



Barrières, leviers, défis et opportunités de l'adoption de l'Industrie 4.0 par les PME manufacturières en Chaudière-Appalaches

Rapport de recherche - CEUDO

Chercheur principal : Said Echchakoui, Professeur à l'UQAR

Cochercheure : Anissa Frini, Professeure à l'UQAR

Étudiant à la maîtrise en gestion de projet : Ozias Freddy Metohoue

Mars 2021

1. RÉSUMÉ

Le présent travail de recherche a pour objectif d'identifier les principaux leviers, défis, barrières et opportunités auxquels sont confrontées les PME manufacturières de Chaudière-Appalaches pour l'adoption de l'Industrie 4.0. Il explore spécifiquement, la vision des gestionnaires de ces PME envers l'utilité perçue, les facilités et les freins pour l'implantation de l'Industrie 4.0. Au niveau méthodologique, cette recherche se situe dans une posture épistémologique interprétativiste. Il permet de procéder à une étude descriptive qualitative à travers une recherche exploratoire grâce à des entrevues semi-dirigées avec les gestionnaires responsables (ou les employés responsables) de la transformation numérique de certaines entreprises manufacturières de Chaudière-Appalaches. Quinze (15) entrevues ont été réalisées dans la région de Chaudière-Appalaches, entre la fin septembre à la mi-octobre 2019, touchant de nombreuses questions liées à l'implantation de l'Industrie 4.0 comme les défis (barrières), les opportunités (bénéfices), les freins (risques), les prérequis, les compétences requises, l'environnement de travail et la gouvernance (gestion de changement).

L'analyse des principaux résultats révèle tout d'abord des défis (stratégiques, financiers, techniques, matériels, logistiques et de gestion des ressources humaines), des bénéfices (pour l'accroissement de la production des entreprises et une amélioration des conditions de travail), des enjeux (stratégiques, humains, financiers, technologiques et de planification), et des aptitudes (managériales, techniques et technologiques). Aussi, les résultats démontrent que l'implantation de l'Industrie 4.0 requiert des compétences opérationnelles, informatiques et managériales pour les cadres et les autres employés. Finalement, l'environnement de travail 4.0 aurait des impacts bénéfiques au profit des entreprises, de leurs employés avec de nouvelles exigences de travail pour les employés et les cadres.

Pour implanter ce nouvel environnement, les entreprises doivent s'assurer d'une bonne gestion du changement en développant de nouvelles stratégies, en élaborant de nouveaux modèles d'affaires et en se dotant d'une nouvelle culture d'entreprise, avec un leadership, une planification et une mise en œuvre conséquents.

Mots clés : Faisabilité organisationnelle, Industrie 4.0, Composantes de l'Industrie 4.0, Défis, Opportunités, Freins, Prérequis, Développement des compétences, Environnement de travail, Gouvernance.

2. INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'industrialisation est passée par quatre grandes phases et transformations majeures jusqu'à ce jour. Il y a d'abord eu en 1784 la production mécanique portée par la machine hydraulique et à vapeur, suivie ensuite en 1870 de la production de masse basée sur la division du travail et poussée par l'énergie électrique, puis en 1969 de la production automatisée soutenue par l'électronique et les technologies informatiques. Mais depuis 2011, nous vivons dans une nouvelle ère, celle de la quatrième révolution industrielle qu'on appelle l'Industrie 4.0 et qui est basée sur la digitalisation de la production ainsi que sur l'interconnexion des objets industriels intelligents.

Depuis les neuf dernières années, ce sujet novateur et pertinent à traiter qu'est l'Industrie 4.0 a intéressé plusieurs chercheurs. Bien que la littérature sur le sujet se développe de jour en jour, il n'y a pas encore de consensus réel dans la littérature scientifique autour de ce qu'est l'Industrie 4.0, ses composantes, ses bénéfices, ses défis, ses freins pour ne citer que ceux-là.

La recension d'écrits que nous avons réalisée sur l'Industrie 4.0 démontre l'existence d'au moins 34 définitions de ce qu'est l'Industrie 4.0, avec plusieurs définitions de ses composantes qui sont les systèmes cyber-physiques, l'Internet des objets, l'Internet des services et l'usine intelligente.

L'Industrie 4.0 est définie comme un nouveau paradigme de fabrication qui met fortement l'accent sur la création de produits et de processus intelligents, en ayant recours aux technologies numériques, à l'utilisation de machines intelligentes et à la transformation de systèmes de fabrication classiques en usines intelligentes dans le but de rendre les activités de fabrication plus agiles, plus souples et mieux adaptées aux besoins des clients (Pereira et Romero, 2017 ; Bédard-Maltais, 2017). L'Industrie 4.0 a quatre composantes qui sont : les systèmes cyber-physiques, l'Internet des objets, l'Internet des services, et l'usine intelligente. Les systèmes cyber-physiques sont une fusion du monde physique et virtuel par l'intermédiaire d'ordinateurs et de réseaux embarqués (Monostori *et al.*, 2016 ; Pereira et Romero, 2017) tandis que l'Internet des objets permet d'interconnecter les machines, les systèmes informatiques par une connexion Internet (Kagermann *et al.*, 2013). Par contre, l'Internet des services permet de faciliter l'accès aux technologies du web dans le but de créer et d'offrir de nouveaux services tout en améliorant les relations entre les fournisseurs et les clients (Wahlster *et al.*, 2014 ; Hofmann et Rüsçh, 2017). Finalement, l'usine intelligente permet d'avoir un environnement où l'interaction entre les êtres humains et les machines est rendue possible par l'association des systèmes cyber-physique, de l'Internet des objets et de l'Internet des services (Kagermann *et al.*, 2013 ; Hofmann et Rüsçh, 2017).

L'Industrie 4.0 offre une panoplie d'avantage à savoir une augmentation de la productivité et de la croissance (Rüßmann *et al.*, 2016 ; Lu, 2017), une production des biens de meilleure qualité et à moindre coût (Rüßmann *et al.*, 2016 ; Lu, 2017), une optimisation des processus (Chui *et al.*, 2010 ; Pereira et Romero, 2017), une coopération en temps réel entre chaque système cyber-physique de l'usine intelligente et les opérateurs (Pereira et Romero, 2017), une flexibilité (Wanga, 2015 ; Hofmann et Rüsçh, 2017), une production de masse individualisée (Hofmann et Rüsçh, 2017), une variation de produits à des prix acceptables (Wanga, 2015) et de fournir des services internes et inter organisationnels sur toute la chaîne de valeur (Hermann *et al.*, 2016 ; Pereira et Romero, 2017).

