internet des objets (IoT), les données sont directement collectées à partir de produits intelligents, transmis au "nuage" en temps réel et analysés à l'aide de l'analyse des données massives.

La connexion d'un plus grand nombre de dispositifs physiques à l'internet et l'utilisation d'une génération de nouvelles technologies permettent de créer des opportunités de création de valeur pour les industries à l'ère de l'internet de tout, soulignent Alcácer & Cruz-Machado, 2019. En effet Sezer (2018), affirment que l'internet des objets permet aux personnes et aux objets d'être connectés à tout moment, en tout lieu, et avec des moyens de communication variés. Selon Hu et al. (2014) le développement de systèmes et de techniques intégrés fournit une technologie permettant de mettre en œuvre l'accès intégré intelligent des dispositifs physiques.

Selon Ning et al. (2006), le développement rapide de l'internet des objets (IoT) peut non seulement réaliser l'interconnexion des informations traditionnelles, mais aussi promouvoir l'interconnexion des informations physiques avec le soutien de la technologie embarquée et de la technologie RFID, ce qui offre la possibilité de construire une plateforme complète de partage des ressources de fabrication interconnectée (Kumar et al., 2011; Xu, 2011a, b). D'après Alcácer et Cruz-Machado (2019), on peut interpréter l'internet des objets comme un système global desservant des utilisateurs du monde entier grâce à des réseaux informatiques interconnectés utilisant la combinaison standard du protocole internet (TCP/IP).

Contrairement aux utilisateurs de l'IdO, l'internet industriel des objets (IIoT), qui concerne les environnements industriels nécessitant une disponibilité des données en temps réel et une fiabilité élevée, est la connexion de produits industriels tels que des composants ou des machines à l'internet, précisent Andulkar et al., (2018). Selon Peruzzini

et al. (2017), pour différents objectifs, les informations numérisées peuvent être utilisées pour ajuster les modèles de production à l'aide d'une copie virtuelle du monde physique et des données des capteurs. D'après Alcácer et Cruz-Machado (2019), en tant qu'évolution naturelle de l'internet des objets, il peut être considéré comme la connectivité et l'interaction des objets créant des services de valeur et constitue l'une des bases de l'usine intelligente.

#### ***2.4.5 Fabrication additive***

D'après Alcácer et V.Cruz-Machado (2019), la fabrication additive est une technologie habilitante qui contribue à la création de nouveaux produits, de nouvelles activités commerciales et de nouveaux services. En effet, d'après Zhang et al. (2014), il existe des défis actuels à la promotion et l'application du modèle de réseau de fabrication dont : la difficulté à partager davantage de ressources et de capacités de fabrication dans un éventail plus large, la favorisation des transactions et de la circulation des ressources et des capacités de fabrication disponible à la demande. Selon Kim et al. (2018), le paradigme de la fabrication additive est de plus en plus développé et permet d'apporter à l'industrie réelle des applications très pertinentes.

De plus, Chong et al. (2018) indiquent que les technologies de la fabrication additive peuvent également être désignées par d'autres synonymes tels que prototypage rapide, fabrication de formes libres solides, fabrication par couches, fabrication numérique ou impression 3D. L'innovation en matière de produits et de services nécessite un travail de recherche et de développement long et difficile, ce que permet l'industrie 4.0 avec les nouvelles technologies telles que la simulation via la réalité virtuelle (Alcácer & V.Cruz-Machado, 2019). Alcácer et Cruz-Machado (2019) rajoutent qu'avec la fabrication additive, il est possible de créer des prototypes pour permettre l'indépendance des éléments de la chaîne de valeur et, par conséquent, de réduire le temps du processus de conception et de fabrication.

Lin et al. (2018) la définissent comme un processus de création d'un objet 3D basé sur le dépôt de matériaux couche par couche ou goutte par goutte sous un système contrôlé par ordinateur. Certains avantages potentiels de la FA peuvent être résumés comme suit (Bose et al., 2018):

1. Fabrication de pièces directement à partir de fichiers de données CAO (pièces finales ou quasi finales avec un traitement supplémentaire minimal ou nul) ;
2. Une plus grande personnalisation sans outillage supplémentaire ni coût de fabrication;
3. Fabrication de géométries complexes (certaines géométries ne peuvent pas être réalisées par des procédés conventionnels, sinon, elles sont réalisées en les divisant en plusieurs parties) ;
4. Fabrication de pièces creuses (pour réduire le poids) ou de structures en treillis ;
5. Maximisation de l'utilisation des matériaux pour l'approche "zéro déchet" ;
6. Une empreinte opérationnelle plus petite pour la fabrication d'une grande variété de pièces ;
7. Fabrication à la demande et excellente évolutivité.

Selon Shin et al. (2016), le flux de travail de la FA comprend la conception de la géométrie, le développement d'outils de calcul et d'interfaces, la conception des matériaux, la modélisation des processus et les outils de contrôle, et il a également été question des domaines d'application de la FA tels que la nanoéchelle (biofabrication), la microéchelle (électronique), la macro-échelle (produits personnels, automobile) et la grande échelle (architecture et construction, aérospatiale et défense). La FA serait donc très utile dans tous les domaines et les aspects de l'industrie manufacturière. D'autres auteurs en sont arrivés aux mêmes conclusions. Puisqu'au cours de leurs travaux, Chang et al. (2018) ont discuté de nouveaux procédés tels que l'impression 3D et mettent en lumière les opportunités qu'offrent la fabrication additive à l'échelle micro/nano, la bio- impression (fabrication additive de biomatériaux) et l'impression 4D (combinaison de l'AM avec des matériaux intelligents (sensibles aux stimuli qui changent leur forme ou leurs propriétés

fonctionnelles) pour fabriquer à haute résolution des caractéristiques 3D complexes, en multimatériaux ou multifonctionnalités.

De plus, Rüßmann et al. (2015), soulèvent également un autre point saillant dans le contexte de l'industrie 4.0 et ils indiquent que ces méthodes de fabrication additive seront largement utilisées pour produire de petits lots de produits personnalisés qui offrent des avantages en matière de construction, comme des conceptions complexes et légères. Puis ils font remarquer un tout autre avantage et non des moindres pour les entreprises, car les systèmes de fabrication additive performants et décentralisés permettront de réduire les distances de transport et les stocks disponibles. Favorisant ainsi une utilisation optimale des ressources.

D'après Kim et al. (2018), dans un avenir proche, la technologie de fabrication additive s'étendra finalement à des domaines technologiques très avancés et remplacera les technologies actuelles.

#### ***2.4.6 Cybersécurité***

Pour comprendre les enjeux de la cybersécurité, il faut au préalable, définir ce que l'on entend par les systèmes cyberphysiques (SCP). Plusieurs auteurs tels que Jazdi (2014) d'abord, puis Bocciarelli et al. (2017) ont exprimé le même point de vue au sujet de la description du modèle des SCP, car ils le considèrent tous comme une unité de contrôle avec un ou plusieurs microcontrôleurs, contrôlant des capteurs et des actionneurs qui interagissent avec le monde réel et traitent les données collectées.

Selon Monostori et al. (2016), les SCP représentent les derniers développements significatifs des technologies de l'information et de la communication (TIC) et de l'informatique. Ils ajoutent également que les SCP ont le potentiel de changer notre vie avec des concepts qui ont déjà émergé comme, la chirurgie robotique, les voitures autonomes, les bâtiments intelligents, la fabrication intelligente, le réseau électrique

intelligent et les dispositifs médicaux implantés. Quant à Tao et al. (2018), ils définissent la cybernétique comme des concepts de contrôle et de communication dans les organismes vivants, les machines et les organisations, y compris l'auto-organisation. Alcácer et Cruz-Machado (2019) apportent une définition plus globale des SCP en les définissant comme des éléments ou des machines dotées d'une intelligence accrue et de la capacité de communiquer entre eux afin de participer à la planification de tâches uniques ou non répétitives.

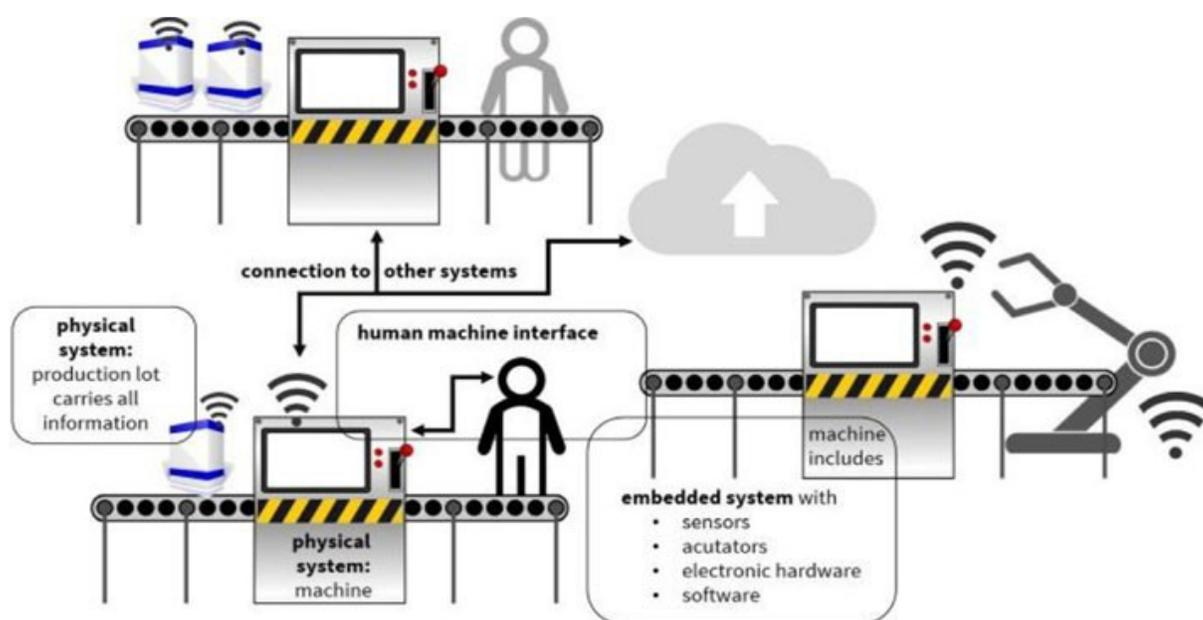


Figure 2 : Structure d'un système cyberphysique Keil (2017)

Dans ses recherches, Keil (2017) s'est particulièrement intéressé à la conception du SCP en rapport avec la fabrication des semi-conducteurs. C'est dans cette démarche qu'il propose une représentation schématique du SCP comme étant un système embarqué intégré dans des systèmes physiques tels que des lots de production ou des machines.

Il est possible que plusieurs SCP soient reliés au sein d'un même réseau numérique et dans ce cas ils forment un système de production cyberphysique (SPCP), Keil (2017),

basé sur des sous-systèmes et des éléments autonomes et coopératifs reliés à tous les niveaux de production (Monostori et al. 2016).

Piedrahita et al. (2018) soulignent que la cybersécurité est une technologie basée sur la protection, la détection et la réponse aux attaques. Kannus et Ilvonen (2018) ont défini la cybersécurité comme un nouveau terme pour un niveau élevé de sécurité de l'information, et par le mot "cyber", il s'étend pour s'appliquer également aux environnements industriels et à l'Iio.

L'IdO, les environnements virtuels, l'accès à distance, les données stockées sur des systèmes en nuage, etc., sont autant de possibilités ouvertes qui représentent de nouvelles vulnérabilités croissantes conduisant à une compromission des informations pour les personnes et les entreprises (Alcácer et Cruz-Machado, 2019). Ils apportent plus de précisions en expliquant que les attaques directes de personnes ou de logiciels malveillants peuvent mettre en péril les systèmes de contrôle industriel (SCI). Cela se traduit par une menace pouvant fortement perturber le fonctionnement de la gestion des projets, surtout dans le contexte de l'industrie manufacturière.

#### ***2.4.7 Simulation virtuelle***

Concernant la simulation virtuelle, Alcácer et Cruz-Machado (2019) révèlent à travers leurs recherches que la modélisation par simulation est une méthode qui utilise des modèles réels, des modèles de systèmes imaginaires ou des modèles de processus imaginaires. Selon Rüßmann et al. (2015) les technologies de simulations de l'industrie 4.0 exploiteront des données en temps réel pour reproduire le monde physique dans un modèle virtuel qui peut inclure des machines, des produits et des personnes. La simulation virtuelle est également un bon outil technologique pour les projets de constructions. Caggiano et Teti (2018) nous confortent dans cette idée en expliquant que les technologies basées sur la simulation jouent un rôle essentiel dans l'approche de l'usine numérique, en

permettant l'expérimentation et la validation de différents modèles de systèmes de fabrication, de processus et de produits.

Rodic<sup>˘</sup> (2017) définit la simulation comme un outil technologique indispensable et puissant, permettant de mieux comprendre la dynamique des systèmes commerciaux. La simulation permet de réaliser des expériences pour valider la conception et la configuration de produits, de processus ou de systèmes, d'après Mourtzis et al. (2014).

Les technologies de simulation sont rendues possibles, notamment grâce à la notion de jumeaux numériques (Digital Twin Manufacturing), qui a été proposée par Glaesseggen et Stargel en 2012. Dès 2003, Grieves avait effectué une présentation sur le cycle de vie des produits. À travers leurs recherches, ils soutiennent que ce concept se caractérise par des interactions bidirectionnelles entre le monde numérique et le monde physique. Ensuite, ils présentent quelques avantages comme le fait que cela permet de rendre le produit physique plus "intelligent" pour ajuster activement son comportement en temps réel en fonction des "recommandations" faites par le produit virtuel. De plus, le produit virtuel peut être rendu plus "factuel" pour refléter avec précision l'état réel du produit physique. Cela constitue un énorme avantage qui est de nature à diminuer le degré de complexité, d'incertitude et de risque associé par exemple au développement d'un produit. Selon Tao et al. (2018), l'application des technologies de jumeaux numériques permet de refléter l'ensemble du processus du cycle de vie, ainsi que simuler, surveiller, diagnostiquer, prévoir et contrôler l'état et les comportements des entités physiques correspondantes.

Plusieurs auteurs ont utilisé la notion de jumeau numérique pour diverses applications. Tuegel et al. (2011) ont utilisé un jumeau numérique pour prédire la durée de vie structurée d'un avion en réingénierie (Tuegel et al. 2011). Seshadri et Krishnamurthy (2017) quant à eux, ont proposé une méthode de caractérisation des dommages basée sur le jumeau numérique pour la gestion de la santé structurale des avions. Cela a permis de démontrer une grande avancée dans la prédiction de l'emplacement, de la taille et de

l'orientation des dommages (Seshadri & Krishnamurthy, 2017). Gockel et al. (2012) ont proposé la méthode Airframe Digital Twin (ADT) pour évaluer l'état de vol, ce qui permet de détecter les dommages ultérieurs en temps réel (Gockel et al., 2012). Outre les avions, General Electric s'intéresse à l'utilisation du jumeau numérique pour prévoir la santé des produits au cours de leur cycle de vie, ce qui peut rendre les opérations et la maintenance plus précises. Dans l'industrie automobile, grâce à ce modèle virtuel du "jumeau numérique", les constructeurs peuvent améliorer leur service après-vente, offrir une gamme de nouveaux services et générer des informations qui peuvent être utilisées pour optimiser la conception des futures voitures (Rüßmann et al., 2015).

Selon Mourtzis et al. (2015), si le système informatique est intégré à la simulation en ligne, par exemple, il est possible d'estimer le comportement futur du produit et d'émuler ou de déterminer le contrôle logique du système de fabrication. D'après Cedeño et al. (2018) la simulation en temps réel, en ligne, peut analyser le comportement de l'utilisateur et du système en quelques millisecondes, permettant à l'utilisateur de développer et de produire "virtuellement" un prototype pour le produit ou le service. Ici, les différents auteurs soulignent l'avantage de l'utilisation d'un système de simulation virtuelle en ligne.

Mourtzis et al. (2015) apportent plus de précisions à ce sujet en faisant une distinction entre les modèles statiques pour modéliser une structure sans activité et les modèles dynamiques pour étudier le comportement d'un système évoluant dans le temps. Shao et al. (2014) rajoutent que la vision de l'usine virtuelle prend en compte les modèles de simulation d'usines réelles validées pour générer des données et pour travailler dans des formats correspondant aux conditions d'une usine réelle. Le concept de jumeau numérique qui a été proposé par B. Rodić (2017) étend la simulation à toutes les phases du cycle de vie des produits, en combinant des données réelles avec des modèles de simulation pour de meilleures performances en matière de productivité et de maintenance sur la base de données réalistes. Ainsi, grâce à la technologie des jumeaux numériques, les concepteurs peuvent créer des scénarios de simulation vivants, appliquer efficacement des tests de

simulation aux prototypes et prédire de manière aussi précise que possible les performances réelles des produits physiques (Tao et al., 2018).

### 2.4.8 Cloud computing et Cloud manufacturing

Selon Wang et al. (2017), les systèmes de Cloud manufacturing constituent un tout nouveau type de service en nuage, basé sur une architecture orientée services (SoA) dans l'environnement en nuage qui fournit des capacités de fabrication. Il correspond au IaaS du système de Cloud Computing. De plus, selon Alcácer et Cruz-Machado (2019), une solution telle que le Cloud Manufacturing permet aux utilisateurs de demander des services à toutes les étapes du cycle de vie d'un produit, de la conception à la fabrication, en passant par la gestion, etc. Wang et al. (2017) insistent sur le fait que la version manufacturière du Cloud Computing correspond à l'utilisation directe d'applications en nuage dans l'industrie manufacturière. Par conséquent, les données et les fonctionnalités des machines seront de plus en plus déployées dans le nuage, ce qui permettra d'offrir aux systèmes de production des services davantage axés sur les données (BCG, 2015).