Ce sujet étant nouveau en tout point. Il est également multi-disciplinaires puisqu'il relie des domaines comme les technologies de l'information, l'informatique, la gestion de la production, etc. C'est un sujet qui demeure cependant encore méconnu par certaines entreprises, notamment les petites et moyennes entreprises (PME) comme le démontre une enquête réalisée par le Centre francophone d'informatisation des organisations (CEFRIO) en 2017 auprès de 500 dirigeants d'entreprises manufacturières à travers le Québec. Cette étude révèle qu'une entreprise manufacturière sur deux (55 %) sait qu'Industrie 4.0 représente une révolution industrielle, alors que 32 % disent n'en avoir jamais entendu parler et 13 % en ont une fausse connaissance.

Dans ce contexte et compte tenu de la littérature existante, de ce domaine de recherche qui est encore nouveau, et de la méconnaissance de l'Industrie 4.0 par les entreprises et les PME en particulier, nous avons choisi d'orienter notre sujet de recherche sur le thème de « **la faisabilité organisationnelle des projets d'implantation de l'Industrie 4.0 dans les PME manufacturières de la région de Chaudière-Appalaches** ». L'objectif général est d'identifier les principaux leviers, défis, barrières et opportunités auxquels sont confrontées les PME manufacturières de Chaudière-Appalaches pour l'adoption de l'Industrie 4.0. De cet objectif général découlent les objectifs spécifiques suivants :

- identifier les défis, les opportunités, les freins et les prérequis liés à l'implantation de l'Industrie 4.0 par les PME manufacturières ;
- comprendre les enjeux reliés aux nouvelles compétences requises liés à l'implantation de l'Industrie 4.0 par les PME manufacturières ;
- évaluer l'impact de l'Industrie 4.0 sur l'environnement de travail dans les PME manufacturières ;
- explorer les enjeux organisationnels de gestion de changement lié à l'implantation de l'Industrie 4.0 par les PME manufacturières ;
- obtenir la vision des gestionnaires des PME manufacturières sur l'adoption de l'Industrie 4.0 ;
- comparer les données de la littérature avec celles des entrevues afin de faire ressortir les similitudes et les différences.

Au niveau méthodologique, cette recherche se situe dans une posture épistémologique interprétativiste. Il s'agit d'une étude descriptive qualitative à travers une recherche exploratoire grâce à quinze (15) entrevues semi-dirigées réalisées auprès des gestionnaires responsables (ou des employés responsables) de la transformation numérique de certaines entreprises manufacturières de Chaudière-Appalaches.

La section 2 du présent document présente l'Industrie 4.0, ses différentes définitions et expose ses différentes composantes clés à savoir les systèmes cyber-physiques, l'Internet des objets, l'Internet des services, et l'usine intelligente. La section 3 expose le cadre théorique sur lequel se base cette étude. Une revue de la littérature sur les dimensions de l'Industrie 4.0, les défis, les opportunités, les freins et les compétences requises pour l'implantation de l'Industrie 4.0 est détaillée. La section 4 expose la méthodologie poursuivie. La section 5 détaille les résultats obtenus des entrevues semi-dirigées auprès des entreprises ayant ou non adopté l'Industrie 4.0. Les résultats concernent les défis, les opportunités, les freins, les prérequis, les compétences requises, l'environnement de travail et la gouvernance telle que perçue par les PME interrogées.

3. DÉFINITIONS ET COMPOSANTES DE L'INDUSTRIE 4.0

Dans cette section, nous présentons d'abord le contexte et l'historique de l'Industrie 4.0. Par la suite, nous exposons les résultats d'une revue de littérature que nous avons effectuée sur les nombreuses définitions de l'Industrie 4.0 et ses différentes composantes, clés à savoir les systèmes cyber-physiques, l'Internet des objets, l'Internet des services, et l'usine intelligente.

3.1 CONTEXTE ET HISTORIQUE DE L'INDUSTRIE 4.0

L'évolution de la révolution industrielle s'est faite en quatre grandes phases jusqu'à ce jour. La première révolution industrielle est apparue dans la seconde moitié du XVIII^e siècle et s'est intensifiée tout au long du XIX^e siècle avec l'introduction de machines à force hydraulique puis à vapeur, basée sur la production mécanique conduisant au premier métier à tisser mécanique en 1784. La deuxième révolution industrielle est apparue au début du XX^e siècle avec l'introduction de la production de masse fondée sur le principe de la division du travail (à savoir le taylorisme) et sur l'utilisation de l'énergie électrique (à savoir l'électrification) et pétrolière conduisant à la première chaîne automatisée, abattoirs de Cinicinnati en 1870. La troisième révolution industrielle également appelée « révolution numérique » a débuté au début des années 1970 avec l'introduction de l'électronique

avancée, de l'informatique et des technologies de l'information qui ont développé l'automatisation des processus de production donnant naissance au premier Automate Programmable Industriel (API), le Modicon 084 en 1969. La quatrième révolution industrielle est apparue en 2011, lorsqu'une initiative dénommée « Industrie 4.0 » — une association de représentants des milieux d'affaires, de la politique et du monde universitaire — a soutenu l'idée d'une approche visant à renforcer la compétitivité de l'industrie manufacturière allemande (Kagermann *et al.*, 2011 ; Hermann *et al.*, 2016). Celle-ci fait référence à l'introduction de nouvelles technologies dans l'industrie. Elle se base sur l'Internet des Objets, l'Internet des Services, l'Intelligence Artificielle, le *Cloud*, le *Big Data*, les Systèmes Cyber-Physiques, la virtualisation et sur l'interconnexion d'objets industriels intelligents. Le terme Industrie 4.0 est alors introduit.

En somme, la première révolution industrielle a amélioré la productivité et l'efficacité grâce à l'utilisation de la vapeur, la deuxième a permis une production de masse grâce à l'utilisation de l'électricité, tandis que la troisième a été caractérisée par l'automatisation de la production utilisant l'électronique et l'informatique (Von, 2003 ; Pereira et Romero, 2017). La quatrième révolution industrielle en émergence, souvent appelée Industrie 4.0, implique des changements rapides et bouleversants qui englobent les technologies de fabrication numérique, de communication en réseau, d'informatique et d'automatisation, ainsi que de nombreux autres domaines pertinents (Zhou *et al.*, 2016 ; Pereira et Romero, 2017). L'Industrie 4.0 entraînera de profonds changements dans les secteurs de l'industrie et de la fabrication, ce qui aura un impact important sur toutes les chaînes de valeurs et offrira un ensemble de nouvelles opportunités concernant les modèles commerciaux, les technologies de production, la création de nouveaux emplois et l'organisation du travail (Pereira et Romero, 2017). La figure 1 ci-dessous, nous illustre les quatre étapes de la révolution industrielle dans le temps depuis la seconde moitié XVIII^e siècle à nos jours.

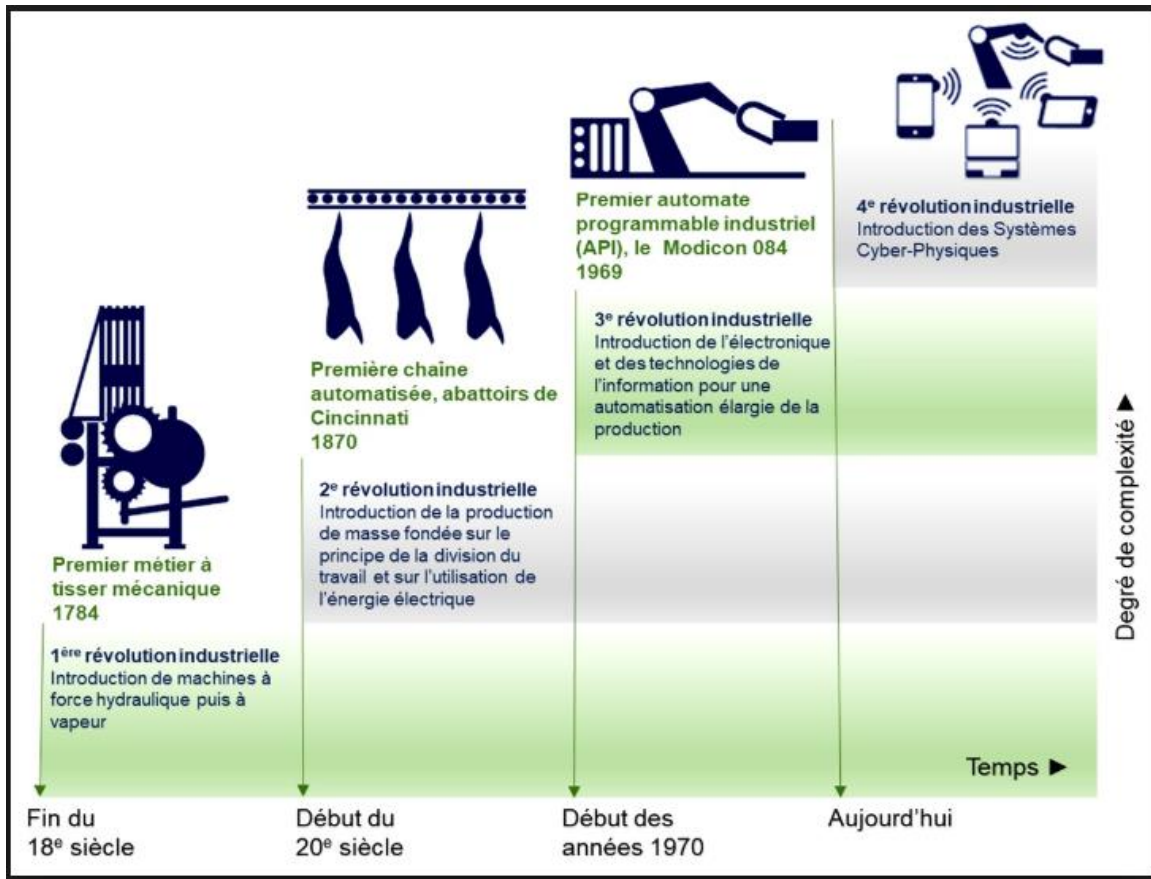


Figure 1 : Les quatre étapes de la révolution industrielle selon *Kagermann et al.* (2013)

Hofmann et Rüsçh (2017) définissent Industrie 4.0 ou la quatrième révolution industrielle comme un changement dans la logique de fabrication vers une approche de plus en plus décentralisée et autorégulée de la création de valeur, activée par des concepts et des technologies comme les systèmes cyber-physiques (CPS), l'Internet des objets (IdO), l'Internet des services (IoS), le « *cloud computing* » (l'infonuagique) ou la fabrication additive et les usines intelligentes, afin d'aider les entreprises à répondre aux exigences de la production future.

Certains des experts sont convaincus que la quatrième révolution industrielle va changer les industries actuelles de manière significative. D'autres soutiennent que l'Industrie 4.0 est juste un terme collectif pour des technologies et des concepts connus et appliqués depuis déjà un certain temps. Selon ses promoteurs, l'initiative Industrie 4.0 vise à préparer l'industrie à l'avenir de la fabrication, qui sera caractérisé par exemple par une individualisation des produits, l'intégration des clients et des partenaires commerciaux dans

le processus de création de la valeur et une fusion du monde virtuel et physique grâce aux systèmes cyber-physiques (CPS), l'Internet des objets (IdO) et l'Internet des services (IoS) (Hofmann et Rüsçh, 2017).

2.2 L'INDUSTRIE 4.0 AU CANADA ET AU QUEBEC

D'après un sondage réalisé par la Banque de Développement du Canada (BDC) auprès de quelque 1 000 entrepreneurs afin de comprendre comment les Petites et Moyennes Entreprises (PME) manufacturières canadiennes intègrent les technologies numériques dans leurs activités, il ressort que près de 40 % des PME manufacturières canadiennes ont mis en œuvre des projets 4.0. Parmi celles-ci, 3 % ont entièrement numérisé leur production et une autre tranche de 17 % en est à l'étape de la planification (Bédard-Maltaï, 2017). Bien que ces données soient globalement encourageantes, les fabricants canadiens ont encore beaucoup de chemin à faire dans leur transformation numérique. Le fait que 42 % d'entre eux n'ont pas encore amorcé ce virage, alors que leurs concurrents aux États-Unis, en Europe et en Asie s'y sont déjà fermement engagés, est particulièrement préoccupant (Bédard-Maltaï, 2017).

Les entreprises du Québec ont entrepris le passage au numérique dans une proportion plus grande que celle des autres provinces (Québec 45 % ; Prairies 44 % ; Colombie-Britannique 39 % ; Ontario 39 % ; Alberta 35 % ; Atlantique 32 %). Pour ce qui est des secteurs, les produits divers sont à l'avant-plan (produits divers 46 % ; produits industriels 43 % ; matériaux 40 % ; biens de consommation cyclique 32 % ; aliments et boissons 28 %) (Bédard-Maltaï, 2017). Cette catégorie comprend les fabricants de produits simples et personnalisables, comme les enseignes, les jouets et les bijoux, ainsi que les fabricants de biens plus complexes adaptés à l'utilisateur, comme les appareils médicaux (Bédard-Maltaï, 2017).