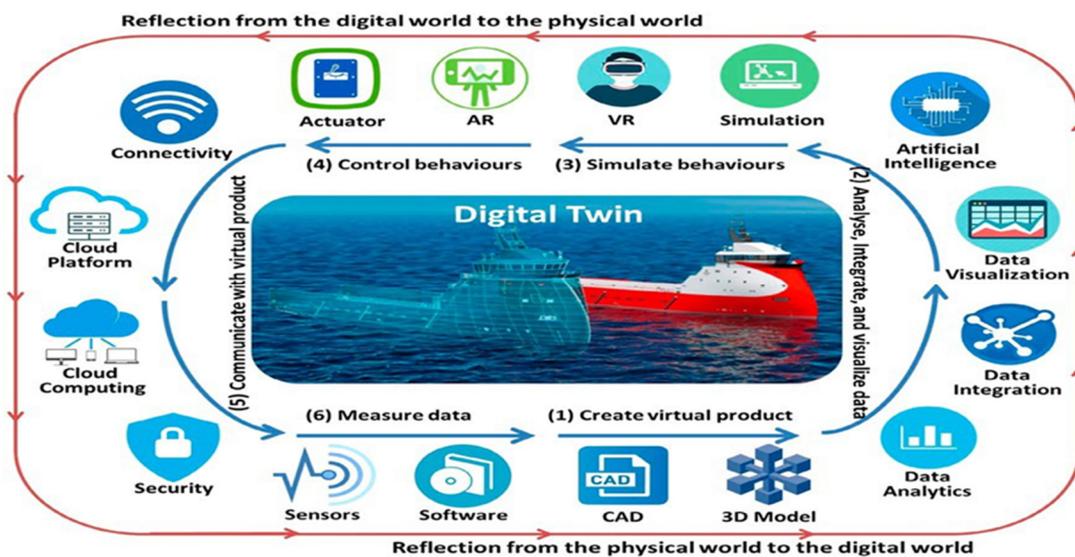


Figure 3 : Le processus de création d'un jumeau numérique (du physique, au virtuel...) (Tao et al., 2018)

C'est un modèle essentiellement basé sur le partage d'information, mais surtout de connaissance, par exemple, les modèles, les normes, les protocoles, les règles et les algorithmes en tant que connaissances, indispensables dans de nombreux processus et activités au sein des services du cycle de vie entier comme la génération de services, la gestion de services et les applications de services (Liu et al., 2018). Kassim et al., (2017) puis Rüßmann et al., (2015) expliquent que les organisations utilisent déjà des logiciels basés sur le cloud pour certaines applications utilisées en entreprise à des fins d'analyse par exemple, mais avec l'industrie 4.0, davantage d'entreprises liées à la production nécessiteront un partage accru des données entre les sites et les frontières de l'entreprise.

Les organisations ont tout de suite vu l'avantage, car le Cloud leur permet entre autres de réduire la complexité de la gestion des systèmes informatiques en privilégiant l'utilisation des ressources humaines pour les tâches à forte valeur ajoutée.

En ce sens, Alcácer et Cruz-Machado (2019) affirment que le cloud manufacturing peut fournir sous forme de service des solutions évolutives, flexibles et rentables avec des coûts de maintenance et des supports réduits. Également, Zhang et al. (2014) notent de nombreux manquements dans les modèles de fabrication actuels. Ils évoquent entre autres, le manque d'architecture ouverte et flexible, de normes et de spécifications communes, de mécanismes opérationnels efficaces soutenant la circulation et la coopération dynamiques des ressources puis une insuffisance relative aux capacités et aux solutions de sécurité fiables.

Tout au long du cycle de vie du produit, à des fins de partage, les fournisseurs publient des ressources de fabrication sur la plateforme CMfg et reçoivent également des tâches de fabrication de la plateforme en nuage (Alcácer & V.Cruz-Machado, 2019).

### ***2.4.9 Intégration système***

S'agissant de l'intégration de système dans le contexte de l'industrie 4.0, on distingue principalement deux types d'intégration et selon Salkin et al. (2018), le partage des données en temps réel est rendu possible par ces deux types.

Concernant de l'intégration verticale, elle concerne l'intégration intraentreprise qui consiste à mettre en place des systèmes et des pratiques pour renforcer l'intégration des différentes fonctions d'une société, notamment à travers une forte intégration de l'ensemble des systèmes d'information. Piazzolo et al. (2015) indiquent que l'intégration verticale est un système de fabrication en réseau. Selon Pérez-Lara et al. (2017), les fonctions principales de l'entreprise telle que l'ingénierie, la production, le marketing, les fournisseurs et les opérations de la chaîne d'approvisionnement, doivent être connecté en créant un scénario collaboratif d'intégration des systèmes, en fonction du flux d'informations et en considérant les niveaux d'automatisation.

Plusieurs auteurs (Tupa et al., 2017; Piazzolo et al., 2015) affirment que l'intégration verticale est la pierre angulaire de l'échange d'informations et de la collaboration entre les différents niveaux de la hiérarchie de l'entreprise, tels que la planification d'entreprise, la programmation de la production ou la gestion. L'intégration verticale numérise tous les processus au sein de l'organisation entière, en tenant compte de toutes les données des processus de fabrication, par exemple, la gestion de la qualité, l'efficacité des processus ou la planification des opérations qui sont disponibles en temps réel (Alcácer et Cruz-Machado, 2019). Salkin et al. (2018) révèlent également que l'intégration verticale permet la transformation en usine intelligente d'une manière flexible et de haut niveau, en fournissant la production de petits lots et de produits personnalisés.

D'après Suri et al. (2017), l'intégration interentreprises correspond à l'intégration horizontale et constitue la base d'une collaboration étroite et de hauts niveaux entre plusieurs entreprises, utilisant des systèmes d'information pour enrichir le cycle de vie

des produits (Salkin et al., 2018). Cependant, Suri et al. (2017) rappellent qu'une plateforme indépendante est nécessaire pour assurer l'interopérabilité du développement de ces systèmes, sur la base de normes industrielles, permettant l'échange de données ou d'informations. Cela pourrait être considéré comme un frein à l'implantation de technologies d'intégrations de système horizontales puisque les entreprises doivent prendre en compte l'interopérabilité des systèmes d'informations de chaque entreprise.

Selon Posada et al. (2015), la portée de l'intégration numérique de bout en bout consiste à combler les écarts entre la conception et la fabrication du produit et le client. Ce, depuis l'acquisition de la matière première, en passant par l'utilisation du produit jusqu'à sa fin de vie (Alcácer & Cruz- Machado, 2019). Stock et Seliger (2016) apportent des précisions en expliquant que la phase de fin de vie du produit comprend la réutilisation, la refabrication, la récupération et l'élimination, le recyclage ainsi que le transport entre toutes les phases. Selon Rüßmann et al. (2015), avec l'industrie 4.0, les entreprises, les départements, les fonctions et les capacités deviendront beaucoup plus cohérents, à mesure que les réseaux d'intégration des données universelles et interentreprises évolueront et permettront la mise en place de chaînes de valeur véritablement automatisées.

Nous pensons que pour cette recherche, l'intégration de système représente une technologie et une dimension clé à prendre en compte en ce qui concerne la complexité dans la gestion des projets de l'industrie 4.0. L'interopérabilité des systèmes de gestion et de fabrication dans les entreprises et entre elles représente le nœud gordien de la résolution des phénomènes de complexités en lien avec l'adoption des technologies de l'industrie 4.0 par les PME.

L'illustration ci-dessous représente parfaitement la situation de complexité qui s'impose aux PME manufacturières, lorsqu'il s'agit de réfléchir à l'intégration et l'adoption des technologies de l'industrie 4.0. Cette image illustre l'ensemble des



Comme nous avons pu le voir au cours de cette section dédiée à la revue de la littérature sur l'industrie 4.0, elle regroupe des technologies assez complexes prises individuellement, mais de nombreux auteurs expriment l'idée que ces technologies une fois intégrées permettent de favoriser l'efficacité et l'efficience des processus de gestion et de production. Cependant, il existe d'autres freins à l'implantation des technologies de l'industrie 4.0 et nous allons exposer quelques illustrations qui révèlent la nature des autres barrières limitantes. Nous considérons que toutes les autres barrières qui sont mises en lumière ci-dessous, représentent dans leur totalité, une complexité faisons office de freins à l'intégration de ces technologies au sein de leurs systèmes de gestions et productions.

Les illustrations suivantes viennent confirmer la pertinence de notre étude qui s'articule principalement autour de la difficulté qu'éprouvent les PME manufacturières à intégrer et adopter les technologies de l'industrie 4.0 en raison de leurs complexités accrues.

Au cours de l'établissement de notre revue de littérature, nous avons trouvé une illustration qui représente les principaux freins à l'implantation des technologies liées à l'usine intelligente, dans le contexte des PME manufacturières québécoises.

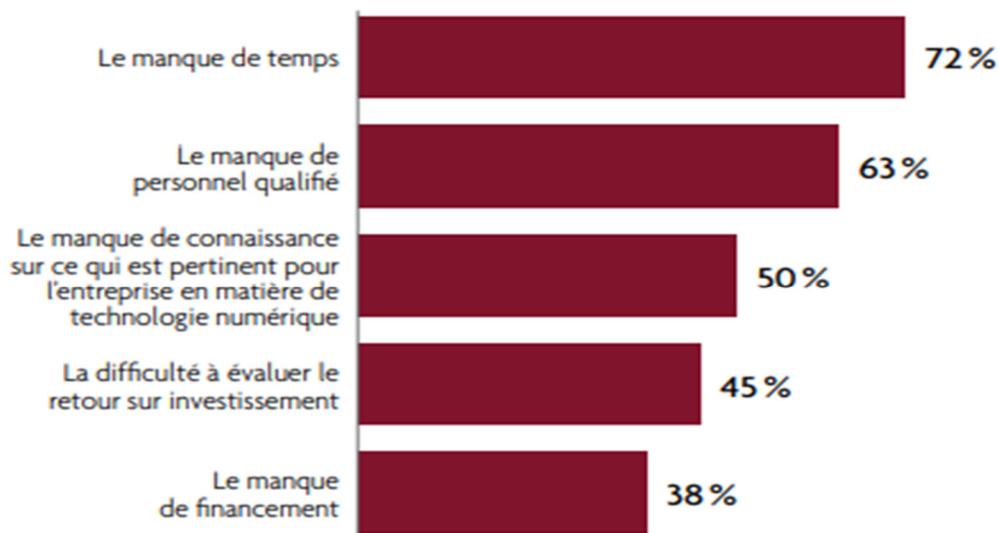


Figure 5 : Freins et obstacles à l'implantation des technologies liées à l'usine intelligente (Baromètre industriel québécois, 11e édition, 2020)

L'étude du Baromètre industriel québécois (2020) précise qu'il n'y a pas de différence significative selon la taille de l'entreprise. Tant pour les plus petites, les moyennes, que pour les plus grandes entreprises, le manque de temps et le manque de personnel qualifié sont les deux freins les plus importants et le manque de financement est le frein le moins important. L'ensemble de ses freins et obstacles se manifeste par de la complexité pour les entreprises.

Certaines entreprises ont sauté le pas et ont opté pour une stratégie d'implantation incrémentale et graduelle des technologies liées à l'usine intelligente. Dans le cadre de leur étude, le Baromètre industriel québécois (2020) s'est penché sur l'intégration de 10 technologies numériques par les PME manufacturières québécoises. D'après les informations recueillies à la suite de leurs sondages, les résultats indiquent que le degré d'intégration varie beaucoup d'une technologie à l'autre. (Ainsi, 30 % des entreprises répondantes ont déjà intégré la surveillance et le contrôle en temps réel; environ un quart d'entre elles ont intégré la maintenance prédictive (27 %), l'interconnexion des

équipements (24 %), l'interconnexion avec les clients et/ou fournisseurs (24 %) et la robotique (24 %).

À l'opposé, peu d'entreprises ont intégré certaines technologies comme le configurateur de produits en ligne pour les clients (12 %) et la prise de décision autonome par les systèmes TI (7 %). Bien que certaines de ces technologies ne s'appliquent pas à toutes les entreprises, force est de constater qu'il reste beaucoup à réaliser dans le processus de transformation numérique.

Par ailleurs, nous pouvons constater qu'un pourcentage très variable d'entreprises, allant de 7 % (impression 3D/fabrication additive) à 25 % (surveillance et contrôle en temps réel), mentionnent qu'elles prévoient intégrer certaines technologies numériques d'ici un an. Il faut cependant considérer avec réserve ces données. Il s'agit en effet d'une intention qui ne se concrétisera pas nécessairement à court terme.

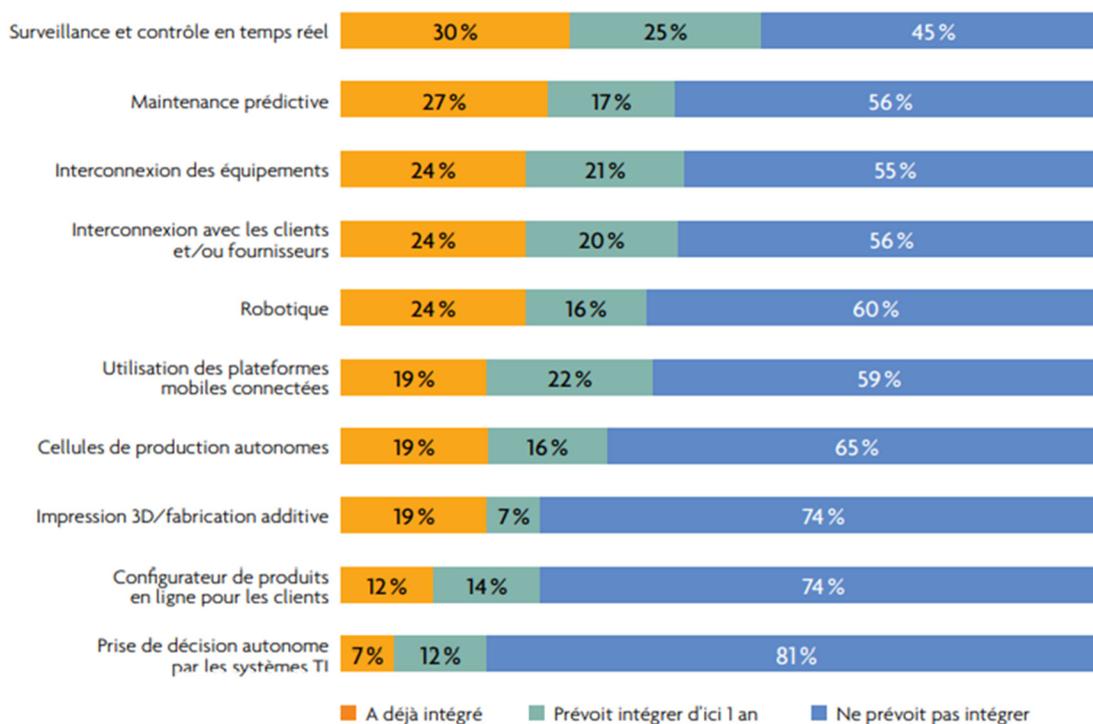


Figure 6 : Pourcentage d'intégration de 10 technologies numériques par des PME manufacturières québécoises (Baromètre industriel québécois, 11e édition, 2020)

Il faut également prendre en compte que les petites entreprises ont plus de difficultés liées à l'implantation des technologies de l'industrie 4.0. De plus, une intégration peut être considérée comme réussie, dans le cas où l'entreprise intègre au moins 6 technologies sur 10. L'illustration prochaine nous montre parfaitement que le virage vers la transition numérique accuse un retard et plus particulièrement pour les petites entreprises ayant entre 10 et 19 employés. Selon cette étude du Baromètre industriel québécois (2020), 48 % des entreprises n'ont intégré aucune ou qu'une seule des dix technologies numériques; 31 % en ont intégré deux ou trois sur dix; 16 % en ont intégré quatre ou cinq; et 5 % en ont intégré six ou plus. Le degré d'intégration des technologies numériques varie beaucoup selon la taille de l'entreprise : 56 % des entreprises de 10 à 19 employés n'ont intégré aucune ou qu'une seule technologie numérique, contre 37 % des entreprises de 100 à 500 employés. À l'autre extrémité de l'échelle, 10 % des entreprises de 100 à 500 employés ont intégré six technologies numériques ou plus.

D'après cette illustration, il est évident que les grandes entreprises ont plus de facilité à intégrer les technologies de l'industrie 4.0, par rapport aux PME. C'est pourquoi nous nous sommes focalisés et particulièrement intéressés aux PME. De sorte à combler ce vide existant dans la revue de littérature sur la complexité, la gestion de projet et l'industrie 4.0.

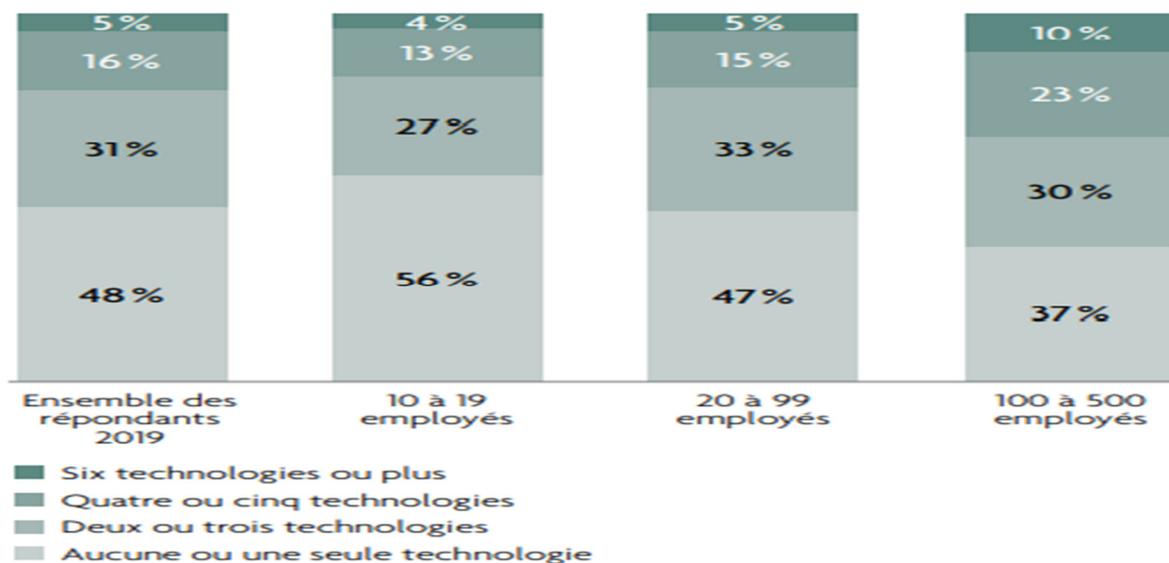


Figure 7 : Nombre de technologies numériques déjà intégrées (sur une possibilité de 10) par des PME manufacturières québécoises (Baromètre industriel québécois, 11<sup>e</sup> édition, 2020)

Après avoir fait un bref état de la littérature, il s'agit maintenant de poursuivre la recherche en exposant le cadre conceptuel initial puis la méthodologie de recherche retenue pour mener l'étude, avant de discuter des résultats obtenus puis finalement de la conclusion de la recherche.