Toujours d'après sondage réalisé par la Banque de Développement du Canada (BDC), les entreprises qui investissent le plus bénéficient de meilleures perspectives de croissance ; elles ont plus de facilité à mettre en œuvre les technologies numériques et sont mieux préparées à l'adoption des nouvelles technologies. Le sondage indique également que les entreprises qui prévoient une croissance de leurs revenus de 10 % ou plus au cours de chacune des trois prochaines années ont réalisé des investissements plus élevés. Cependant, les investissements dans ces technologies demeurent faibles dans l'ensemble, signe que les fabricants canadiens ont encore beaucoup à faire pour rattraper leurs concurrents à l'international. Seuls 5 % des adopteurs, essentiellement de moyennes entreprises de plus grande taille dont le chiffre d'affaires s'élève à 10 millions de dollars ou plus, ont investi plus d'un million de dollars. En revanche, 41 % des répondants ont investi moins de 50 000 \$ (Bédard-Maltaï, 2017).

Le concept de l'Industrie 4.0 est encore méconnu par une grande partie des entreprises manufacturières québécoises, qui sont pourtant concernées au premier chef par cette nouvelle révolution. Une enquête réalisée par le Centre francophone d'informatisation des organisations (CEFRIO) auprès de 500 dirigeants d'entreprises manufacturières à travers le Québec a permis de dresser un état d'avancement de cette révolution industrielle (CEFRIO, 2017). Des résultats obtenus en 2017, il ressort ce qui suit :

- plus d'une entreprise manufacturière sur deux (55 %) sait qu'Industrie 4.0 représente une révolution industrielle, mais 32 % disent n'en avoir jamais entendu parler et 13 % en ont une connaissance fautive. Ces dernières l'associent à tort à une chaîne de production connectée en 4 G ou à un groupement de quatre entreprises du même domaine industriel. Ce constat est plus marqué parmi les petites entreprises de 10 à 19 employés.
- une fois la définition d'Industrie 4.0 partagée avec l'ensemble des répondants, près du tiers des dirigeants sondés (30 %) estiment qu'elle aura une incidence très ou assez forte sur leur entreprise au cours de la prochaine année, et 43 % pensent que cet effet se produira au cours des trois prochaines années. Notons que les entreprises qui connaissaient déjà l'Industrie 4.0 sont relativement plus nombreuses à être d'avis que cette transformation les affectera très ou assez fortement au cours des trois prochaines années (55 %), voire de la prochaine année (37 %).
- les trois quarts environ des dirigeants d'entreprises manufacturières voient dans l'Industrie 4.0 une occasion d'améliorer leurs processus de production (74 %) ou de gestion (72 %). Les deux tiers (63 %) considèrent cette révolution comme une occasion d'améliorer leurs produits et services et, dans une moindre mesure, leurs modèles d'affaires (59 %).

Notons que les entreprises qui connaissaient déjà l'Industrie 4.0 sont plus nombreuses à y voir une occasion d'améliorer leurs processus : 82 % la considèrent comme une occasion de faire évoluer leurs processus de production, 81 %, comme une occasion d'améliorer leurs processus de gestion, 73 %, leurs produits et services, et 72 %, leur modèle d'affaires. Au final, plus de huit entreprises manufacturières sur 10 voient en l'Industrie 4.0 une occasion d'améliorer au moins un de ces quatre aspects. Parmi les entreprises de 50 employés et plus, cette proportion grimpe à 9 sur 10 environ, tandis que parmi celles de 10 à 19 employés, elle reste plus faible (74 %) (CEFRIO, 2017).

Cependant, des entreprises ont un intérêt particulier pour les nouvelles technologies comme : la robotisation, l'Internet des objets, l'infonuagique (*cloud computing*) et les données massives (*big data*). Des entreprises manufacturières québécoises, il ressort de l'enquête du CEFRIO que : près des deux tiers des dirigeants (61 %) ont de l'intérêt actuellement pour la robotisation, 48 %, pour l'Internet des objets (IdO) et 43 %, pour l'infonuagique (*cloud computing*). Toutefois, seulement 22 % s'intéressent aux données massives (*big data*) (CEFRIO, 2017).

Toutefois, il ne faut pas croire que toutes les technologies doivent nécessairement être mises en œuvre. Ce sont des « combinaisons de technologies » qui sont implantées pour répondre à un besoin précis, défini par la stratégie de la PME. Par exemple, une PME qui souhaite développer des capacités de surveillance et de contrôle d'un produit fera appel à l'Internet des objets, à la cybersécurité et à l'infonuagique dans un premier temps. Par la suite, elle développera, à partir des données collectées, un niveau de contrôle grâce à l'intégration et à la maîtrise des technologies liées aux mégadonnées (CEFRIO, 2017). Ainsi, ces combinaisons de technologies et de techniques supposent la présence d'un ensemble d'expertises rarement présent dans une PME. Une entreprise devra s'associer à des collaborateurs externes, voire établir un partenariat pour combler ses lacunes. Cependant, elle devra aussi s'assurer du développement de ses propres compétences et de son autonomie au fil de sa transition vers l'Industrie 4.0, pour que ses employés soient plus compétents et mobilisés dans la transformation numérique (Beaudoin *et al.*, 2016).

2.3 DÉFINITIONS DE L'INDUSTRIE 4.0

L'Industrie 4.0 est un concept qui a émergé ces dernières années en raison des progrès technologiques et des développements perturbateurs du secteur industriel mondial. Le terme « Industrie 4.0 » est apparu pour la première fois dans un article publié en novembre 2011 par le gouvernement allemand à la suite d'une initiative concernant la stratégie de la haute technologie pour 2020 (Zhou *et al.*, 2016 ; Pereira et Romero, 2017). Cependant, le concept de l'Industrie 4.0 a été introduit par Kagermann en 2011 dans le cadre du lancement de la stratégie de haute technologie du gouvernement allemand.

Plusieurs définitions de l'Industrie 4.0 ont été présentées par de nombreux auteurs et organismes. L'Industrie 4.0 est un sujet de plus en plus important, discuté et étudié par des universitaires et des entreprises ces dernières années. Ainsi, les Allemands désignent l'Industrie 4.0 comme la « quatrième révolution industrielle ». Elle est également connue sous le nom de « fabrication intelligente », « Internet industriel » ou « industrie intégrée » ou « industrie intelligente », et est actuellement un sujet très discuté qui aurait le potentiel d'affecter des industries entières en transformant la façon dont les marchandises sont conçues, fabriquées, livrées et payées (Hofmann et Rüsçh, 2017).

Dans cette section, nous présentons les résultats d'une revue de littérature que nous avons réalisée sur les définitions de l'Industrie 4.0. Nous avons consulté plus de 40 articles et collecté 34 définitions différentes. Notre objectif étant de regrouper les concepts communs qu'on retrouve dans les définitions et d'en établir les liens, puis de faire ressortir tous les termes clés communs possibles. Nous sommes partis du modèle d'Hermann *et al.* (2016) qui présente les concepts clés et nous l'avons adapté à partir des résultats des définitions que nous avons traitées.