## **CHAPITRE 3 : CADRE CONCEPTUEL ET MÉTHODOLOGIE DE LA RECHERCHE**

Ce chapitre vise à indiquer et clarifier la méthodologie utilisée afin de mener à bien cette recherche. Il s'agit également de confirmer le positionnement de la recherche, notamment en mettant en évidence les outils méthodologiques devant permettre une analyse pertinente des données recueillies. Pour augmenter notre niveau de compréhension de la gestion de la complexité dans les projets de l'industrie 4.0 dans cette étude, nous avons décidé d'opter pour l'utilisation de la méthode de la théorie enracinée, développée par Glaser et Strauss en 1967. De plus, la méthodologie de l'étude de cas développée par Yin en 1984 s'avère être un outil méthodologique indispensable dans notre recherche. Dans le cadre de notre étude, ces deux méthodologies sont complémentaires et permettent de recueillir efficacement des données de terrain et de les soumettre à une analyse rigoureuse. Favorisant ainsi l'obtention de théories qui reflète au maximum, la réalité d'un environnement de gestion de la complexité dans les projets de l'industrie 4.0 et de la transformation numérique.

La méthodologie utilisée doit permettre de répondre à notre question de recherche et ainsi qu'à nos trois objectifs, pour comprendre, analyser et identifier la complexité dans la gestion de projets de l'industrie 4.0.

Question de recherche : Quels sont les facteurs associés à la complexité dans les projets de l'industrie 4.0 ?

1. Comprendre si l'adoption des technologies de l'industrie 4.0 par les PME manufacturières est faible en raison de leurs complexités élevées.
2. Déterminer si un intermédiaire spécialisé permet, aux PME, de réduire le niveau de complexité lié à l'adoption des technologies de l'industrie 4.0.
3. Identifier le processus de gestion de la complexité.

Évidemment, tout au long de ce chapitre, il sera question de préciser le type de recherche choisie, les théories qui nous permettent de justifier les orientations, les approches, le design envisagé et les stratégies de recherche utilisées. D'autres précisons

seront apportées quant à la méthodologie de recherche, tel, l'expression et la justification du plan et des procédures de collecte de données et de traitement. De plus, nous débiterons par la présentation du cadre conceptuel qui façonne notre recherche.

### **3.1 Cadre conceptuel**

L'établissement d'un cadre conceptuel permet d'organiser les idées et les concepts. Il est utilisé comme un outil d'analyse exposant un cheminement d'idées, des éléments qui ont des liens logiques entre eux dans un contexte bien précis. On peut aussi le considérer comme un support visuel qui expose une pensée en lien avec un ensemble ou plusieurs ensembles de critères ou caractéristiques spécifiques à une situation donnée.

Notre cadre conceptuel a été élaboré selon principe suivant. Nous pensons que les PME ayant des activités dans l'industrie manufacturière éprouvent des difficultés liées à l'adoption des technologies de l'industrie 4.0, principalement du fait de leur complexité. Il faut donc trouver des alternatives qui leur permettraient d'intégrer et d'adopter les technologies de l'industrie 4.0, en réduisant la complexité qui y est associée, afin que leurs opérations manufacturières soient bien plus efficaces et efficientes.

Les PME gérants des projets dans l'industrie manufacturière qui souhaitent adopter les technologies de l'industrie 4.0 dans leurs processus de gestion et de production se trouvent très en difficultés, car les technologies sont toutes complexes, individuellement, et l'intégration de l'ensemble des technologies est encore plus complexe. Cela ne représente pas leurs cœurs de métiers, c'est un domaine assez nouveau et elles ne disposent pas de l'expertise ni des connaissances nécessaires afin d'entamer correctement cette transition numérique.

C'est pourquoi nous pensons qu'une des alternatives pertinentes pour réduire cette complexité auxquelles les PME et les gestionnaires de projet manufacturier font face est d'obtenir une intermédiation entre les PME et l'industrie 4.0. Cette intermédiation a pour

but d'absorber et réduire le niveau de complexité qu'engendre l'intégration des technologies de l'industrie 4.0 afin que cela en augmente l'adoption par les PME.

Évidemment, cette intermédiation devra être réalisée par une entreprise ou une organisation spécialisée dans le domaine manufacturier et celui de l'industrie 4.0.

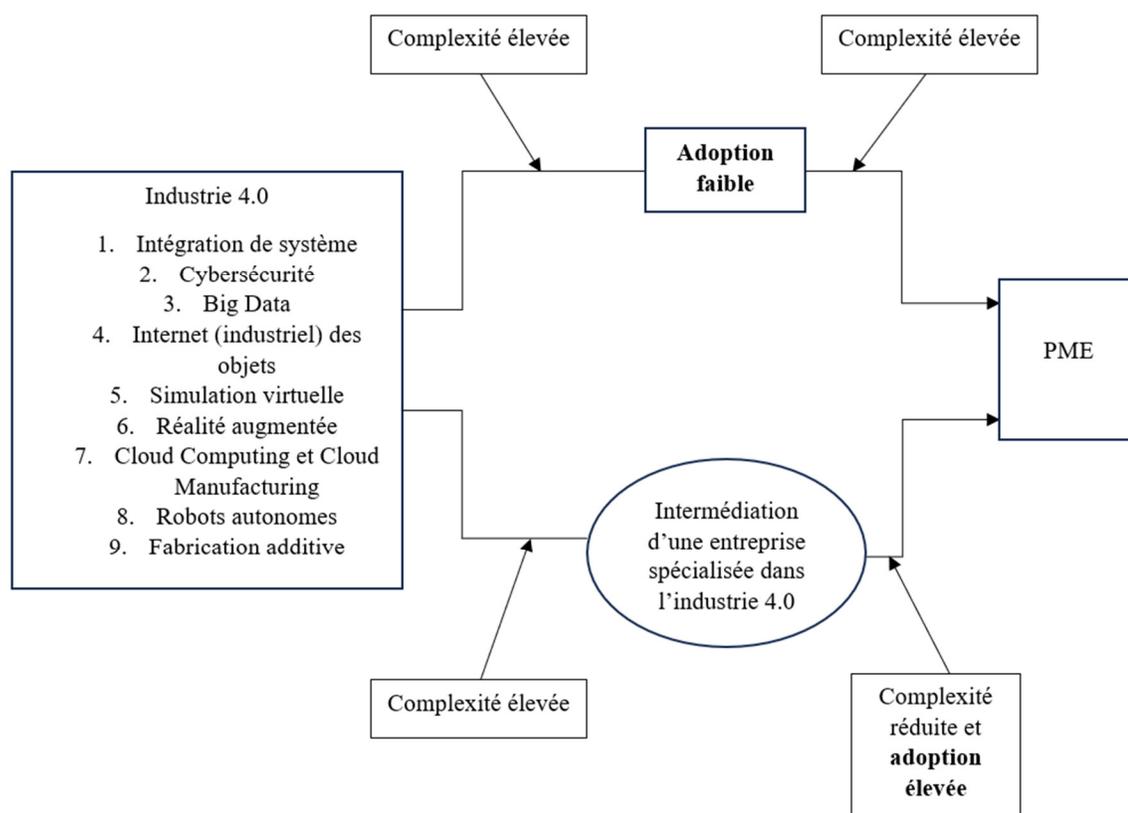


Figure 8 : Cadre conceptuel de la recherche

## 3.2 Méthodologie de la recherche

### 3.2.1 Exposer les Théories mobilisées

Selon plusieurs auteurs (Perret & Seville, 2003; Rouleau, 2007; Wacheux, 1996), lors de la production d'un corpus académique, le chercheur en management se doit de choisir entre trois paradigmes épistémologiques à savoir: le positivisme, l'interprétative et le constructivisme. Ainsi Charreire-Petit & Huault, (2001, p. 7) affirment aussi que les

questions de recherches soulevées en management stratégique peuvent aussi bien être appréhendées par une posture constructiviste, mais aussi « débattue au sein d'autres référentiels comme le positivisme ou l'interprétative notamment. Évidemment, le positionnement épistémologique est aussi justifié par le processus de production de connaissances vers lequel nous nous orientons, à savoir choisir entre « l'exploration » ou le « test » (Charreire-Petit & Durieux, 2003 ; Charreire-Petit & Huault, 2001).

D'un point de vue épistémologique, notre recherche s'inscrit plutôt dans le paradigme du constructivisme.

Il existe principalement deux méthodologies de recherche qualitative utilisées afin de mener à bien un travail de recherche. En effet, Charreire-Petit et Durieux (2003) observent que « les deux grands processus de construction des connaissances » sont l'exploration et le test (2003, p. 57). Selon Hodgson et Rothman (1999), le choix de la méthodologie de recherche a des implications significatives dans l'acceptation du savoir et des explications produites en sciences de management. D'après Karami et al. (2006), cette étape est primordiale pour le déroulement de la recherche puis dans la restitution des résultats à la communauté scientifique. Afin de mener à bien ce travail, nous avons donc opté pour une étude qualitative exploratoire.

### ***3.2.2 Approche de l'étude***

L'approche qualitative permet de comprendre, décrire, ou encore explorer un phénomène sous différentes facettes et dimensions. En effet, d'après (Karami et al., 2006) un nouveau champ d'investigation exige ainsi une approche qualitative.

L'exploration théorique consiste à étudier le lien entre deux disciplines ou deux champs théoriques (au moins) qui n'avaient pas été mis en relation dans les travaux antérieurs. En effet Velmuradova (2004) souligne que l'exploration empirique permet d'élaborer du « nouveau » indépendamment des connaissances antérieures, sans a priori, une démarche empirique. Ainsi, Glaser et Strauss (1967) proposent « a grounded theory

» ou la « théorie enracinées », comme l'ensemble des méthodes dans une démarche inductive de nature plutôt qualitative qui vise à faire émerger une théorie (de niveaux différents) à partir des données empiriques (faits observables). Les chercheurs qui utilisent cette méthode ne disposent pas de données à l'avance, mais les construisent progressivement au cours du processus de recherche à partir des données collectées sur le terrain. Cette méthode nécessite donc de la flexibilité dans le processus. La particularité de cette théorie est qu'elle offre plusieurs perspectives concernant l'expression de la vérité en rapport avec un sujet donné. À cet effet, Guillemette et Luckerhoff (2012) indiquent que les multiples vérités et définitions existent, en fonction de la définition que les gens donnent d'un phénomène particulier, et elles changent et évoluent en fonction du temps, du lieu, du point de vue de l'observateur et de la situation.

De plus, Charreire-Petit et Durieux (1999) affirment que le processus d'exploration nécessite de procéder de manière inductive ou abductive, en allant du particulier à des conjectures plus générales et il ne saurait être rattaché a priori à un paradigme particulier. Aussi, cette voie par l'exploration est aussi appelée l'induction. Nous utiliserons un raisonnement par abduction afin de présenter et analyser les données qui ont été recueillies par le biais des entrevues, de la documentation sur Noovelia puis de tout ce que j'ai pu saisir du fonctionnement de Noovelia. Nous nous servons évidemment de la revue de la littérature lorsqu'il s'agira d'analyser nos résultats. Ainsi, nous pourrions analyser nos résultats, en faisant ressortir les faits saillants qui nous permettront de répondre à notre question de recherche nos objectifs de recherche. En effet, selon Eisenhardt (1989), la théorie développée à partir d'études de cas est susceptible de posséder des atouts importants tels que la nouveauté, la testabilité et la validité empirique, qui découlent du lien intime avec les preuves empiriques.

Cette méthode de recherche sera plus propice à cette étude, car il s'agit principalement d'explorer des sujets assez embryonnaires, importants et qui méritent davantage d'éclaircissement (industrie 4.0, gestion de projet, complexité). De plus, nos résultats ne

seront pas uniquement basés sur l'état de la revue de littérature, mais reposent également sur notre étude de cas de Noovelia. En effet, Evrard et al. (2009) affirment que « la démarche inductive constitue une base importante du processus de recherche surtout lorsqu'on est dans un domaine neuf » (2009, p. 44). Plusieurs auteurs s'accordent sur l'idée que dans la démarche inductive, le chercheur souhaite comprendre et décrire un phénomène organisationnel, tout en partant d'une logique inverse à la démarche déductive (Eisenhardt, 1989; Evrard et al., 2009 ; Glaser & Strauss, 1967;).

### ***3.2.3 Le Design de l'étude***

Nous avons décidé d'effectuer une étude de cas sur l'entreprise Noovelia. Cette démarche d'étude de cas a été développée par Yin (1984) dans son ouvrage « Case Study Research: Design and Methods ». Selon Fortin et al. (2005), la méthodologie de l'étude de cas vise à l'examen approfondi d'un phénomène. Eisenhardt (1989) indique que la méthode utilisée est particulièrement bien adaptée aux nouveaux domaines de recherche ou aux domaines de recherche pour lesquels la théorie existante semble inadéquate.

### ***3.2.4 Critères de sélections***

Nous nous sommes intéressés à cette organisation, car d'une part, elle fait partie des leaders du Québec dans le domaine des équipements industriels (technologiques), elle possède des compétences technologiques de pointes et d'autre part, elle a un mode de fonctionnement basé sur la gestion de projets qui sont très souvent complexes, dans le domaine de la technologie, de l'industrie manufacturière et de la transformation numérique. C'est donc une organisation qui est soumise aux contraintes, aux avantages, aux inconvénients ainsi qu'aux réalités du domaine de la gestion de projet.

À la suite de plusieurs démarches, nous avons eu l'opportunité d'entrer en contact avec Noovelia, qui a accepté de participer à l'élaboration de ma recherche en me donnant la possibilité d'interagir avec des personnes clés au sein de la société. Cela permet aussi d'étudier le cas d'une entreprise trifluvienne qui évolue dans le contexte et l'écosystème

canadien et québécois, plus particulièrement. Dans un premier temps, cette étude de cas vise à effectuer une analyse de Noovelia et de son fonctionnement dans l'ensemble, grâce à de la documentation sur l'entreprise et aussi grâce aux entrevues. Ensuite, les entrevues ont été conduites avec des personnes exerçant des responsabilités clés au sein de l'entreprise. Entrevues au cours desquels, des questions ont été posées aux intervenants afin qu'ils puissent se servir de leurs expériences sur le terrain, pour éclairer la communauté scientifique et académique en fournissant d'éventuelles pistes de réflexion pertinente concernant nos objectifs de recherche.

### ***3.2.5 Triangulation***

La triangulation en recherche qualitative est une méthode qui consiste à utiliser plusieurs sources de données, méthodes d'analyse ou perspectives pour étudier un phénomène. Comme l'a souligné Denzin (1978), "la triangulation consiste à examiner un phénomène en utilisant différentes méthodes de collecte de données et en s'appuyant sur différentes sources d'informations pour obtenir une perspective plus complète et plus précise".

La triangulation permet de renforcer la validité et la fiabilité des résultats de recherche en réduisant les biais et en confirmant ou corroborant les conclusions à partir de différentes sources. Comme l'a noté Patton (1990), "la triangulation est une stratégie pour l'obtention de preuves convergentes à partir de différentes sources de données, méthodes, chercheurs ou théories". En utilisant la triangulation, les chercheurs peuvent comparer et contraster les informations obtenues à partir de différentes sources, ce qui permet d'identifier les convergences et les divergences entre les données. Cela peut aider à fournir une compréhension plus approfondie et plus nuancée du phénomène étudié.

La triangulation peut prendre différentes formes, telles que la triangulation des sources (utilisation de différentes sources d'informations), la triangulation des méthodes (utilisation de différentes méthodes de collecte de données ou d'analyse), ou la

triangulation des chercheurs (utilisation de plusieurs chercheurs indépendants pour analyser les données et vérifier les résultats).

Pour cette recherche, la triangulation des sources et des méthodes a été la plus privilégiée puisque nos résultats et nos analyses reposent principalement sur la revue de la littérature ainsi que sur nos observations empiriques et nos interactions avec des personnes clés, se situant au cœur de la gestion de la complexité dans les projets de l'industrie 4.0.

### ***3.2.6 Technique et procédures de traitement des données***

Afin de traiter correctement les données recueillies lors de cette étude de cas, une première partie sera consacrée à la présentation de Noovelia, de ses activités et de son environnement afin d'avoir une vue d'ensemble sur l'entreprise. Ensuite, une deuxième partie sera dédiée à la présentation des données collectées, dans une table correspondant aux réponses obtenues lors des entrevues que nous avons effectuées. Ce tableau représentera donc uniquement les données et observations recueillies lors des entrevues. Les entrevues ont été enregistrées avec l'autorisation des intervenants et cela a permis de les retranscrire plus facilement à l'aide de Microsoft Word.

### ***3.2.7 Saturation théorique***

La saturation théorique en recherche est un concept clé dans le domaine de la recherche qualitative. Il indique le point où l'ajout de nouvelles informations n'apporte plus de nouvelles perspectives ou de compréhensions significatives sur le sujet étudié. Selon Glaser et Strauss (1967), deux chercheurs pionniers dans le domaine de la recherche qualitative, la saturation théorique est atteinte lorsque "les données additionnelles ne génèrent pas de nouvelles catégories ou ne renforcent pas les catégories existantes dans la théorie émergente".

En d'autres termes, lorsque les chercheurs atteignent la saturation théorique, cela signifie qu'ils ont collecté suffisamment de données et qu'ils ont exploré en profondeur le sujet de leur recherche. Les nouvelles informations recueillies n'apportent pas de nouvelles perspectives ou de compréhensions significatives, car elles ne génèrent pas de nouvelles catégories ou ne renforcent pas les catégories existantes dans la théorie émergente.

Il est essentiel de noter que la saturation théorique n'est pas un point fixe et absolu, mais plutôt un jugement subjectif basé sur l'interprétation des chercheurs. Différentes études peuvent atteindre la saturation théorique à des moments différents en fonction de la complexité du sujet et de la nature des données collectées.

Après avoir développé la méthodologie que nous avons choisie pour conduire cette recherche, dans le chapitre suivant, il est essentiellement question de présenter l'étude de cas de Noovelia avant de déterminer l'issue des résultats concernant nos objectifs de recherche.

## **CHAPITRE 4 : COLLECTE DE DONNÉES**

Le but initial était de pouvoir mener cette recherche en effectuant une immersion au sein de Noovelia en faisant quelques déplacements par semaine dans les locaux de l'entreprise (usines et bureaux) pendant au moins 3 mois. Cette immersion m'aurait permis d'observer et de découvrir réellement les manières de procédés et de penser des employés à tous les niveaux hiérarchiques, de l'opérationnel au stratégique, afin d'améliorer ma compréhension du fonctionnement de l'entreprise dans sa globalité. Le fait que je puisse avoir accès aux locaux m'aurait aussi servi à avoir des informations dans un cadre moins formel et le nombre d'intervenants aurait pu être plus conséquent. Malheureusement, la situation sanitaire (COVID) m'a empêché de continuer dans cette démarche. Il a donc fallu se résoudre à faire des entrevues virtuelles par le biais de l'application ZOOM.

Une fois le contact établi avec les membres de l'entreprise, la première rencontre a eu lieu quelques jours plus tard. Durant cette réunion, nous avons fait les présentations puis nous avons discuté du cadre et de l'intérêt de la recherche au sein de l'entreprise. C'était la prise de contact. Il y avait 5 participants, dont l'un des co-fondateurs de Noovelia, le responsable des ressources humaines, le responsable des opérations numériques, ainsi que mon directeur de recherche et moi. Ensuite, il y a eu une deuxième rencontre entre le co-fondateur et moi, pendant laquelle il m'a exposé le modèle d'affaire de l'entreprise en prenant le soin de m'expliquer l'histoire de Noovelia depuis sa création. Cela a été très bénéfique pour moi, car il m'a en quelque sorte, partager son expérience et sa vision en ce qui concerne l'évolution actuelle et future du groupe. Après cette rencontre, j'avais une meilleure compréhension du fonctionnement de l'entreprise, de ses défis, de ses produits, du paradigme des employés, de la culture organisationnelle et plein d'autres aspects importants à considérer pour améliorer la qualité de notre étude. Ensuite, il m'a mis en contact avec le responsable des ressources humaines, avec qui j'ai également fait des entrevues, il m'a notamment orienté vers les personnes clés en fonction des sujets que nous avons abordés.

À la suite de cela, j'ai donc eu une autre entrevue avec le responsable des opérations numériques. Mais après avoir terminé, je me suis rendu compte qu'il me fallait une deuxième réunion avec lui pour éclaircir et approfondir des points très importants que nous avons relevés au cours de la première discussion. Ensuite, j'ai contacté encore une fois le responsable des ressources humaines qui m'a redirigé vers le responsable des opérations physiques avec qui j'ai eu une entrevue. À la fin de la dernière rencontre, nous avons eu une discussion sur l'intégration de système au sein de l'entreprise et j'ai décidé de retourner vers le responsable des ressources humaines pour essayer d'avoir un entretien avec le responsable de l'innovation.

Trois autres réunions ont été annulées pour manque de disponibilité de la part de l'entreprise et au même moment mon permis d'étude avait expiré et je devais quitter le Canada le temps d'avoir une réponse de l'immigration, concernant le renouvellement.

## **Étude du cas de Noovelia**

### **4.1 Présentation et diagnostic de l'entreprise**

#### ***4.1.1 Description de l'entreprise : Mission, vision, objectifs et valeurs***

La mission de Noovelia est de développer, intégrer et connecter des technologies modulaires et innovantes pour offrir des solutions adaptées dans les domaines manufacturiers, agroalimentaires, d'entreposage, de la distribution, du transport et de la logistique. Ils visent une performance accrue, une croissance productive et rentable, tout en plaçant la responsabilité et la qualité de vie de l'humain au cœur de l'innovation.

Leur vision se concentre sur quatre axes : être le leader au Québec et une référence importante en Amérique du Nord sur le marché, atteindre et maintenir un taux de croissance entre 20% et 30%, être attractif en étant un leader qui facilite l'émergence des talents en leur permettant de s'épanouir, et adopter une approche où "les plus rapides bouffent les plus lents" en termes de technologie.

Leur objectif est d'aider à numériser les entreprises et à connecter leurs technologies pour une gestion et un suivi intelligent de l'inventaire, de la logistique, de la production et des données.

Enfin, les valeurs de l'entreprise s'articulent autour de la collaboration et l'esprit d'équipe, la rigueur et l'intégrité, l'engagement et les responsabilités, ainsi que l'agilité et le bien-être.

#### ***4.1.2 Type d'entreprise***

Noovelia est une société holding ou « société holding ». Selon la forme juridique, une société peut être une société holding dite passive ou une société holding active. Dans le cas de Noovelia, il s'agit d'une société holding active qui non seulement détient des actions dans ses filiales, mais fournit également un soutien à la gestion et d'autres services aux filiales. Les filiales de Noovelia sont : Divel, Epsilia et Pluritag effectuent davantage de travail au niveau opérationnel de l'entreprise concernant le développement et la production de produits technologiques, de leur distribution et le service client.

### **4.2 Les catégories de produits et services**

Les catégories de produits et services proposés par l'entreprise s'articulent autour de trois domaines d'activité stratégiques : L'objectif est donc d'utiliser chaque filiale de Noovelia pour expliquer les différents produits et services proposés par l'entreprise.

#### ***4.2.1 Les systèmes d'identification et de positionnement de Pluritag***

Bien entendu, Noovelia utilise la technologie d'identification par radiofréquence (RFID) qui lui permet de reconnaître automatiquement les appareils, produits, etc. même lorsque vous êtes en déplacement.

De plus, l'entreprise a développé un système de localisation en temps réel (RTLS) utilisant son produit Kencee pour permettre une localisation précise de tous les composants du processus de fabrication. Cela permet aux clients de connaître le processus de production en temps réel.

Les produits peuvent être personnalisés pour répondre aux besoins spécifiques des clients. Les domaines d'application de ces technologies sont principalement la gestion d'entrepôt et la production automatisée.

#### ***4.2.2 Les logiciels d'Epsilia***

Les logiciels développés par Noovelia peuvent être intégrés aux systèmes et appareils existants et prennent en compte les détails de chaque domaine d'activité. Il existe de nombreux logiciels de gestion d'entreprise disponibles, dont nous parlerons en détail ci-dessous.

EpsiMES vous permet de capturer des données de fabrication en temps réel pour l'analyse, la surveillance et le contrôle. Ce logiciel permet également la connectivité avec tous les autres systèmes développés par Epsilia et constitue le lien entre les ressources humaines et physiques.

Le logiciel EpsiTrafik peut être utilisé pour la gestion du transport et de la logistique. Vous découvrirez entre autres les processus de navigation, de paiement, de contrôle qualité et de gestion des stocks mobiles. L'identification intelligente et la traçabilité des produits sont réalisées à l'aide du logiciel EpsiCuatro. Ce logiciel utilise la RFID, les lasers, les codes-barres 1D ou 2D, le GPS, les étiquettes intelligentes et d'autres technologies de positionnement.

Concernant la gestion des stocks, il y a le logiciel EpsiWMS qui permet une traçabilité complète des produits depuis la réception jusqu'à l'expédition, garantissant ainsi une rotation des stocks efficace et efficiente. Plusieurs fonctionnalités sont disponibles.

EpsiFood est un logiciel de gestion des aliments et du bétail qui comprend des modules pour l'approvisionnement, le chargement des animaux, l'élevage multiespèces et l'abattage. Permettant ainsi de suivre la production du début à la fin et apportant une garantie aussi quant à la qualité et la traçabilité des produits.

EpsiSpec est un logiciel spécialisé et personnalisé du début à la fin pour des domaines et besoins spécifiques. EpsiERP permet de connecter le logiciel Epsilia aux autres logiciels ERP déjà disponibles sur le marché.

Dans le domaine de la valorisation des données, il existe le logiciel EpsiData qui permet le stockage visuel et l'interrogation des données. En outre, Noovelia exploite ces données en faisant ce que l'on appelle le business intelligence avec des analyses prédictives et l'ajustement des processus (IA). Cette capacité représente un avantage concurrentiel inestimable puisque cela implique de meilleures prises de décisions.

Pour le domaine de l'automatisation, l'entreprise a développé le logiciel EpsiAutomatization. Il permet de connecter des robots, des voitures autonomes et des entrepôts automatisés, garantissant ainsi que tout est parfaitement synchronisé et fonctionne de manière optimale.

#### ***4.2.3 Solutions de manutention automatisée de Divel***

Les solutions automatisées de Divel permettent de déplacer des produits ou de façonner des processus de production sans aucune intervention humaine. Parmi les produits proposés par Divel figurent des contrôleurs et des positionneurs permettant la manipulation de divers produits ou équipements.

Les véhicules autoguidés sont conçus comme des plates-formes, des tracteurs, des chariots élévateurs. Ils peuvent être entièrement fabriqués sur mesure en fonction des besoins du client et des caractéristiques environnementales. Les véhicules automatisés sont entièrement automatisés et permettent de déplacer les produits dans une usine ou un entrepôt.

Divel propose également des solutions d'entreposage automatisées qui permettent une gestion optimale des stocks. Les principaux produits de ce domaine sont des machines automatiques comme les grues verticales. Les bancs d'essai fabriqués permettent de tester les produits finis avant leur mise sur le marché.

#### ***4.3.4 R&D***

La proportion du volume d'affaires réinvestie en recherche et développement en 2019 était de 15 %, soit 1,5 million<sup>19</sup>. Il est à noter que le remboursement du gouvernement sous forme de crédit d'impôt s'effectue à hauteur d'environ 60% de l'investissement total.

Le gain est de 900 000 \$, ce qui signifie que le coût net des investissements en R&D provenant des revenus est de 6 %, soit 600 000 \$. La recherche et le développement portent particulièrement sur la création et l'intégration des technologies développées en interne.

### 4.3 La description de la chaîne de valeur de Noovelvia

Les principales activités de l'entreprise sont la logistique interne, la conception, la fabrication et l'assemblage, la gestion de projet, le marketing et les ventes, ainsi que le service client.

La logistique interne correspond plus spécifiquement à l'achat de divers matériaux et composants nécessaires à la fabrication d'un produit. Noovelvia doit les recevoir, les stocker et ensuite les traiter.

La conception de certains produits, notamment ceux proposés par la filiale Divel, nécessite au préalable, une planification technique. Dans le cas d'Epsilia, il pourrait s'agir

Figure 9 : Chaîne de valeur de Noovelvia



d'un plan de conception logicielle développé pour répondre aux besoins spécifiques du client. De plus, cette activité comprend non seulement la conception du produit final, mais également les composants spécifiques qui seront intégrés dans le produit final.

Cela inclut également le soudage des châssis de véhicules ou d'autres composants dans le cadre de la production et de l'assemblage. Si votre entreprise ne dispose pas de

suffisamment de soudeurs, vous pouvez également sous-traiter ce travail, mais ce n'est pas toujours le cas. De plus, les travaux de peinture peuvent être effectués en interne ou sous-traités. Cependant, tout ce qui concerne l'assemblage des pièces incluses dans le plan de conception et le produit final est toujours conservé en interne.

La gestion de projet constitue une partie importante des principales activités de l'entreprise, car c'est l'équipe qui entretient un contact direct avec les clients. Les membres veulent identifier les besoins des clients et parvenir à une mission clairement définie. Bien entendu, les délais, les coûts du contrat et la qualité globale du projet doivent être respectés.

Les activités de marketing et de vente sont réalisées grâce à la publicité et à l'image de marque que l'entreprise a su développer depuis sa création. Noovelgia emploie également des vendeurs qui peuvent participer à des activités externes telles que des ateliers et des salons professionnels. Vous serez également responsable de rencontrer les clients pour vendre la technologie et soumettre des propositions de projets. Les services proposés aux clients sont nombreux, variés et adaptés selon leurs besoins.

Lors de l'intégration de la technologie au sein d'une entreprise, les employés ont besoin de temps pour s'adapter, et beaucoup d'autres peuvent se retrouver obligés d'assumer des tâches connexes ou de nouveaux postes.

Noovelgia souhaite donc les former afin qu'ils connaissent toutes les bases de la technologie déployée. De plus, une assistance d'urgence est toujours disponible en cas de problèmes techniques et l'assistance à distance permet la connexion à l'ordinateur du client depuis les bureaux de Noovelgia. Des services de maintenance sont fournis ainsi que des services de location partielle.

Les activités de support sont l'infrastructure de Noovelia, notamment l'administration, la gestion des ressources humaines, l'audit financier et la comptabilité, le développement des affaires et la recherche et développement. Ces différentes activités de support se complètent et aident l'entreprise à développer son avantage concurrentiel.

Concernant la gestion des ressources humaines, elle occupe une place importante dans une entreprise avec un niveau de développement comme Noovelia. Il s'agit de se démarquer en tant qu'employeur par ses activités de recrutement qui peuvent prendre la forme de vidéos diffusées sur les réseaux sociaux ou encore de création d'une marque employeur au travers d'une page site internet dédié. De plus, ces activités comprennent la rémunération, les méthodes de motivation mises en œuvre telles qu'un organigramme flexible, la formation des employés ainsi que les opportunités d'avancement professionnel.

L'audit financier et la comptabilité comprennent la gestion des finances de l'entreprise, la tenue des comptes clients, des fournisseurs, etc. ainsi que la rémunération des employés. Pour le développement des affaires, il s'agit d'évaluer et de saisir les opportunités commerciales qu'offre l'entreprise pour sa croissance future.

Enfin, les recherches et développements réalisés par Noovelia peuvent être technologiques ou encore plus sophistiqués au niveau des études de faisabilité et des études de cas, à des fins de veille concurrentielle et d'étalonnage (Benchmarking).

La chaîne de valeur de Noovelia comprend toutes les activités que nous venons de décrire. Elles sont essentielles pour favoriser l'atteinte de leurs objectifs. En effet, dans le cas de Noovelia, ses activités de soutien ainsi que ses activités principales, lui permettent de mener à bien, la gestion et l'exécution des différents projets à travers trois principaux piliers.

On peut distinguer les projets de création de technologies physiques et numériques, les projets d'intégration de technologies internes et externes puis finalement les projets d'implantation et d'installation des technologies chez les clients.

Un projet de création de technologie physique et numérique consiste à développer un produit qui combine des éléments matériels et des fonctionnalités numériques. Ce type de projet vise à concevoir des solutions innovantes qui répondent à des besoins spécifiques, en utilisant une combinaison de capteurs, de dispositifs électroniques et de logiciels.

L'objectif principal de ce projet est de créer une technologie qui offre une expérience utilisateur améliorée, en combinant des fonctionnalités physiques et numériques. Cela peut inclure des objets connectés, des dispositifs interactifs, des systèmes de contrôle automatisés, des interfaces utilisateur intuitives, etc. Le processus de création de technologie implique plusieurs étapes, telles que la recherche et l'analyse des besoins, la conception du produit, le prototypage, le développement du logiciel, les tests et l'itération. Il est également important de prendre en compte les aspects de fabrication, de coût, de durabilité et de conformité aux normes de sécurité. Ce type de projet nécessite généralement une collaboration multidisciplinaire, impliquant des experts en électronique, en informatique, en design industriel, en mécanique, en ergonomie, etc. Il est également essentiel de suivre les tendances technologiques et de rester à jour avec les avancées dans le domaine de l'internet des objets, de l'intelligence artificielle, de la réalité virtuelle, etc.

En résumé, Noovelia crée et développe ses technologies travers des projets de création de technologie physique et numérique visant à développer des produits innovants qui combinent des fonctionnalités physiques et numériques pour offrir une expérience utilisateur améliorée.

S'agissant des projets d'intégration des technologies interne et externe, ils consistent à mettre en place une stratégie visant à combiner des solutions technologiques internes et

externes pour optimiser les opérations. Évidemment, cela implique d'évaluer les besoins de l'organisation, de rechercher les technologies appropriées sur le marché, et de les intégrer de manière cohérente et efficace dans l'infrastructure existante. Les objectifs d'un tel projet peuvent inclure l'amélioration de l'efficacité opérationnelle, l'optimisation des processus, la réduction des coûts, l'amélioration de la collaboration et de la communication, ainsi que l'innovation technologique. Lors de ces projets, Noovelia utilise des technologies qu'elle a, au préalable, développées lors des créations de produits technologiques. Les équipes les intègrent avec d'autres technologies développées en interne ou/et ajoutent des éléments technologiques (systèmes et composants) développés par des fournisseurs externes.

Ce type de projet a un impact significatif sur Noovelia ainsi que pour ses partenaires d'affaires et ses clients, en permettant une meilleure utilisation des ressources, en favorisant l'adoption de nouvelles technologies, et en renforçant la compétitivité sur le marché.

Finalement, le dernier pilier essentiel qui permet à Noovelia de proposer des solutions technologiques complète, est la gestion des projets d'installation et d'implantation des technologies chez les clients. Pour mener à bien ce dernier maillon de son offre, Noovelia a mis en place et respecte un processus qu'elle a su établir grâce à l'expérience acquise durant toutes ses années. Ce processus comprend 8 étapes que voici, ci-dessous :

1. Analyse des besoins du client : Comprendre les exigences et les objectifs du client en termes de technologies à mettre en place.
2. Élaboration du plan de projet : Définir les étapes clés du projet, les ressources nécessaires, les délais et les livrables attendus.
3. Préparation de l'environnement : Préparer l'environnement chez le client en termes d'infrastructure, de connectivité et d'équipements nécessaires.

4. Installation et configuration des technologies : Installer, configurer et intégrer les différents composants technologiques selon les spécifications du projet.
5. Tests et validation : Effectuer des tests et des vérifications pour s'assurer du bon fonctionnement des technologies installées.
6. Formation des utilisateurs : Former les utilisateurs sur l'utilisation des technologies et les bonnes pratiques à suivre.
7. Suivi et support : Assurer un suivi régulier après l'implantation pour résoudre les problèmes éventuels et répondre aux demandes d'assistance.
8. Évaluation et amélioration continue : Évaluer les résultats du projet et identifier les opportunités d'amélioration pour les projets futurs.

En résumé, la chaîne de valeur de Noovélia est extrêmement organisée et complète, en ce sens qu'à travers ses activités, l'entreprise est capable d'intervenir à tous les niveaux, lorsqu'il s'agit de gestion de projet de technologie de l'industrie 4.0. Cela confirme son degré de connaissance, d'expérience et de spécialisation dans le domaine.

#### **4.4 L'analyse culturelle et la culture d'innovation de Noovelia**

La culture organisationnelle de l'entreprise est bien développée et les employés travaillent vers la même vision ; le pouvoir de changer les choses en regardant vers l'avenir tout en prenant des risques et en gérant l'incertitude.

Les employés sont fiers de pouvoir faire une différence tangible auprès des clients tout en contribuant à leur croissance et à leur réussite. La culture organisationnelle vise une approche moderne alliant agilité, flexibilité et approche humaine. Pour Noovelia, les collaborateurs sont considérés comme des membres de la famille, une communauté « soudée », qui doit offrir un environnement de travail satisfaisant et motivant. Ainsi, plusieurs avantages leur sont offerts tels qu'un horaire flexible, la conciliation travail-famille et une assurance collective.