Le tableau 1 recense les principales définitions de l'Industrie 4.0 évoquées dans la littérature scientifique.

Tableau 1 : Principales définitions de l'Industrie 4.0 (Traduction libre)

Auteurs	Définitions	Termes clés
Kagermann <i>et al.</i> , 2013	L'Industrie 4.0 est une stratégie de haute technologie qui représente la quatrième révolution industrielle, après l'avènement de la mécanisation, de l'électrification et de l'informatisation.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Stratégie de haute technologie ▪ Quatrième révolution industrielle ▪ Mécanisation ▪ Électrification ▪ Informatisation
Industrial Internet Consortium, 2013	L'intégration de machines et d'appareils physiques complexes avec des capteurs et des logiciels en réseau, utilisés pour prévoir, contrôler et planifier de meilleurs résultats commerciaux et sociétaux.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ L'intégration de machines et d'appareils physiques complexes avec des capteurs et des logiciels en réseau ▪ Prévoir, contrôler et planifier de meilleurs résultats commerciaux et sociétaux
Manyika <i>et al.</i> , 2013	L'époque des « systèmes cyber-physiques », des systèmes intégrant calcul, réseautage et processus physiques et comprenant une multitude de technologies couvrant les appareils mobiles, l'Internet des objets (IdO), l'intelligence artificielle (IA), la robotique, la cybersécurité et l'impression 3D.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Systèmes cyber-physiques ▪ Systèmes intégrant le calcul ▪ Mise en réseau ▪ Processus physiques ▪ Appareils mobiles ▪ Internet des objets (IdO) ▪ Intelligence artificielle (IA) ▪ Robotique ▪ Cybersécurité ▪ Impression en 3D
Lasi <i>et al.</i> , 2014	L'Industrie 4.0 décrit la numérisation et l'automatisation croissantes de l'environnement de fabrication, ainsi que la création de chaînes de valeur numériques pour permettre la communication entre les produits, leur environnement et leurs partenaires commerciaux.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Numérisation et automatisation ▪ Création de chaînes de valeur numériques ▪ Communication entre les produits, leur environnement et leurs partenaires commerciaux
Drath et Horsch, 2014	Est souvent compris comme l'application du concept générique de systèmes cyber-physiques (CPS) aux systèmes de production industriels (page 56).	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Systèmes cyber-physiques (CPS) ▪ Industrialisation
Zhou <i>et al.</i> , 2015	Comprend les tendances futures du développement de l'industrie pour mettre en place des processus de fabrication plus intelligents, notamment la confiance dans les systèmes cyber-physiques (CPS), la construction de systèmes de production cyber-physiques (CPPS), ainsi que la mise en œuvre et l'exploitation d'usines intelligentes (page 2147).	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Processus de fabrication plus intelligents ▪ Systèmes cyber-physiques (CPS) ▪ Systèmes de production cyber-physiques (CPPS)

		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Mise en œuvre et exploitation d'usines intelligentes
Pan <i>et al.</i> , 2015	L'Industrie 4.0 représente la capacité des composants industriels de communiquer entre eux (p. 1537).	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Composants industriels ▪ Communication
Weyer <i>et al.</i> , 2015	Ce nouveau paradigme industriel englobe le développement d'environnements intelligents capables de rassembler les mondes réels et virtuels grâce à l'utilisation de la CPS, intégrant des dispositifs, des machines, des modules de production et des produits, déclenchant des actions et se contrôlant de manière autonome	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Environnements intelligents ▪ Intégration du monde réel et virtuel
Kovacs <i>et al.</i> , 2016	L'essence de la conception de l'Industrie 4.0 est l'introduction de systèmes intelligents liés à un réseau, qui permettent une production autorégulée : personnes, machines, équipements et produits vont communiquer les uns avec les autres (p. 122).	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Réseau ▪ Systèmes intelligents ▪ Production autorégulée : personnes, machines, équipements et produits communiqueront entre eux
Bauernhansel <i>et al.</i> , 2016	En général, l'Industrie 4.0 implique la connexion de la production et des technologies modernes de l'information et de la communication, où des systèmes intelligents et intégrés numériquement sont supposés créer une production auto-organisée.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Connexion ▪ Production ▪ Information moderne ▪ Technologies de l'information ▪ Systèmes intelligents et intégrés numériquement
Hermann et Otto, 2016	L'Industrie 4.0 est un terme collectif désignant les technologies et les concepts d'une organisation de la chaîne de valeur.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Technologies ▪ Chaîne de valeur ▪ Terme collectif
Oesterreich et Teuteberg, 2016	Du point de vue technique, ce nouveau paradigme industriel peut être décrit comme une numérisation et une automatisation accrue de l'environnement de fabrication, en plus d'une communication accrue rendue possible par la création d'une chaîne de valeur numérique.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Numérisation ▪ Automatisation ▪ Communication ▪ Création d'une chaîne de valeur numérique
Qin <i>et al.</i> , 2016	Le concept de l'Industrie 4.0 peut être considéré comme une approche fondamentalement nouvelle qui réunira les mondes numérique et physique. Les chercheurs et les entreprises ont des points de vue différents sur le concept et les visions de l'Industrie 4.0, mais il existe un consensus sur les principaux aspects qui concernent la vision future de la fabrication : (1) usines intelligentes, (2) produits intelligents, (3) modèles commerciaux et (4) clients.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Approche fondamentalement nouvelle ▪ Mondes numériques et physiques ▪ Vision future de la fabrication ▪ Usines intelligentes ▪ Produits intelligents ▪ Modèles commerciaux ▪ Clients
Foidl et Felderer, 2016	L'Industrie 4.0 recèle un potentiel énorme, ayant un impact sur l'ensemble de la chaîne de valeur, grâce à l'optimisation des processus de production, à	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Chaîne de valeur ▪ Optimisation des processus de production