De plus, le futur établissement devrait disposer d'une salle de sport afin qu'ils puissent pratiquer du sport pendant leur temps libre. Le développement professionnel des collaborateurs est également envisagé avec des forfaits de formation continue sous forme de formation en ligne ou avec des mentors. Par exemple, un employé qui souhaite approfondir ses connaissances dans un domaine précis peut être jumelé à un autre employé pour une séance de mentorat. Plusieurs activités sont organisées pour assurer une bonne entente et une synergie entre les groupes.

Une fois par mois, Noovelvia organise des activités pour ses employés, des soirées vins et hors-d'œuvre aux spectacles hippiques et paris à l'hippodrome de Trois-Rivières. De plus, les salariés sont invités une fois par mois à sortir boire un verre ensemble le vendredi après-midi. Cette culture organisationnelle contribue fortement à l'attractivité de l'entreprise, mais contribue également à la fidélisation des salariés. De plus, la synergie d'équipe s'exprime dans une culture d'innovation.

Prenant en compte les principes d'innovation fermée et ouverte, Noovelvia se concentre sur l'innovation ouverte que ce soit en interne à travers le partage de connaissances entre les collaborateurs ou en externe à travers des partenariats de recherche et de développement avec des organismes éducatifs nationaux et avec des entreprises locales. Par exemple, Noovelvia entretient des liens avec l'Université du Québec à Trois-Rivières ainsi qu'avec son Centre de transfert technologique en télécommunications.

La figure suivante permet une meilleure compréhension et visualisation du principe d'agilité présente dans l'organisation.

Les organigrammes flexibles permettent aux entreprises d'abandonner les structures conventionnelles. Dans cette approche, les niveaux hiérarchiques sont mis de côté afin

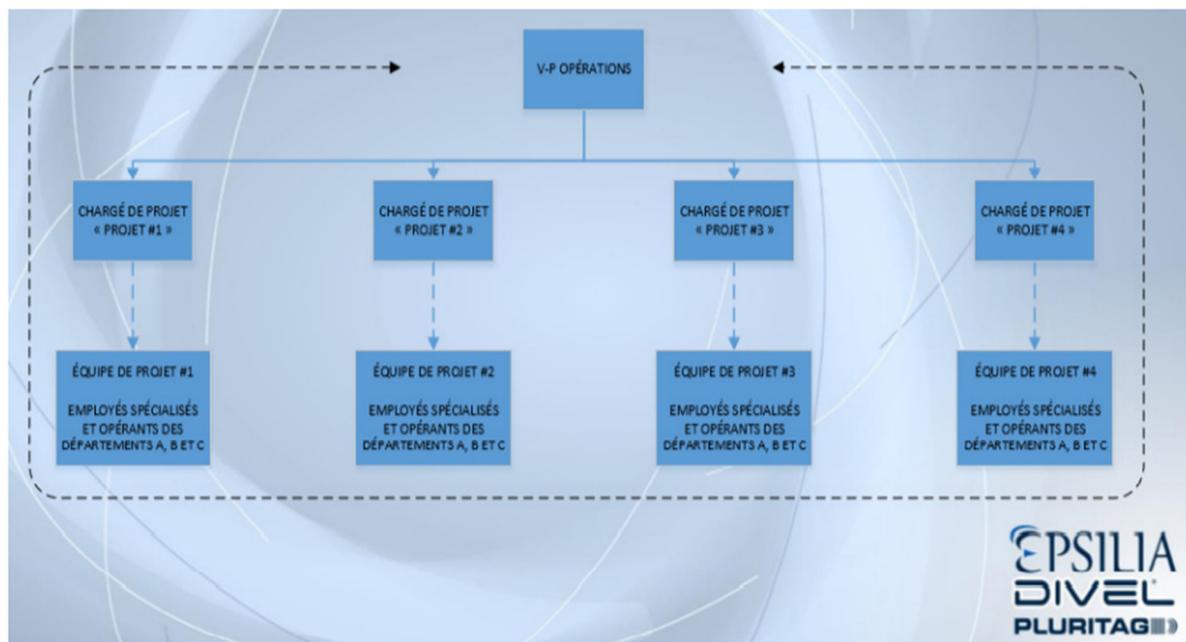


Figure 10 : Organigramme agile de Noovelia

que les employés travaillent au sein d'unités multidisciplinaires. Les équipes projet sont principalement composées de 5 à 6 personnes. Ils sont coordonnés par le chef de projet, mais ses liens hiérarchiques se limitent au rôle de coordinateur. Ainsi, tout cela repose sur la synergie des membres et évite le principe du « silo » qui limite l'échange d'informations et de connaissances entre les organisations.

Cette démarche est également connue sous le nom de « NooveliaHandsOn », car elle repose sur l'appropriation des projets par les membres. Ainsi, les collaborateurs peuvent choisir le type de projet sur lequel ils souhaitent travailler et contribuer à plusieurs projets en fonction des 20 compétences nécessaires à ce dernier projet. Les avantages de cette méthode sont nombreux ; nous permettant de retenir les talents, de les développer et

d'assurer la réussite des projets. De plus, la vitesse de réaction est plus rapide, les performances globales sont meilleures et permettent une créativité accrue.

#### ***4.4.1 Centres de développement et de fabrication***

Les bureaux administratifs sont situés à Trois-Rivières et l'entreprise possède deux usines à Louiseville pour la production de véhicules et de robots. Les usines servent également d'installations de stockage pour les matières premières et les composants ainsi que pour les produits finaux destinés à être distribués aux entreprises clientes.

La recherche et le développement sont réalisés en interne, sur l'un ou l'autre des sites répertoriés, mais également en externe avec des partenaires. Tel que le développement de véhicules industriels autoguidés avec sa collaboration avec l'Université du Québec à Trois-Rivières.

#### **4.6 Les ressources et compétences distinctives et uniques de Noovelia**

Les employés travaillant dans des domaines hautement spécialisés possèdent des compétences distinctives. Dans le contexte actuel, il peut être difficile de trouver du personnel possédant les qualifications nécessaires. Il s'agit donc d'une denrée rare et recherchée pour son talent et ses capacités.

Les ressources financières dont dispose l'entreprise sont très importantes et favorisent les conditions du développement et de la croissance du groupe. De plus, les stratégies marketing et opérationnelles utilisées par Noovelia sont importantes et aident à découvrir les talents et à attirer des clients. Concernant les compétences clés qui constituent le cœur des activités de l'unité, il est possible de s'y référer selon les filiales de l'unité.

Pour la filiale Epsilia, cela passe par des compétences en traçabilité grâce aux technologies WMS, MES, IIOT et connecteurs numériques. La filiale Divel présente les compétences de mobilité développées pour les AGV et les entrepôts automatisés. Enfin,

la filiale Pluritag dispose de compétences clés pour identifier et localiser les produits grâce à cette technologie Kencee et RFID.

La capacité unique de l'entreprise réside dans son aptitude à combiner ses différentes compétences de base dans sa proposition de valeur afin d'offrir des produits et services personnalisés et adaptables. Il est donc possible d'utiliser ces différentes compétences pour l'interopérabilité dans la création et l'intégration de nouveaux produits et services par exemple.

De plus, la proposition de valeur de Noovelgia se caractérise par une offre unifiée permettant la gestion des flux physiques et numériques, l'automatisation et le suivi des mouvements (produits, véhicules automatisés, etc.), la valorisation des données ainsi qu'une intégration optimale des technologies de l'information.

## **4.7 Gestion de l'innovation et de la technologie**

### ***4.7.1 Sur quoi est basée l'innovation de Noovelgia ?***

Le principe fondamental qui sous-tend l'innovation dans cette entreprise est la mise en œuvre d'un nouveau modèle économique. Le groupe est né principalement de la volonté d'apporter plus de valeur ajoutée au marché.

Noovelgia utilise l'innovation de procédé puisque de nouvelles méthodes pour la production de biens et de services ont été implantées. Cela leur permet d'agir plus rapidement pour répondre aux besoins et attentes du client, mais également une souplesse et flexibilité d'exécution. L'innovation de produit est également présente dans l'entreprise, puisque la compétitivité sur le marché exige un renouvellement et apport constant de valeur ajoutée.

L'amélioration des produits existants ou des nouveaux produits permet à Noovelgia de demeurer concurrentiel sur le marché. Par exemple, le produit Kencee conçu par la filiale

Pluritag est un exemple d'innovation de produit qui permet de répondre aux besoins du client en matière de localisation et de positionnement de produits et matériaux.

#### ***4.7.2 Noovelias est-elle leader/pionnier ou suiveur ?***

Auparavant, la filiale Epsilia était déjà un leader en matière de traçabilité au Québec. La filiale Pluritag est une filiale en forte croissance qui présente de fortes possibilités de devenir un leader dans son domaine d'activité stratégique puisqu'aucun leader n'est actuellement présent dans ce secteur et qu'il s'agit d'une technologie spécialisée avec un fort potentiel de croissance sur le marché. Noovelias est sans contre dit un leader dans le domaine de l'industrie 4.0 sur le marché québécois. Leur philosophie est « les vites bouffent les lents », donc l'entreprise n'attend pas de voir un compétiteur commercialiser une nouvelle technologie avant de réagir. Elle reste à l'affût du marché et conçoit des technologies répondant parfaitement aux besoins du client.

#### ***4.7.3 Comment se développe et se déroule la commercialisation des produits technologiques et complexes de Noovelias ?***

Cette section passera en revue la théorie impliquée dans l'analyse des neuf facteurs qui répartissent les bénéfices de l'innovation. Certains de ces facteurs seront abordés pour mieux comprendre comment la commercialisation des produits et services d'une entité se développe et se déroule. Puisqu'il s'agit d'une entreprise opérant dans le secteur privé, les secrets liés à sa recherche et à son développement sont divulgués pour limiter les restrictions des concurrents. Les connaissances au sein d'une entreprise peuvent être tacites ou explicites.

Les connaissances explicites se retrouvent notamment au niveau des plans techniques élaborés pour la conception de certains produits. Les connaissances tacites sont particulièrement présentes dans la manière unique dont une entreprise intègre ces produits et services dans son activité. Cela fait partie intégrante de leur succès dans l'industrie. De

ce fait, de nombreuses connaissances tacites s'accumulent au sein de l'entreprise, que ce soit pour la commercialisation des offres de produits ou encore lors de la gestion de projet. En termes de délai de production et de service après-vente, le délai de production de la filiale Epsilia peut être un peu élevé. En effet, il existe des cas où les projets dépassent les délais initialement prévus. Cependant, ils sont respectés dans la majorité des cas.

En matière de service après-vente, ces services sont nombreux et font partie du succès de l'entreprise, comme l'assistance technique, la maintenance et même les mises à jour logicielles toujours disponibles.

Dans le cas de la filiale Epsilia, le processus de formation des nouveaux collaborateurs peut être long. Cela peut prendre jusqu'à 1 ou 2 ans d'investissement avant que les employés soient pleinement formés. Un certain nombre d'actifs supplémentaires au niveau de la distribution et du marketing sont exploités par la société. Elle développe plusieurs stratégies de marketing et de communication afin d'assurer une commercialisation optimale de ces produits et services.

Noovelvia est une entreprise qui utilise de nombreuses innovations de produits, leurs complexités sont donc certainement présentes. Cela crée un point inimitable. Les produits Noovelvia doivent répondre à un certain nombre de normes et certifications nécessaires à leur commercialisation. L'une des certifications nécessaires fournies par l'Association canadienne de normalisation (CSA) WA47.1 qui concerne les entreprises de soudage par fusion d'acier.

De plus, les produits doivent correspondre et être réglementés par les domaines d'application. Par exemple, le secteur agroalimentaire. Certains produits de l'entreprise sont brevetés au Canada et d'autres aux États-Unis, ce qui leur confère une certaine protection. Toutefois, les informations peuvent être accessibles aux concurrents du domaine.

## **4.8 Le modèle d'affaires de Noovelia**

Voici une illustration qui présente le modèle d'affaire de Noovelia afin d'avoir une vue globale de l'entreprise et ce qu'elle représente à travers plusieurs critères tels que: ses partenaires clés, ses activités clés, sa structure de coût, ses activités génératrices de revenus (clés), sa proposition de valeur, ses relations avec les clients, ses canaux de distribution et ses segments de clientèle. Nous allons aussi en profiter pour exposer une illustration qui représente la chaîne de valeur de l'entreprise.

## MODÈLE D'AFFAIRE NOOVELIA

<p><b><u>Partenaires clés</u></b></p> <p>Entreprises dans le secteur des technologies</p> <p>Réseau d'intégrateurs</p> <p>Gouvernementaux (IQ et BDC)</p> <p>Institutions</p> <p>d'enseignements (UQTR)</p>	<p><b><u>Activités clés</u></b></p> <p>Management agile et flexible</p> <p>R&amp;D</p> <p>Analyse, conception et implantation des solutions</p> <p>Fabrication, programmation, valorisation des données et IOT</p> <p><b><u>Ressources clés</u></b></p> <p>Financière</p> <p>Capital humain : ingénieurs, programmeurs, intégrateurs</p> <p>Propriété intellectuelle et expertise pour la traçabilité, le mouvement, l'identification et le positionnement.</p>	<p><b><u>Proposition de valeur</u></b></p> <p>Solutions en numérisation, connexion et automatisation</p> <p>Logiciels de gestion de production et d'inventaire</p> <p>Équipements de manutention et d'entreposage automatisés</p> <p>Systèmes d'identification et de positionnement de produits</p> <p>Service-conseil en science des données et intelligence d'affaires</p> <p>Analyse, architecture et conception de logiciels et systèmes sur mesure</p> <p>Diagnostic et études de faisabilité</p>	<p><b><u>Relations clients</u></b></p> <p>Collaboration étroite avec le client</p> <p>Formation</p> <p>Conseils et partage de savoir</p> <p>Soutien d'urgence 24/7</p> <p>Aide à distance</p> <p><b><u>Canaux de distribution</u></b></p> <p>Site internet</p> <p>Vendeur</p> <p>Partenaires/Clients</p> <p>Showcible</p>	<p><b><u>Segments clients</u></b></p> <p>Entreprises :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Agroalimentaire</li> <li>➤ Manufacturière</li> <li>➤ Transport et logistique</li> </ul>
<p><b><u>Structure de coût</u></b></p> <p>Ressources humaines</p> <p>Marketing</p> <p>R&amp;D</p> <p>Frais de ventes et coûts de production</p>		<p><b><u>Flux de revenus</u></b></p> <p>Par contrat :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Ventes de logiciel</li> <li>➤ Ventes d'équipements</li> <li>➤ Honoraires</li> </ul> <p>Revenus récurrents :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Soutien technique</li> </ul>		

Figure 11 : Modèle d'affaires de Noovelia

Après avoir développé la méthodologie que nous avons choisie pour conduire cette recherche et après avoir présenté l'entreprise Noovelia, dans le chapitre suivant il est essentiellement question de déterminer les résultats concernant nos hypothèses.

## **CHAPITRE 5: ANALYSE DES RÉSULTATS**

Ce chapitre vise à mettre en lumière les résultats obtenus lors des entrevues auprès des personnes clés travaillant chez Noovelia. Ces résultats portent sur la gestion de la complexité dans les projets de l'industrie 4.0 et de la transformation numérique dans le secteur manufacturier. Ils traitent également de l'intégration et de l'adoption des technologies de l'industrie 4.0 dans un contexte de gestion de projet manufacturier. Dans cette partie du travail, nous allons essentiellement déterminer les résultats concernant nos objectifs, notamment en nous servant des réponses obtenues auprès de nos répondants. Nous utiliserons un raisonnement par abduction afin de présenter et analyser les données qui ont été recueillies par le biais des entrevues, de mes observations, de la connaissance tacite que j'ai pu emmagasiner lors des entrevues et des conversations avec les personnes clés, de la documentation sur Noovelia puis de tout ce que j'ai pu saisir du fonctionnement de l'entreprise.

Nous nous servons évidemment de la revue de la littérature lorsqu'il s'agira d'analyser nos résultats. Ainsi, nous pourrions analyser nos résultats, en faisant ressortir les faits saillants qui nous permettront de répondre à notre question ainsi qu'à nos objectifs de recherche. Nous rappelons ici ce que nous souhaitons comprendre, analyser et identifier la complexité dans la gestion des projets de l'industrie 4.0 en déterminant si la complexité constitue un réel frein à l'adoption des technologies de l'industrie 4.0 puis en déterminant si un intermédiaire spécialisé ne serait pas indispensable afin d'en faciliter l'adoption par les PME manufacturières.

Pour ce faire, dans la sous-section suivante, nous allons présenter les données au sujet de Noovelia et de sa gestion de la complexité lors des projets technologiques de l'industrie 4.0

## **5.1 Présentation des résultats**

Dans cette sous-section du chapitre dédié aux résultats de notre recherche, nous allons présenter les données et les observations recueillies lors des entrevues. Évidemment, au

cours de cette présentation des données, il s'agira d'aborder les données primaires et secondaires au sujet de l'entreprise et de la recherche. Rappelons que les données secondaires ont largement été présentées dans le chapitre consacré à l'étude de cas et la collecte de données. De ce fait, nous commencerons tout de même par la présentation de données primaires puisque nous allons élaborer un tableau représentant les points saillants qui sont ressortis des entrevues, puis nous développeront davantage en donnant des explications au sujet d'autres éléments importants et relatifs à Noovelia et la complexité des projets technologiques de l'industrie 4.0.

En effet, plusieurs critères essentiels ont été évoqués tels que la diminution du taux d'obsolescence des produits technologiques, la disponibilité des compétences rares et spécifiques, l'incertitude et la complexité liée à l'évolution de l'environnement externe ou encore la difficulté de la mise en pratique de produits standards tout en ayant des capacités de personnalisation de plus en plus poussées.

*Tableau 1 : Observations et données recueillies lors des entrevues*

<p>1. Selon vous, quels sont les éléments qui rendent complexe l'intégration de technologies de l'industrie 4.0?</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Rareté et disponibilité de la main-d'œuvre</li> <li>- Difficulté de la veille concurrentielle dans le domaine industriel et technologique</li> <li>- Taux d'innovation des technologies assez élevé</li> <li>- Intégrer de produits technologiques standardiser vs des produits technologiques personnaliser</li> <li>- L'interopérabilité entre les systèmes</li> <li>- La gestion des connaissances et l'apprentissage</li> </ul>
--	--

	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Transformer les connaissances tacites en connaissances codifiées, documentées et explicites</li> <li>- Niveau de complexité des technologies à intégrer</li> </ul>
<p>2. Qu'est-ce que la complexité, en cinq critères ?</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Le désordre et la multitude de données ou d'informations à traiter</li> <li>- La variété de données ou d'informations à traiter</li> <li>- L'absence ou la multitude de solutions à une situation problématique</li> <li>- Le manque de connaissance face à une situation donnée</li> <li>- L'incapacité à visualiser de manière réelle les répercussions des mauvaises décisions à long terme</li> </ul>
<p>3. Comment gérer le risque, l'incertitude et la complexité ? Par rapport à quelles variables ?</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Grâce à l'usage d'outils technologiques</li> <li>- La standardisation, l'établissement de processus et procédés</li> <li>- L'expérience, l'expertise et la spécialisation</li> <li>- La flexibilité et l'agilité organisationnelle</li> </ul>
<p>4. Avec quels outils technologiques et managériaux avez-vous débuté votre transition vers l'industrie 4.0?</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Avec l'utilisation de technologies comme la fabrication additive, l'internet (industriel) des objets, les robots</li> </ul>

	autonomes, le Big data et la simulation virtuelle, puis évidemment l'intégration de système avec Noovelias Stack
--	--

Les clients de Noovelias sont des entreprises qui évoluent dans des secteurs où elles ont besoin d'une organisation qui fournit des produits et services unifiés et spécialisés. En effet, les clients sont souvent contraints de recourir à plusieurs intermédiaires lorsqu'ils souhaitent passer à l'industrie 4.0. Par exemple, le client peut demander la présence d'un expert en informatique, d'un autre expert en robotique ou encore en identification de produits, etc. Gérer tous ces différents intermédiaires peut devenir compliqué pour les clients.

De plus, la synergie n'est pas nécessairement présente entre les entreprises qui devront travailler ensemble, ce qui peut entraîner des complications dans l'exécution de l'ensemble du projet selon les besoins et les attentes du client. L'unité du groupe leur a permis de développer un modèle économique répondant à des besoins simples et spécifiques de clients. Le processus de numérisation d'une entreprise peut être imposé de plusieurs manières, et le processus ne devrait pas être plus compliqué pour elles, qu'il ne l'est déjà.

Noovelias a ainsi créé une valeur supplémentaire pour ses clients, créant un avantage concurrentiel important face à cette réalité. Bien entendu, la mise en œuvre d'un nouveau modèle économique entraîne des changements pour l'organisation.

Ainsi, de nouvelles activités ont été ajoutées en aval ou en amont de la chaîne de valeur pour chaque filiale. Les stratégies organisationnelles mises en œuvre par l'entreprise, comme l'organigramme flexible, ont permis de mieux gérer le changement

structurel au sein de Noovelia en établissant une synergie entre les différentes filiales. Outre les changements structurels engendrés, Noovelia a dû établir des processus et des standards permettant d'absorber cette complexité en la gérant à l'interne, afin que les clients ne se préoccupent pas de la compréhension ou des difficultés d'intégration de ces technologies.

## **5.2 Analyse des résultats**

Nous nous sommes fixé trois objectifs de recherches qui sont les suivants :

1. Comprendre si l'adoption des technologies de l'industrie 4.0 par les PME manufacturières est faible en raison de leurs complexités élevées.
2. Déterminer si un intermédiaire spécialisé permet, aux PME, de réduire le niveau de complexité lié à l'adoption des technologies de l'industrie 4.0.
3. Identifier le processus de gestion de la complexité.

Après avoir augmenté notre niveau de connaissance par rapport à la gestion des projets, à Noovelia, à la complexité et aux technologies de l'industrie 4.0 dans le secteur manufacturier, nous sommes en mesure d'analyser les résultats obtenus et nous commencerons par essayer d'expliquer dans quelles mesures, la faible adoption des technologies de l'industrie 4.0 par les PME manufacturières a un lien avec la complexité élevée des technologies.

Tout au cours de la revue de la littérature, nous avons étudié les différentes technologies qui composent l'industrie 4.0. D'abord, nous avons étudié les composantes individuellement, afin de comprendre le fonctionnement général de ces technologies. Le fait de les étudier séparément, a mis en lumière, la complexité d'adoption de ces technologies. Ce sont des technologies qui ont un même objectif, mais qui sont totalement différentes. D'ailleurs, la complexité individuelle de ces technologies est un élément qui a été indiqué à de nombreuses reprises, par les personnes clés qui nous ont renseignés au

sein de Noovelia. Elles ont apporté plus de précisions, car elles ont également évoqué, entre autres, le désordre et la multitude de données ou d'informations à traiter.

À cet égard, P.A Daniel et C. Daniel (2017) notent que les gestionnaires impliqués dans des systèmes complexes doivent faire face à des événements difficiles à prévoir ou à interpréter correctement, même rétrospectivement. Ce qui est tout à fait en accord avec le ressenti des personnes clés chez Noovelia. Mais l'expérience et leur niveau de spécialisation leur permettent de réduire cette complexité. Nous pouvons résumer la complexité par la multiplicité de facteurs à prendre en compte, l'imprévisibilité et l'émergence de ces technologies.

La figure 5 du Baromètre industriel québécois (11e édition,2020) qui présente les freins et les obstacles à l'implantation des technologies liées à l'usine intelligente fait état de plusieurs éléments essentiels qui peuvent expliquer le manque d'adoption des technologies de l'industrie 4.0 par les PME. Parmi ces éléments on distingue : le manque de temps, le manque de personnel qualifié, le manque de connaissance sur ce qui est pertinent pour l'entreprise en matière de technologie numérique, la difficulté à évaluer le retour sur investissement, ainsi que le manque de financement. Il faut comprendre que l'ensemble de ses freins et obstacles, se manifeste par de la complexité pour les entreprises et particulièrement pour les PME, qui ont moins de ressources, que les grandes entreprises. C'est également ce que traduit la figure 7 du Baromètre industriel québécois (11<sup>e</sup> édition, 2020).

En 1948, Weaver avait évoqué le principe de complexité désorganisé et de complexité organisée. Floricel et al. (2016) se sont penchés sur la complexité dynamique en se concentrant sur les processus qui génèrent des changements imprévisibles dans le système. Daniel (2010) a développé l'idée de la complexité structurelle et a fait savoir que cette complexité se concentre sur les interactions produisant des effets inattendus qui ne

peuvent être expliqués ou déduits. Les PME font face à aux deux types de complexité et qu'elles sont totalement perdues dans l'idée d'adopter les technologies de l'industrie 4.0.

Évidemment, il ne s'agit donc pas d'un manque de volonté et nous pouvons affirmer que l'adoption des technologies de l'industrie 4.0 par les PME manufacturières est faible en raison de leurs complexités élevées.

Ici, la complexité devient plus organisée et gérable avec l'intermédiation de Noovelvia. Les phénomènes de complexité dynamique pouvant survenir sont fortement atténués, si l'on prend en compte que Noovelvia est spécialisée dans la gestion des projets impliquant les technologies de l'industrie 4.0.

D'après la revue de littérature, notre analyse, nos entrevues, l'étude du cas de Noovelvia, nous pensons qu'il serait judicieux de proposer un cadre conceptuel révisé, prenant en compte, nos découvertes quant au fonctionnement de Noovelvia et la place qu'elle peut occuper en tant qu'organisation intermédiaire ayant pour rôle de réduire la complexité liée à l'adoption des technologies de l'industrie 4.0 par les PME manufacturières.

### ***5.2.1 Cadre conceptuel révisé***

Le cadre conceptuel ci-dessous est une version améliorée du cadre conceptuel initial. L'étude du cas de Noovelvia nous révèle l'importance d'impliquer un intermédiaire spécialisé dans l'industrie 4.0, dans le processus d'adoption des technologies de l'industrie 4.0.

## Le processus d'intermédiation

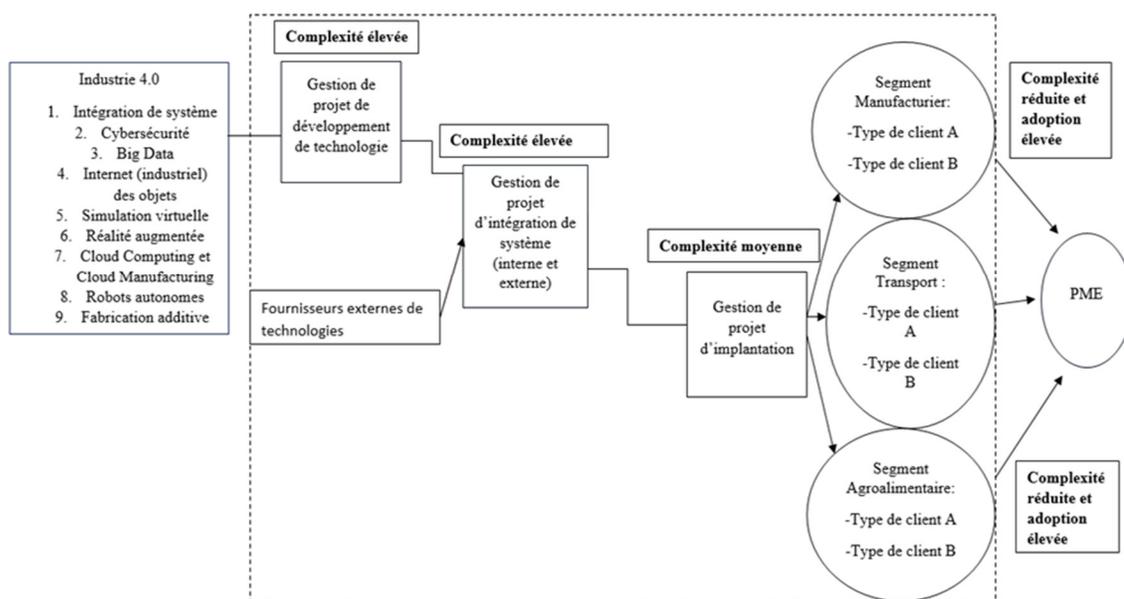


Figure 12 : Cadre conceptuel révisé

Comme cela a déjà été expliqué dans le chapitre consacré à Noovelia, c'est une entreprise qui a la capacité d'offrir une solution de base et une solution de complète, jusqu'à l'implantation des technologies et des produits chez le client. Noovelia est donc également en mesure d'offrir des solutions adaptées à l'environnement de chaque client. L'entreprise trifluvienne repose essentiellement sur trois domaines d'activités stratégiques (DAS) que sont : la gestion de développement de produit numérique et physiques, la gestion de projet d'intégration de systèmes internes et externes puis enfin la gestion des projets d'installation et d'implantation des technologies chez les clients. Il faut donc remarquer et notifier le fait que tous les produits technologiques (physiques et numériques) que Noovelia installe chez des clients sont des technologies que l'entreprise a elle-même développées et intégrées afin de créer une solution de base qui est ensuite adaptée en fonction du client.

Noovelgia a essentiellement pour client, des entreprises agroalimentaires, des entreprises de logistique & transport puis d'autres entreprises agissant également dans l'industrie manufacturière. Même s'il y a des similitudes entre deux entreprises agroalimentaires, chaque client possède des caractéristiques spécifiques à son environnement de gestion et de production. Noovelgia doit donc adapter son offre même s'il s'agit de deux entreprises évoluant exactement dans le même secteur d'activité.

L'entreprise a pris du temps à gérer toute la complexité qui émane de ces technologies et a finalement su les intégrer dans leurs processus de gestion et de production. Avec ses connaissances, ses ressources rares et distinctives, son expérience et son expertise, Noovelgia a donc su gérer cette complexité, avec le temps, et implémenter les changements nécessaires en interne. Ensuite, l'entreprise a commencé à intégrer des technologies de l'industrie 4.0 pour différents clients puisqu'elle maîtrisait, au préalable, ces technologies.

Nos interactions avec les personnes clés, nos observations ainsi que notre recherche permettent de considérer Noovelgia, comme une entreprise hautement qualifiée et spécialisée dans le domaine de l'intégration des technologies de l'industrie 4.0. Elle dispose à l'interne, des compétences et des ressources distinctives nécessaires afin de proposer une offre complète de produits et services. L'entreprise a donc une grande connaissance du paradigme de l'usine intelligente et des technologies de l'industrie 4.0. Durant ces années, Noovelgia a accumulé beaucoup d'expérience en travaillant chez de nombreux clients et avec des partenaires dans le domaine des technologies et dans celui de l'industrie manufacturière au Canada et à l'international. Hormis les connaissances pointues qui lui permettent d'intégrer des technologies complexes, cela a permis à Noovelgia d'être confronté à une multitude de situations tout aussi complexes à chaque fois qu'elle a dû intégrer des technologies chez les clients.

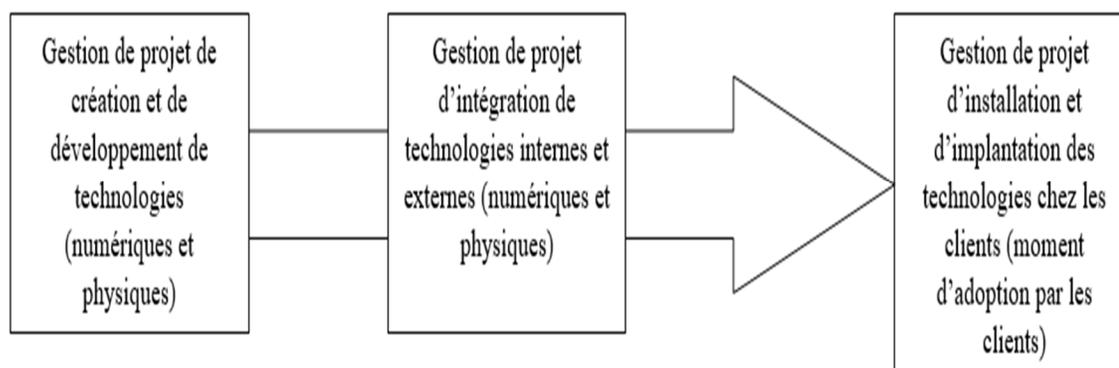
L'entreprise a donc su gérer et réduire cette complexité en intégrant elle-même les technologies de l'industrie 4.0 selon ses besoins, mais il faut noter que cette réduction de la complexité s'est effectuée de manière ordonnée et au fil du temps. Afin d'être en mesure de reproduire ces intégrations chez ses clients, l'entreprise a dû structurer ses produits et services, ainsi que la manière dont elle les développe, les intègre et les installe chez ses clients. En effet, comme nous avons pu le voir dans la revue de la littérature, Perminova et al. (2008) avaient déjà mis en avant, l'idée qu'en standardisant et en modularisant les processus et les procédures, en rendant les expériences acquises facilement accessibles au sein de l'équipe du projet, on est mieux préparé à être plus flexible en fonction des différentes situations qui se présentent. C'est exactement ce qui s'est produit au sein de Noovelia. Cela a été un moyen de pouvoir faire profiter les autres entreprises manufacturières, de son expertise et des bienfaits que l'intégration des technologies 4.0 pourrait leur apporter.

À travers son processus de création, d'intégration et de commercialisation de ses technologies, Noovelia permet de gérer la complexité en la réduisant au fur à mesure que les produits sont développés, intégrer et installer chez les clients. Noovelia peut jouer le rôle d'un intermédiaire spécialisé et hautement qualifié qui va absorber toute la complexité liée à l'intégration de technologies de l'industrie 4.0. Les clients ne sont donc pas exposés à toute la complexité liée à l'intégration de ces technologies. Permettant ainsi aux clients, ici, assimilables aux PME, d'adopter plus facilement des solutions complètes et parfaitement adaptées à leurs besoins et environnements.

Grâce à l'étude de cas approfondie de l'entreprise Noovelia, nous avons été en mesure d'identifier trois types distincts de projets complexes dans l'industrie manufacturière et 4.0, ayant un lien avec le processus de gestion de la complexité. Raison pour laquelle, nous jugeons important d'étudier plus en profondeur ces types de projets complexes. Il s'agit premièrement des projets complexes dont l'objectif est uniquement de créer ou développer des produits et services technologiques utilisables par les entreprises ou les

particuliers. Ensuite, il y a un deuxième type de projet complexe qui correspond à l'intégration de composantes et système technologiques afin d'offrir des produits technologiques et innovants.

Les projets complexes d'intégrations peuvent utiliser des technologies développées à l'externe ou à l'interne. Finalement, nous pouvons affirmer qu'il existe un troisième type de projet complexe qui consiste en l'implantation et l'installation des composantes et systèmes technologiques chez les clients. Il est important de préciser que tous ces types de projets complexes peuvent être considérés comme indépendants, mais peuvent être associés ensemble de manière logique puisque cela permet à Noovelgia de développer des produits et services qui sont installés chez les clients par les soins de l'entreprise.



*Figure 13 : Les types de projets complexes utilisés par Noovelgia*

Dans un souci de clarification de la typologie que nous proposons, voici un tableau qui, en fonction de caractéristiques, illustre et fait ressortir les différences fondamentales que nous avons pu identifier entre les trois types de projets complexes.

Il s'agit donc de comparer ici les projets complexes de création de technologies, les projets complexes d'intégration de systèmes et de composants technologiques et enfin les projets d'implantation et d'installation des technologies chez les clients. Nous nous

sommes penchés sur une dizaine de caractéristiques dont l'objectif, la vision, le nombre de parties prenantes impliqué, les personnes clés impliquées, les compétences clés requises, le processus d'action général du type de projet, la quantité de données à traité durant le projet, le type de leadership adéquat à adopté, les activités clés du type de projet et finalement, nous nous sommes intéressés au niveau de complexité aperçue par les PME. La complexité reste élevée au début et diminue lors des projets d'installation et d'implantation des technologies chez les clients.