	l'amélioration de la qualité des produits, au renforcement des relations entre toutes les parties prenantes et à l'offre de nouveaux modèles commerciaux et de nouveaux modes de fonctionnement.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Amélioration de la qualité des produits ▪ Renforcement des relations entre toutes les parties prenantes ▪ Nouveaux modèles commerciaux ▪ Nouveaux modes de fonctionnement
Monostori <i>et al.</i> , 2016	L'Industrie 4.0 est un système technologique complexe qui est fondamentalement façonné par la connectivité, l'intégration et la numérisation de la production, mettant l'accent sur les possibilités d'intégrer tous les éléments dans un système à valeur ajoutée.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Système technologique complexe ▪ Connectivité ▪ Intégration ▪ Numérisation de la production ▪ Système à valeur ajoutée
Neugebauer <i>et al.</i> , 2016	Industrie 4.0 est un système technologique complexe qui est fondamentalement façonné par la connectivité, l'intégration et la numérisation de la production, mettant l'accent sur les possibilités d'intégrer tous les éléments dans un système à valeur ajoutée	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Connectivité ▪ Intégration ▪ Numérisation de la production ▪ Système à valeur ajoutée
Burritt et Christ, 2016	Un terme générique utilisé pour décrire un groupe d'avancées technologiques connectées qui constituent le fondement d'une numérisation accrue de l'entreprise (p. 27).	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Terme générique ▪ Avancées technologiques connectées ▪ Numérisation accrue de l'entreprise
Sanders <i>et al.</i> , 2016	L'Industrie 4.0 influence considérablement l'environnement de production en modifiant radicalement l'exécution des opérations. Contrairement à la planification de production conventionnelle basée sur les prévisions, l'Industrie 4.0 permet une planification en temps réel des plans de production, ainsi qu'une auto-optimisation dynamique (p. 816).	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Environnement de production ▪ Exécution des opérations ▪ Planification en temps réel des plans de production ▪ Auto-optimisation
Gerlitz, 2016	Industrie 4.0 est un outil innovant pour générer la compétitivité des affaires, soulignant sa valeur en tant que facteur essentiel de succès pour le développement et la force des entreprises dans leur ensemble.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Générer la compétitivité des affaires ▪ Développement et la force des entreprises dans leur ensemble
Kiel <i>et al.</i> , 2016	L'Industrie 4.0, appelée internationalement l'Internet des objets industriel, fait référence à l'intégration des technologies de l'Internet des objets créatrice de valeur permettant aux fabricants d'exploiter des chaînes de valeur entièrement numérisées, connectées, intelligentes et décentralisées (p. 2).	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Internet des objets industriel ▪ Technologies ▪ Numérisé ▪ Connecté ▪ Intelligent ▪ Chaînes de valeur

Barreto <i>et al.</i> , 2017	En général, l'Industrie 4.0 englobe le développement et l'intégration de technologies de l'information et de la communication innovantes dans l'industrie.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Développement ▪ Intégration ▪ Information innovante ▪ Technologies de la communication
Hofmann et Rüschi, 2017	L'Industrie 4.0 ou la quatrième révolution industrielle se définit comme un changement dans la logique de fabrication vers une approche de plus en plus décentralisée et autorégulée de la création de valeur, activée par des concepts et des technologies comme que les systèmes cyber-physiques (CPS), l'Internet des objets (IdO), l'Internet des services (IoS), le « <i>cloud computing</i> » (l'infonuagique) ou la fabrication additive et les usines intelligentes, afin d'aider les entreprises à répondre aux exigences de la production future.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Systèmes cyber-physiques (CPS) ▪ Internet des objets (IdO) ▪ Internet des services (IoS) ▪ « <i>Cloud computing</i> » (Infonuagique)
Lu, 2017	Un processus de fabrication intégré, adapté, optimisé, orienté vers le service et interopérable qui est en corrélation avec des algorithmes, des données volumineuses (<i>big data</i>) et des technologies de pointe.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Système intégré, adapté, optimisé) ▪ Processus de fabrication ▪ Algorithmes ▪ Données volumineuses / <i>Big data</i> ▪ Technologies de pointe / Hautes technologies
Mrugalski et Wyrwick, 2017	L'Industrie 4.0 peut être perçue comme une stratégie pour être compétitive à l'avenir. L'Industrie 4.0 peut être décrite plus en détail selon trois paradigmes : le produit intelligent, la machine intelligente et l'opérateur augmenté.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Stratégie ▪ Produit intelligent ▪ Machine intelligente ▪ Opérateur augmenté
Pereira et Romero, 2017	L'Industrie 4.0 est un nouveau paradigme de fabrication qui met fortement l'accent sur la création de produits et de processus intelligents, grâce à l'utilisation de machines intelligentes et à la transformation de systèmes de fabrication classiques en usines intelligentes.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Création de produits et de processus intelligents ▪ Machines intelligentes et à la transformation de systèmes de fabrication classiques en usines intelligentes
Li <i>et al.</i> , 2017 ; Thoben <i>et al.</i> , 2017	L'Industrie 4.0 repose sur l'intégration horizontale et verticale de systèmes de production reposant sur un échange de données en temps réel et sur une fabrication flexible permettant une production personnalisée.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Intégration horizontale et verticale ▪ Systèmes de production ▪ Échange de données en temps réel ▪ Fabrication flexible ▪ Production sur mesure
Prause <i>et al.</i> , 2017	L'Industrie 4.0 n'est rien de moins que la quatrième révolution industrielle, comprenant l'impression 3D, le <i>Big Data</i> , l'Internet des objets et l'Internet des services, c'est-à-dire tous les ingrédients nécessaires pour faciliter les processus de fabrication et de logistique intelligents (p. 423).	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Impression 3D ▪ <i>Big data</i> ▪ Internet des objets ▪ Internet des services ▪ Processus de fabrication ▪ Logistique intelligente

Kinzel, 2017	L'Industrie 4.0 est le nouveau mot à la mode dans l'industrie manufacturière. Il comprend l'ensemble du processus de la chaîne de valeur dans la fabrication de biens et la fourniture de services (p. 70).	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Industrie manufacturière ▪ Ensemble du processus de la chaîne de valeur dans la fabrication de biens et la fourniture de services
Preuveneers <i>et al.</i> , 2017	Ces révolutions technologiques transformeront les processus de production et de logistique en environnements d'usine intelligentes qui augmenteront la productivité et l'efficacité (p. 2).	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Processus de production et de logistique ▪ Usine intelligente ▪ Productivité ▪ Efficacité
Banque de Développement du Canada (BDC) (Bédard-Maltais, 2017).	L'Industrie 4.0 désigne le recours aux technologies numériques pour rendre les activités de fabrication plus agiles, plus souples et mieux adaptées aux besoins des clients (p. 3).	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Technologies numériques ▪ Activités de fabrication plus agiles, plus souples ▪ Besoins des clients
Centre francophone d'informatisation des organisations (CEFRIO, 2017)	L'Industrie 4.0 ou l'usine du futur est caractérisée par l'automatisation intelligente et l'intégration de nouvelles technologies dans l'ensemble de la chaîne de valeur d'une entreprise (p. 8).	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Automatisation intelligente ▪ Intégration de nouvelles technologies ▪ Chaîne de valeur d'une entreprise
CGI inc. (groupe canadien dans le domaine des services en technologies de l'information et en gestion des processus d'affaires), 2017	L'Industrie 4.0 est un regroupement d'intégration de systèmes numériques et physiques, d'Internet des objets, d'analyse de données massives, de robotique et d'impression 3 D (p. 3).	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Regroupement d'intégration de systèmes numériques et physiques ▪ Internet des objets ▪ Analyse de données massives ▪ Robotique ▪ Impression 3D
Müller <i>et al.</i> , 2018	L'Industrie 4.0 permet de préserver la compétitivité des entreprises à long terme. Cette perspective temporelle suggère d'adopter un axe stratégique pour étudier Industrie 4.0.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Compétitivité des entreprises ▪ Facteur temporel
Alekseev <i>et al.</i> , 2018	L'Industrie 4.0 est la totalité des sphères de l'économie dans laquelle les processus de production entièrement automatiques sont basés sur l'intellect artificiel et Internet crée de nouvelles machines sans participation humaine (p. 3).	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Sphères de l'économie ▪ Processus de production ▪ Basés sur l'intellect artificiel et Internet crée de nouvelles machines sans participation humaine