Tableau 2: Typologie de projet complexe et technologique de l'industrie 4.0

Caractéristiques	Projet complexe de création de technologies	Projet complexe d'intégration de composants et systèmes technologiques	Projet complexe d'installation et d'implantation des technologies
Objectif	Création d'un produit technologique physique et/ou intangible	Intégration d'éléments technologiques physiques et/ou intangibles afin de créer un produit spécifique	Installer un produit ou une technologie dans l'environnement de travail d'un client
Vision	Orientée sur les caractéristiques du produit	Orientée sur la complémentarité et l'utilité des éléments à assembler	Orientée sur les besoins du client ainsi que son environnement de travail
Nombre des parties prenantes	Moyennement élevé	Moyennement élevé	Faiblement élevé- peu élevé
Personnes clés	Développeurs, ingénieur en génie informatique et/ou mécanique, opérateur de machine, gestionnaire de projet	Développeurs, ingénieur en génie informatique et/ou mécanique, opérateur de machine, gestionnaire de projet	Intégrateur, gestionnaire de projet (contact avec le client)
Compétences clés	Informatiques, gestion, mécanique, industrie 4.0	Informatique, gestion, mécanique, industrie 4.0	Gestion, connaissance du secteur industriel, industrie 4.0
Processus d'action	Identification du besoin-élaboration de schémas-construction de prototype-essais et validation-présentation du prototype	Identification du besoin-identification des systèmes et composants compatibles- schémas-intégration-essais et validation	Identification du besoin du client-analyse de l'environnement du client-implantation et installation des technologies
Quantité de données à traiter et exploiter	Grande	Moyenne	Faible
Type de leadership	Visionnaire-participatif-collaboratif-coach	Participatif-collaboratif-coach	Situationnel-participatif-collaboratif
Activités clés	Recherche et expérimentation-conception-codage informatique-essais/test-étalonnage-usinage-collaboration	Essais/test-assemblage-usinage-expérimentation-collaboration-codage-intégration de systèmes et composants	Étude du client et de son environnement-codage-installation et implantation-travaux mécaniques-gestion de la relation client
Niveau de complexité aperçu	Élevé	Élevé	Moyen

### 5.3 Discussion

Les résultats que nous avons obtenus permettent de répondre à notre question de recherche et nous permettent également d'atteindre nos objectifs de recherche. Puisque nous avons pu comprendre, analyser et identifier la complexité dans la gestion des projets de l'industrie 4.0. Nous avons pu confirmer qu'une des raisons principales pour lesquelles les PME manufacturières ne s'aventurent pas dans l'adoption des technologies 4.0 est leur complexité. Nous avons également prouvé qu'un intermédiaire comme Noovelia, spécialisé comme dans la gestion des technologies de l'industrie 4.0 était capables d'absorber la complexité relative à ces technologies pour en faciliter l'adoption pour les PME manufacturières. Tout cela nous a permis d'identifier le processus par lequel Noovelia parvient à diminuer cette complexité pour les clients.

Nous avons décidé d'élaborer une figure qui résume parfaitement à la fois le processus de réduction de la complexité par Noovelia et illustre également le processus d'intermédiation effectuée par Noovelia avant les clients (PME) disposent des solutions complètes. Nous pouvons observer que Noovelia se sert de toutes les 9 technologies pour créer et développer sa gamme de produits. De plus, elle intègre ces technologies pour des besoins qui lui sont propres et en ressort des produits qui peuvent profiter à d'autres clients industriels (segment transport et logistique, manufacture, agroalimentaire, etc.). Il est important de souligner ici que Noovelia répète le même processus de manière cyclique et continue, et à chaque fois en utilisant les trois projets. C'est en grande partie grâce à cette répétition qu'elle a appris à gérer et réduire la complexité émanant de la gestion des projets de l'industrie 4.0.

Raison pour laquelle la complexité est élevée lors des projets de création et d'intégration, mais est significativement réduite après l'intervention d'un organisme spécialisé et hautement qualifié comme Noovelia puisqu'elle a absorbé la complexité à travers ses processus, standards, expériences, ressources et compétences en interne. Ce

qui implique une faciliter d'adoption pour les PME qui souhaitent intégrer des technologies de l'industrie 4.0.

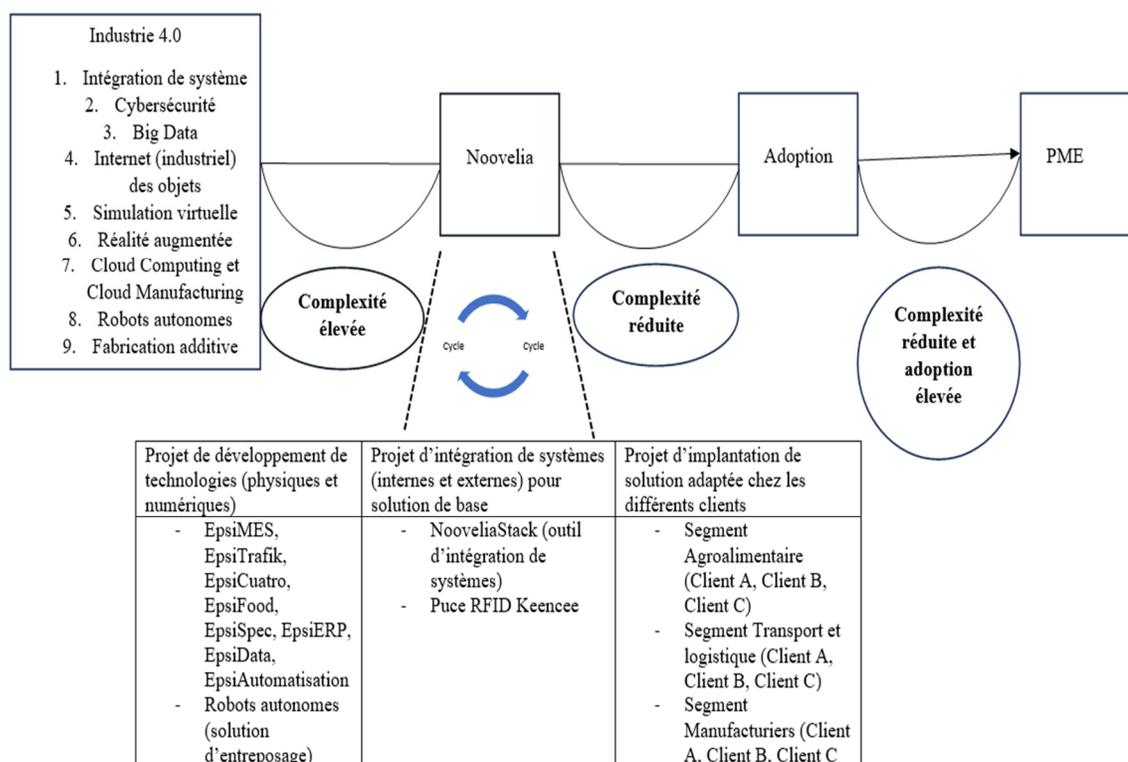


Figure 14: Processus d'intermédiation de Noovelia - adoption des technologies par les PME

## **CHAPITRE 6 : CONCLUSIONS**

Au cours de cette recherche, nous avons abordé plusieurs thématiques, dont la notion de complexité, la gestion de projet, l'incertitude et le risque, et finalement celle des technologies de l'industrie 4.0 en contexte de gestion de projet dans l'industrie manufacturière. Nous souhaitons mieux comprendre, analyser et identifier la complexité dans la gestion des projets de l'industrie 4.0.

La revue de littérature et l'étude du cas de Noovelvia ont permis de confirmer que la complexité des technologies de l'industrie 4.0 est suffisamment élevée pour constituer un obstacle pour les PME manufacturières qui souhaite les intégrer. D'après cette étude, Noovelvia est tout à fait capable de jouer le rôle d'intermédiation entre les PME manufacturières puisqu'elle a développé des connaissances, des standards, des procédures et de l'expertise autour de la gestion de la complexité de l'intégration de ces technologies. En effet, à travers ses projets de création et développement, d'intégration puis finalement d'installation et d'implantation de ces technologies, Noovelvia réussit à gérer et réduire la complexité à chaque étape du projet jusqu'à la phase d'implantation des technologies chez le client. Ces différents types de projets nous ont permis d'établir une classification de projets complexes impliquant l'intégration des technologies de l'industrie 4.0.

L'objectif ici n'est pas de présenter les résultats obtenus comme des généralités applicables à tous types de projets ou à tous types d'organisation dont le fonctionnement est basé en toute ou partie sur un mode de gestion par projet.

Les données recueillies durant cette recherche ainsi que les résultats obtenus peuvent servir de piste de réflexion de départ pour d'éventuelles études quantitatives. Ces dernières pourront établir des corrélations, des liens de causalité ou encore d'autres aspects mesurables entre la complexité, la gestion de projet ainsi que l'adoption des technologies de l'industrie 4.0. À partir de cette étude, certains acteurs de la communauté scientifique et académique pourraient décider de poursuivre les recherches dans le même sens, dans d'autres domaines d'activité impliquant la gestion de projet. Cela pourrait

conduire à une généralisation de procédure managériale, de comportement, de compétences ou d'outils technologiques ou non à mettre en œuvre afin que les PME puissent elles-mêmes, adopter les technologies de l'industrie 4.0 sans avoir recours à un intermédiaire et sans avoir les connaissances et l'expertise requise.

La complexité qui réside dans l'intégration et l'adoption des technologies de l'industrie 4.0 peut être réduite et absorbée par des organismes spécialisés, adaptés et possédant l'expertise nécessaire. La figure 15 sous-dessous exprime l'idée qu'une fois l'intervention d'un intermédiaire spécialisé et au fur et à mesure que le projet avance, la complexité sera de plus en plus réduite et l'on peut observer qu'elle est très faible au moment de la réalisation des projets d'implantations et d'installation des technologies chez les clients.

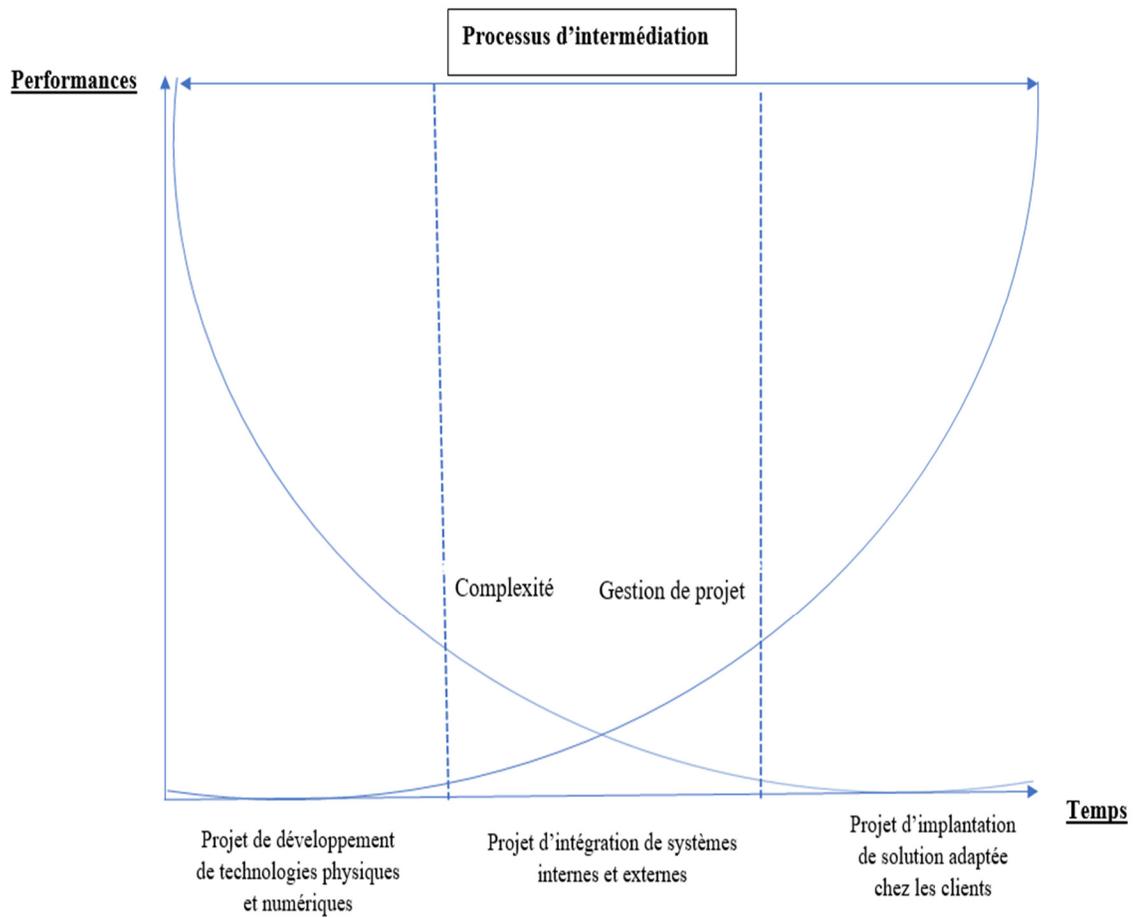


Figure 15 : Gestion de la complexité durant les projets complexes et technologiques de l'industrie 4.0

## RÉFÉRENCES

1. A. Gilchrist, Introducing Industry 4.0, in: Industrie 4.0, Apress, Berkeley, CA (2016) 195-215, [https://doi.org/10.1007/978-1-4842-2047-4\\_13](https://doi.org/10.1007/978-1-4842-2047-4_13).
2. A. Syberfeldt, M. Holm, O. Danielsson, L. Wang, R.L. Brewster (2016), Support Systems on the Industrial Shopfloor of the Future - Operator's Perspective on Augmented Reality, *Procedia CIRP* 108-113, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.02.017>.
3. A. Syberfeldt, O. Danielsson, M. Holm, L. Wang (2015). Visual Assembling Guidance Using Augmented Reality, *Procedia Manuf.* 1 98-109, <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2015.09.068>.
4. A. Weiss, A. Huber (2016). Expérience utilisateur d'un robot d'usine intelligent: Assembly line workers demand adaptative robots, in 5th International Symposium on New Frontiers in Human-Robot Interaction, <https://arXiv.org/abs/1606.03846>.
5. AGROQUÉBEC (2019). Dolbec Usine 4.0 à st-Ubalde, repéré le 20 octobre 2019 à <https://patatesdolbec.com/2018/04/02/12-m-pour-moderniser-lusine-depatatesdolbec/>
6. Anbari, F.T., Khilkhanova, E., Romanova, M., & Umpleby, S. (2004). Managing cultural differences in international projects. *Journal of International Business and Economics*, 2, 267–274
7. Angel Asensio (2017). Incertitude et prise de décision – les fondements de la Théorie Générale. ffhalshs01617181f
8. Atkinson, R. (2006). Guest editorial: Excellence in teaching and learning for project management. *International Journal of Project Management*, 24, 185–186.
9. B. Motyl, G. Baronio, S. Uberti, D. Speranza, S. Filippi (2017). How will Change the Future Engineer's Skills in the Industry 4.0 Framework ? Une enquête par questionnaire, *Procedia Manuf.* 11 15011509, <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.282>
10. Baccarini, D. (1996). The concept of project complexity - a review. *Int. J. Proj.Manag.* 14, 201–204.
11. Bakker R.M and Janowicz-Panjaitan, M (2009). Temporary Organization Prevalence, Logic and Effectiveness: Chapter 4: Time Matters: The Impact of ‘Temporariness’ on the Functioning and Performance of Organizations Edited by Patrick Kenis, Martyna Janowicz-Panjaitan and Bart Cambré.

12. Baromètre industriel québécois (2019). STIQ, 11<sup>e</sup> édition
13. Bosch-Rekvelde, M., Jongkind, Y., Mool, H., Bakker, H., and Verbraeck, A. (2011). Grasping project complexity in large engineering projects: The TOE (Technical, Organizational and Environmental) framework-, *International journal of Project Management*, vol. 29, n°6, pp. 728-739
14. Bredillet, C. (1999). Essai de définition du champ disciplinaire du management de projet et de sa dynamique d'évolution. *Revue Internationale en Gestion et Management de Projets*.
15. Bredillet, C. (2004). Theories & research in project management: Critical review and return to the future. Thèse de Doctorat, Lille Graduate School of Management (ESC Lille), France
16. Bredillet, C. (2007), Exploring Research in Project Management— Nine Schools of Project Management Research, *JUNE 2007 PROJECT MANAGEMENT JOURNAL*
17. Salkin, C., Oner M., Ustundag A., Cevikcan E. (2018). A Conceptual Framework for Industry 4.0, In *Industry 4.0: Managing the Digital Transformation*, Springer Series in Advanced Manufacturing, Springer, Cham 3-23. 10.1007/ 978-3-319-57870-5.
18. Chapman C. et Ward S. (2002). *Managing project risk and uncertainty*. Chichester, Royaume-Uni: John Wiley & Sons.
19. Chapman, C. Ward, S. (2003), *Project Risk Management - Processes, Techniques and Insights*, Wiley, Chichester
20. Chermack, T.J., (2003). Mental models in decision making and implications for human resource development. *Adv. Dev. Hum. Resour.* 5, 408–422.
21. Cleland, D.I. et Gareis, R. (2006). *GLOBAL PROJECT MANAGEMENT HANDBOOK: Planning, Organizing, and Controlling International Projects*, Second Edition Second Edition.
22. Coin des entrepreneurs (article publié le 27 novembre 2019) Qu'est-ce qu'une société Holding, <https://www.lecoindesentrepreneurs.fr/la-holding/>
23. Cooke-Davies, T., Cicmil, S., Crawford, L., Richardson, K., (2007). We're not in Kansas anymore, Toto: mapping the strange landscape of complexity theory, and its relationship to project management. *Proj. Manag. J.* 38,50–61.

24. Crawford, L. H., Hobbs, J. B., Turner, J. R. (2005). Project categorization systems: Aligning capability with strategy for better results. Newtown Square, PA: Project Management Institute
25. Crawford, L. H., Hobbs, J. B., & Turner, J. R. (2006). Aligning capability with strategy: Categorizing projects to do the right projects and do them right. *Project Management Journal*, 37(2), 38– 50.
26. Mourtzis, D., Milas V. N. (2016). Industrial Big Data as a Result of IoT Adoption in Manufacturing, *Procedia CIRP* 55 290-295, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.07.038>.
27. Mourtzis, D., Zogopoulos V., Vlachou E. (2017). Augmented Reality Application to Support Remote Maintenance as a Service in the Robotics Industry, *Procedia CIRP* 63 46-51, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.03.154>.
28. Sen, D., Ozturk, M., Vayvay, O., (2016). An Overview of Big Data for Growth in SMEs, *Procedia-Social Behav. Sci.* 235 159-167, <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2016.11.011>.
29. Daniel, P., 2010. Pilotage stratégique de projets et management des systèmes dynamiques. *Innovations* 31, 51–80
30. Davidson, P., (1991). Is probability theory relevant for uncertainty? A post Keynesian perspective. *J. Econ. Perspect.* 5, 129–143.
31. Davies, A., Brady, T., Hobday, M. (2006). Charting a path toward integrated solutions. *MIT Sloan Manag Rev*;3 (47):39-48.
32. De Geus, A. P. (1997). *The living company: Habits for survival in a turbulent business environment*. Boston: Harvard Business School Press
33. Denzin, N. K. (1978). *The research act: A theoretical introduction to sociological methods*. McGraw-Hill.
34. Zúñiga, E.R., Moris, M.U., Syberfeldt, A., (2017). Integrating simulation-based optimization, lean, and the concepts of industry 4.0, 2017 Winter Simulation Conference (WSC), Las Vegas, NV 2017 3828-3839. 10.1109/WSC.2017.8248094.
35. Tao, F., Cheng, J., Qi, Q., Zhang, M., Zhang, H., Sui, F., (2018). Digital Twin-driven product design, manufacturing and service with big data, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 94 (9-12) 3563-3576, <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0233-1>.

36. Floricel, S., Michela, J.L., Piperca, S., (2016). Complexity, uncertainty-reduction strategies, and project performance. *Int. J. Proj. Manag.*
37. Ford, J.D., Hegarty, W.H., (1984). Decision-makers' beliefs about the causes and effects of structure: an exploratory study. *Acad Manag J*1984;27:271–91.
38. Forrester, J., (1961). *Industrial Dynamics*. MIT Press.
39. Frame, J. D., (1994). *The new project management: Tools for an age of rapid change, corporate reengineering, and other business realities*. San Francisco: Jossey-Bass.
40. Frame, J. D., (2002). *The new project management*, New York: Jossey-Bass; 2 sub Edition.
41. Gareis, R., (2005). *Happy projects!*Vienna, Austria: Manz.
42. Gareis, R., & Huemann, M., (2007). Maturity models forthe project oriented company. In J. R. Turner (Ed.), *The Gower handbook of project management* (pp. 183–208). Aldershot, UK: Gower
43. Garel, G., (2003). *Le management de projet*, édition La Découverte 2003.
44. Genelot, D., (1998). *Manager dans la Complexité*, (INSEP Edition: Paris).
45. Glaser, B. G., & Strauss, A. L. (1967). *The Discovery of Grounded Theory: Strategies for Qualitative Research*. Aldine Publishing Company.
46. Guillemette, F. et Luckerhoff, J. (2012). *Méthodologie de la théorisation enracinée: Fondements, procédures et usages*. PUQ.
47. Green S.D., (2001). Vers un scénario intégré pour la gestion du risque et de la valeur. *Project Manag* 2001;1(7):52-8.
48. Heylighen, F., Cilliers, P., Gershenson, C., (2007). Complexity and philosophy. In: Bogg, J.A.R.G. (Ed.), *Complexity, Science and Society*. Radcliffe Publishing, Oxford.
49. [https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/automated-guidedvehicle-agvmarket?utm\\_source=pressrelease&utm\\_medium=referral&utm\\_campaign=sites\\_su priya\\_mar ch&utm\\_content=content/request/rs1](https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/automated-guidedvehicle-agvmarket?utm_source=pressrelease&utm_medium=referral&utm_campaign=sites_su priya_mar ch&utm_content=content/request/rs1)
50. <https://www.sap.com/canadafr/index.html?infl=955b1609-1eaa-44bf-87dd-dd8bb1b70691>

51. Makrini, I.E. et al., (2018). Working with Walt: How a Cobot Was Developed and Inserted on an Auto Assembly Line, *IEEE Robotics Autom.* 25 (2) 51- 58, <https://doi.org/10.1109/MRA.2018.2815947>
52. Chang, J., He, J., Mao, M., Zhou, W., Lei, Q., Li, X., Li, D., Chua, C.K., Zhao, X., (2018). Advanced material Strategies for Next-Generation Additive Manufacturing, *Materials* 2018 11 (1), <https://doi.org/10.3390/ma11010166>.
53. Tupa, J., Simota, J., Steiner, F., (2017). Aspects de la mise en œuvre de la gestion des risques pour l'industrie 4.0, *Procedia Manuf.* 11 1223-1230, <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.248>.
54. Saucedo-Martinez, J.A., Pérez-Lara, M., Marmolejo-Saucedo, J.A., (2017). Industry 4.0 framework for management and operations: a review, *J. Ambient Intell. Human Comput.* 9(3) 789-801, <https://doi.org/10.1007/s12652-0170533-1>.
55. Lachenmaier, J.F., Lasi, H., Kemper, H.-G., (2017). Simulation of Production Processes Involving Cyber-Physical Systems, *Procedia CIRP* 62 577-582, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.06.074>.
56. Jaafari, A., (2001). Management of risks, uncertainties and opportunities on projects: time for a fundamental shift. *Int J Project Manag*;19(2):89–101
57. Choi, K., Chung, S.-H., (2017). Enhanced time-slotted channel hopping scheduling with quick setup time for industrial Internet of Things networks, *Int. J. Distrib. Sens. Netw.* 13 (6), <https://doi.org/10.1177/1550147717713629>.
58. Knight, F. H., (1921). Risk, Uncertainty and Profit.
59. Kumar, S., Kadow, B.B. and Lamkin, M.K. (2011). Challenges with the introduction of radio-frequency identification systems into a manufacturer's supply chain-a pilot study. *Enterprise Information Systems*, 5(2): 235–253.
60. Rentzos, L., Papanastasiou, S., Papakostas, N., Chryssolouris, G., (2013). Augmented Reality for Human-based Assembly: Using Product and Process Semantics, *IFAC Proceedings Volumes* 46 (15) 98-101, <https://doi.org/10.3182/20130811-5-US-2037.00053>.
61. Zhang, L., Luo, Y., Tao, F., Li, B.H., Ren, L., Zhang, X., Guo, H., Cheng, Y., Hu, A., Liu, Y., (2014). Cloud manufacturing: a new manufacturing paradigm, *Enterprise Information Syst.* 8 (2) 167-187, <https://doi.org/10.1080/17517575.2012.683812>.

62. L'UQTR et DIVEL développeront des véhicules industriels autoguidés plus intelligents <https://www.lecoindesentrepreneurs.fr/la-holding/> Real-Time Location System Market (RTLS)by Offering (Hardware, Software,Services), Technology (RFID, Wi-Fi, UWB, BLE), Vertical (Healthcare, Manufacturing, Retail, Education, Govt., Sports), Application/Use Case, and Geography - Global Forecast to 2025
63. Le NOUVELLISTE - AFFAIRES (article publié le 19 décembre 2018) Noovelvia dans la cour des grands: création de 150 emplois prévue sur cinq ans, <https://www.lenouvelliste.ca/affaires/noovelvia-dans-la-cour-des-grands-creation-de150-emplois-prevuesur-cinq-ans-fb298a0f82b938b9a4fb852359ad77b1>
64. LES AFFAIRES (article publié le 12 novembre 2016) Deux actionnaires poids lourds pour propulser Epsilia, <https://www.lesaffaires.com/strategie-dentreprise/pme/deux-actionnairespoids-lourds-pour-propulser-epsilia-/59137038>
65. Pascal, L., Bonnet, E., et Tang, J.,(2016). « XXII. *Ikujiro Nonaka*. La théorie de la création des connaissances dans les organisations », Thierry Burger-Helmchen éd., *Les Grands Auteurs en Management de l'innovation et de la créativité*. EMS Editions, , pp. 449-468.
66. Lundin, R.A., & Söderholm, A., (1995). A theory of the temporary organization. *Scandinavian Journal of Management*,11, 437–455.
67. Andulkar, M., Le, D.T., Berger, U., (2018). A multi-case study on Industry 4.0 for SME's in Brandenburg, Germany, *Proceedings of the 51st Hawaii International Conference on System Sciences*.
68. Bortolini, M., Ferrari, E., Gamberi, M., Pilati, F., Faccio, M., (2017). Assembly system design in the Industry 4.0 era: a general framework, *IFAC-PapersOnLine* 50 (1) 5700-5705, <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.1121>.
69. Peruzzini, M., Grandi, F., Pellicciari, M., (2017). Benchmarking of Tools for User Experience Analysis in Industry 4.0, *Procedia Manuf.* 11, 806-813, <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.182>
70. Pedersen, M.R., Nalpantidis, L., Andersen, R.S., Schou, C., Bøgh, S., Krüger, V., Madsen, O., (2016). Robot skills for manufacturing: from concept to industrial deployment, *Rob. Comput. Integr. Manuf.* 37 282-291, <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2015.04.002>.
71. March, J.G., (1981). Footnotes to organizational change. *Admin Sci Quart*;26:563-77

72. Maylor et al (2008). Managerial Complexity in Project-Based Operations: A Grounded Model and Its Implications for Practice. *Project Management Journal* 39(S1):S15 - S26.
73. Rüßmann, M., Lorenz, M., Gerbert, P., Waldner, M., Justus J., Engel P., and Harnisch, M., (2015). April 09 2015. Industry 4.0: The Future of Productivity and Growth in Manufacturing Industries
74. Moray, N., (1998). Identifying mental models of complex human-machine systems. *Int. J. Ind. Ergon.* 22, 293–297.
75. Morecroft, J.D.W., (1983). System dynamics: portraying bounded rationality. *Omega* 11, 131–142.
76. Morin, E., (2005). Complexité restreinte, complexité générale. In *Intelligence de la complexité: épistémologie et pragmatique, Colloque de Cerisy* (pp. 28-50). <https://archive.mcxapc.org/docs/conseilscient/1003morin.pdf.pdf>
77. Morris, P.W.G. (1997). *The management of projects* (2nd ed.). London: Thomas Telford.
78. Morris, P.W.G., (2010). A brief history of project management, Chapter 1. In: Morris, P.W.G., Pinto, J.K., Söderlund, J. (Eds.), *The Oxford Handbook of Project Management*. Oxford University Press, New York, pp. 35–59.
79. NEO UQTR (article publié le 22 novembre 2018).
80. Nikander, I.O., Eloranta, E., (1997). Preliminary signs and early warnings in industrial investment projects. *Int J Project Manag*; 15(6):371–6.
81. Ning, H.S., Zhang, Y. et Liu, F.L., (2006). Research on China Internet of things' services and management. *Acta Electronica Sinica*, 34(12): 2514–2517.
82. NOOVELIA INC., (2019). À propos de Noovelia, <https://www.noovelia.com/frca/a-propos>
83. NOOVELIA INC., (2019). Démarche du plan stratégique, orientation, marché, compétition, partenariats, etc. Présentation PowerPoint inédite fournit par Noovelia. <https://www.noovelia.com/frca/accueil>
84. NOOVELIA INC., (2019). Offre de Diver <https://www.noovelia.com/frca/divel>
85. NOOVELIA INC., (2019). Page d'accueil de Noovelia, <https://www.noovelia.com/fr-ca/accueil>

86. NOOVELIA INC., (2019). Présentation du nouveau groupe, grands objectifs d'affaires et financier, gouvernance de l'entreprise, stratégies de commercialisation, communication et opérationnelle. Présentation PowerPoint inédite fournie par Noovelia.
87. Perminova, O., Gustafsson, M., Wikstrom, K., (2007). Defining Uncertainty in Projects – A New Perspective. January 2008 International Journal of Project Management 26: 73-79.
88. Fraga-Lamas, P., Fernández-Caramés, T.M., Blanco-Novoa, Ó., Vilar Montesinos, M.A., (2018). A Review on Industrial Augmented Reality Systems for the Industry 4.0 Shipyard, IEEE Access 6 13358-13375. 10.1109/ ACCESS.2018.2808326.
89. Horčejší, P., (2015). Système de réalité augmentée pour la formation virtuelle à l'assemblage de pièces, Procedia Eng. 100 699-706, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.01.422>.
90. Daniel, P.A., Daniel, C., (2017). Complexity, uncertainty and mental models: From a paradigm of regulation to a paradigm of emergence in project management / International Journal of Project Management (August 2017).
91. Padalkar, M., Gopinath, S., (2016a). Are complexity and uncertainty distinct concepts in project management? A taxonomical examination from literature. Int. J. Proj. Manag. 34, 688– 700.
92. Padalkar, M., Gopinath, S., (2016b). Six decades of project management research: thematic trends and future opportunities. Int. J. Proj. Manag. 34, 1305–1321.
93. PATATES DOLBEC, (2019). 12m pour moderniser l'usine de Patates Dolbec, <https://patatesdolbec.com/2018/04/02/12-m-pour-moderniser-lusine-depatatesdolbec/>
94. Patton, M.Q., (1990). Qualitative evaluation and research methods. SAGE Publications.
95. Pinto, J.K., Winch, G., (2016). The unsettling of “settled science”: the past and future of the management of projects. Int. J. Proj. Manag. 34, 237–245.
96. Project Management Institute, (2017). *A Guide to the Project Management Body of Knowledge, Sixth Edition*, Newtown Square, PA, Project Management Institute,.
97. Pollack, J. et Adler, D., (2016). Skills that improve profitability: The relationship between project management, IT skills, and small to medium enterprise profitability. International Journal of project management July 2016, Pages 831-838.

98. Project Management Institute, (2004). A Guide to the Project Management Body Of Knowledge, PMI, Newtown Square, PA.
99. Project Management Institute, (2002). The project manager competency development framework. NewtownSquare, PA.
100. Qazi, A., Quigley, J., Dickson, A., Kirytopoulos, K., (2016). Project complexity and risk management (ProCRiM): towards modelling project complexity driven risk paths in construction projects. *Int. J. Proj. Manag.* 34,1183–1198.
101. Palmarini, R., Erkoyuncu, J.A., Roy, R., Torabmostaedi, H., (2018). A systematic review of augmented reality application in maintenance, *Rob. Comput. Integr. Manuf.* 49 215-228, <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2017.06.002>.
102. Babiceanu, R.F., Seker, R., (2016). Big Data and virtualization for manufacturing cyberphysical systems: a survey on the current status and future outlook, *Comput. Ind.* 81 128-137, <https://doi.org/10.1016/j.compind.2016.02.004>.
103. REGISTRAIRE DES ENTREPRISES DU QUÉBEC, (2019). Noovelia, [https://www.registreentreprises.gouv.qc.ca/RQAnonymeGR/GR/GR03/GR03A2\\_19\\_A\\_PIU\\_RechEnt\\_PC/PageEtatRens.aspx?T1.JetonStatic=f4b7ce2b-bf0b-4813-b415-93500aff661&T1.CodeService=S00436](https://www.registreentreprises.gouv.qc.ca/RQAnonymeGR/GR/GR03/GR03A2_19_A_PIU_RechEnt_PC/PageEtatRens.aspx?T1.JetonStatic=f4b7ce2b-bf0b-4813-b415-93500aff661&T1.CodeService=S00436)
104. Palmarini, R., Erkoyuncu. J.A., Roy, R., (2017). An Innovate Process to Select Augmented Reality (AR) Technology for Maintenance, *Procedia CIRP*, Volume 59, pp. 23-28, ISSN 2212-8271, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.10.001>.
105. Rouse, W.B., Morris, N.M., (1986). On looking into the black box: prospects and limits in the search for mental models. *Psychol. Bull.* 100, 349–363.
106. Ruona, W.E.A., Lynham, S.A., (2004). A philosophical framework for thought and practice in human resource development. *Hum. Resour. Dev. Int.* 7,151–164.
107. S. Yin, O. Kaynak, (2015). Big Data for Modern Industry: Challenges and Trends [Point de vue], in: *Proceedings of the IEEE* 103 (2) 143-146, <https://doi.org/10.1109/JPROC.2015.2388958>.
108. Sanders, T.I., (1998). *Strategic Thinking and the new Science: Planning in the Midst of Chaos Complexity and Change*. Free Press, New York
109. Sargut, G. & Mcgrath, R., (2011) Learning to live with complexity. *Harvard Business Review* 89(9):68-76, 136.

110. Schrader, S., Riggs, W.M., Smith, R.P., (1993). Choice over uncertainty and ambiguity in technical problem solving. *J. Eng. Technol. Manag.* 10,73–99.
111. Senge, P.M., (1990). *The Fifth Discipline, the art & Practice of the Learning Organization*. Random House Business Books, London.
112. Shenhar, A.J.,& Dvir, D., (2004). How projects differ, and what to do about it. In P. W. G. Morris & J. K. Pinto (Eds.), *The Wiley guide to managing projects* (pp. 1265–1286). New York: Wiley.
113. Stark, R., Israel, J. H., and Wöhler, T., (2010). Towards Hybrid Modelling Environments – Merging Desktop-CAD and Virtual Reality technologies. *CIRP Annals-Manufacturing Technology* 59 (1): 179–182.
114. Stata, R., (1989). Organizational learning: The key to management innovation. *Sloan Management Review*,30(3), 63–74.
115. Sterman, J.D., (2001). System dynamics modeling: tools for learning in a complex world. *Calif. Manag. Rev.* 43, 8–25
116. Turner, J.R., & Cochrane, R., (1993). Goals-and-methods matrix: coping with projects with ill defined goals and/or methods of achieving them. *International Journal of Project Management*, 11, 93-102.
117. Turner, J. R., (1999). *The handbook of project based management*(2nd ed.). London: McGraw-Hill.
118. Turner, J. R., & Müller, R., (2006). *Choosing appropriate project managers: Matching their leadership style to the type of project*. Newtown Square, PA: Project Management Institute.
119. Alcácer, V. et Cruz-Machado, V., (2019). Scanning the Industry 4.0: A Literature Review on Technologies for Manufacturing Systems. *Engineering Science and Technology, an International Journal* Volume 22, Issue 3, June 2019, Pages 899-919.
120. Vidal, L.A., Marle, F., (2008). Understanding project complexity: implications on project management. *Kybernetes* 37, 1094–1110.
121. Weaver, W., (1948). Science and complexity. *Am. Sci.* 36, 536–544.
122. Weick, K. E. (1990). The vulnerable system: An analysis of the Tenerife air disaster, *Journal of Management*, Vol. 16, No. 3, p.571-593.

123. Williams, T.M, (1999). The need for new paradigms for complex projects, *International Journal of Project Management*, Volume 17, Issue 5, Pages 269-273, ISSN 0263-7863, [https://doi.org/10.1016/S0263-7863\(98\)00047-7](https://doi.org/10.1016/S0263-7863(98)00047-7).
124. Williams, T., (2002). *Modelling complex projects*. Chichester, UK: Wiley.
125. Xu, L.D., (2011a). Information architecture for supply chain quality management. *International Journal of Production Research*, 49(1): 183–198.
126. Xu, L.D., (2011b). Enterprise systems: state of the art and future trends. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 7(4): 630–640.
127. Yin, R.K., (1984). *Case Study Research; Design and Methods*. London, Sage Publications.
128. Youker, R., (1992). Managing the international project environment. *Int J Project Manag*;19:219–26/