En analysant le tableau 1, nous remarquons que l'Industrie 4.0 est encore un concept nouveau pour lequel il n'y a pas encore de définition consensuelle. Nous constatons que chaque auteur propose sa propre définition selon sa compréhension d'où l'observation de ce grand nombre de définitions ne permettant pas d'obtenir une définition universelle reconnue pour le moment pouvant faire l'unanimité. Ainsi, malgré l'importance accordée à ce concept dans la littérature, voire le monde entier, il n'existe pas de définition formellement respectée dans la littérature (Hermann *et al.*, 2016 ; Mrugalsk et Wyrwick, 2017).

Précédemment et en se basant sur la littérature, Hermann *et al.* (2016) ont établi à partir de l'ensemble des définitions de la littérature dont ils disposaient entre 2013 et 2016 quatre principes de conception de l'Industrie 4.0 (voir figure 2). Il s'agit d'abord du principe de l'assistance technique qui regroupe l'assistance virtuelle et physique, ensuite du principe de l'interconnexion qui regroupe la collaboration, les normes et la sécurité, puis du principe de transparence de l'information qui regroupe l'analyse des données et la fourniture de l'information et enfin du principe de décision décentralisée.

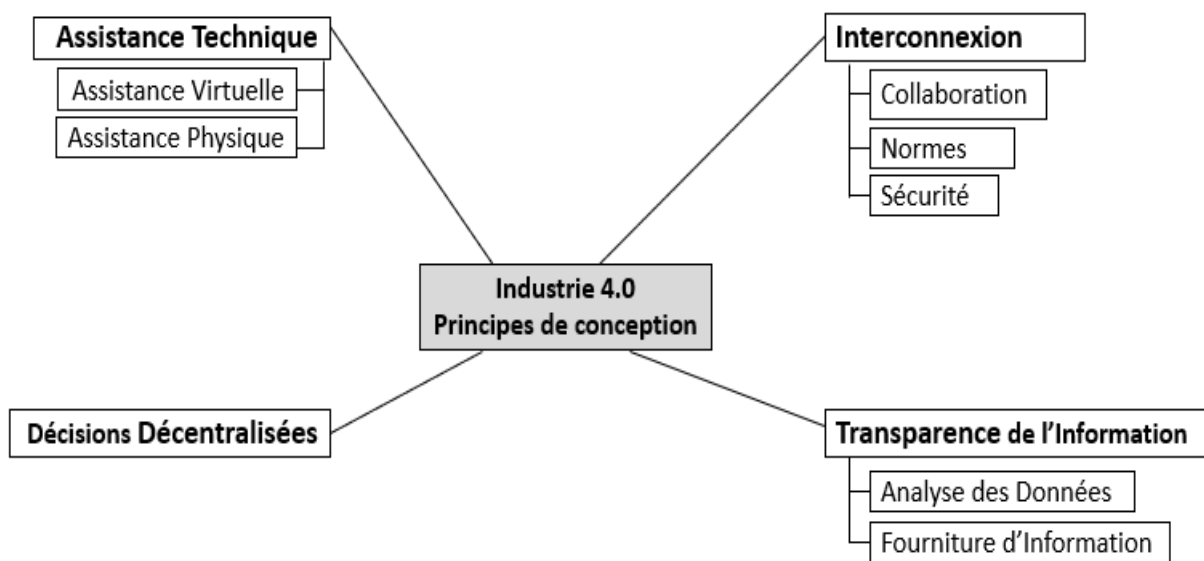


Figure 2 : Principes de conception de l'Industrie 4.0 selon Hermann *et al.* (2016)

En nous basant sur l'ensemble des définitions repérées dans la littérature, les termes clés de la troisième colonne du tableau 1 et en nous inspirant du modèle d'Hermann *et al.* (2016), nous avons regroupé, dans le tableau 2, les termes clés retenus des définitions sous plusieurs principes de conception de l'Industrie 4.0. Quatre de ces principes sont repris du modèle d'Hermann *et al.* (2016).

Tableau 2 : Extension des principes de conception d'Industrie 4.0 de Hermann *et al.* (2016)

Interconnexion	Cybersécurité
	Flexibilité
	Mise en réseau
	Numérisation
	Numérisation de la production

	Automatisation
	Connexion
	Connectivité
	Communication
	Technologies
	Technologies de communication
	Intégration
	Information innovante
	Informatisation
Transparence de l'information	Information moderne
	Technologies de l'information
	Optimisation des processus de production
	Amélioration de la qualité des produits
	Renforcement des relations entre toutes les parties prenantes
	Nouveaux modèles commerciaux
	Nouveaux modes de fonctionnement
	Avancées technologiques connectées
	Planification en temps réel des plans de production
	Générer la compétitivité des affaires
	Développement et la force des entreprises dans leur ensemble
	Création de valeur
	Processus de fabrication
	Création de produits et de processus intelligents
Intégration de nouvelles technologies	
Décision décentralisée	Exécution des opérations
	Sphères de l'économie
	Processus de production
	Processus de production et de logistique
Assistance technique	Intégration du monde réel et virtuel
	Mondes numériques et physiques
	Auto-optimisation
	Échange de données en temps réel
Composantes industrielles	Systèmes cyber-physiques
	Internet des objets

	Internet des services
	Usines intelligentes
	Produits intelligents
	Modèles commerciaux
	Clients
Technologie	Algorithmes
	Données volumineuses / Big data
	Impression 3D
	Appareils mobiles
	Robotique
	Systèmes intelligents
	Intelligence artificielle
	Systèmes intégrés numériquement
	Chaîne de valeur intelligente

Le tableau 2 inspiré de la figure 2 nous a permis d'avoir six grands groupes de principes de conception d'Industrie 4.0, dont quatre provenant du modèle de Hermann *et al.* (2016) à savoir : interconnexion, transparence de l'information, décision décentralisée et assistance technique auxquelles nous avons ajouté deux nouveaux principes à savoir : composantes industrielles et technologie. L'ensemble des six groupes de principes de conception de l'Industrie 4.0 sont issues des termes clés de l'Industrie 4.0 provenant des différentes définitions de l'Industrie 4.0. Ainsi (1) l'interconnexion regroupe par exemple la cybersécurité, l'automatisation tandis que (2) la transparence de l'information regroupe par exemple l'information moderne, les technologies de l'information, ensuite (3) la décision décentralisée regroupe par exemple l'exécution des opérations, le processus de production et de logistique puis (4) l'assistance technique regroupe par exemple l'intégration du monde réel et virtuel, l'échange de données en temps réel. De plus (5) les composantes industrielles regroupent par exemple les systèmes cyber-physiques, l'Internet des services et enfin (6) la technologie qui regroupe par exemple les algorithmes, les systèmes intelligents, le *big data*.

En revanche, grâce au logiciel VOSviewer nous avons pu réaliser une matrice des termes clés de l'Industrie 4.0 par nœud et par taille (figure 3 et 4) en nous appuyant sur les termes clés extraits des définitions (tableau 1) puis que nous avons regroupés par les principes de conception d'Industrie 4.0 (tableau 2) en nous inspirant du modèle de Herman *et al.*, 2016 (figure 2).

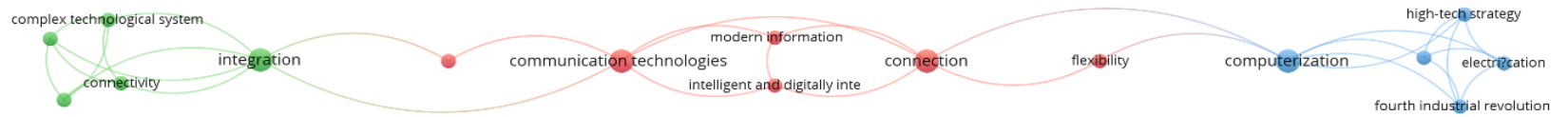


Figure 3 : Classes de terminologies des termes clés les plus importants par nœud

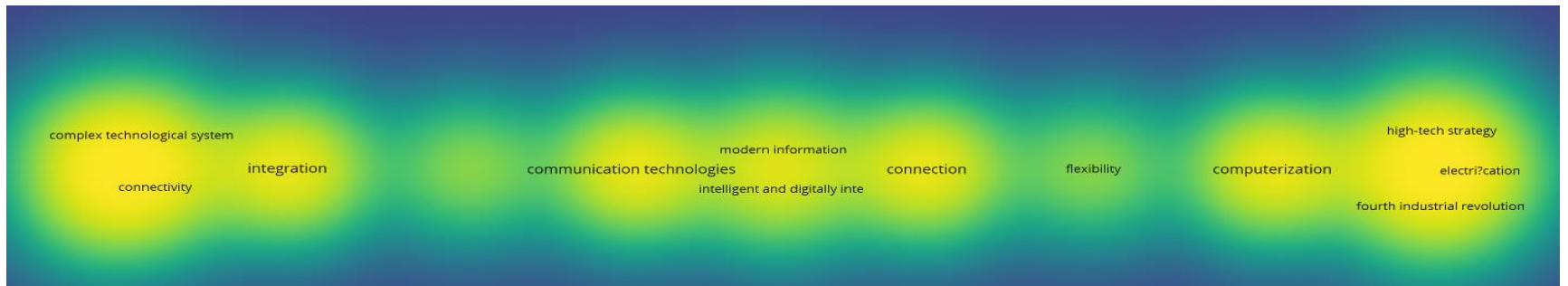


Figure 4 : Classes de terminologies des termes clés les plus importants par taille

La figure 3 montre que les termes clés les plus fréquents et pertinents peuvent être séparés en trois groupes, chacun étant identifié par une couleur distincte. Les couleurs servent uniquement pour marquer la différence entre les nœuds. Chaque groupe contient des nœuds (cercle) de mêmes couleurs et comprend des liens ou des relations (lignes) entre les nœuds. Le premier groupe (rouge) qui est d'abord le plus important regroupe le plus grand nombre de termes clés (cinq). Il comprend les termes clés comme : technologies de communication (communication technologies), information moderne (modern information), systèmes intelligents et intégrés numériquement (intelligent and digitally integrated systems), connexion (connection) et flexibilité (flexibility). Ensuite, le deuxième groupe (bleu) regroupe quatre termes clés importants. Il comprend les termes clés comme : informatisation (computerization), stratégie de haute technologie (high-tech strategy), électrification (electrification) et quatrième révolution industrielle (fourth industrial revolution). Enfin, le troisième groupe (vert) quant à lui regroupe trois termes clés importants. Il comprend les termes clés comme : système technologique complexe (complex technological system), connectivité (connectivity), intégration (integration).

Par contre, dans la figure 4, les termes clés les plus fréquents et pertinents sont classés par importance. Tout d'abord, dans le groupe de gauche les termes comme système technologique complexe (complex technological system) et connectivité (connectivity) sont plus importants que l'intégration (integration). Ensuite, dans le groupe du milieu les termes comme technologies de communication (communication technologies), information moderne (modern information), systèmes intelligents et intégrés numériquement (intelligent and digitally integrated systems) et connexion (connection) sont nettement plus importants par leur taille que la flexibilité (flexibility). Enfin, dans le groupe de droite le terme informatisation (computerization) est moins important que les termes comme stratégie de haute technologie (high-tech strategy), électrification (electrification) et quatrième révolution industrielle (fourth industrial revolution).

Cependant, dans le cadre de notre recherche, en nous basant d'une part sur les éléments clés terminologiques de la figure 3 et 4 et d'autre part sur la définition de Pereira et Romero (2017) et de Bédard-Maltais (2017) sur l'Industrie 4.0, nous constatons que ces deux dernières sont assez précises, plus claires, plus simples à comprendre et plus complètes.

En somme, en combinant les définitions de ces deux auteurs, nous définissons l'Industrie 4.0 comme un nouveau paradigme de fabrication qui met fortement l'accent sur la création de produits et de processus intelligents, en ayant recours aux technologies numériques, à l'utilisation de machines intelligentes et à la transformation de systèmes de fabrication classiques en usines intelligentes dans le but de rendre les activités de fabrication plus agiles, plus souples et mieux adaptées aux besoins des clients.

2.4 COMPOSANTES CLÉS DE L'INDUSTRIE 4.0

Les composantes clés de l'Industrie 4.0 identifiées dans la littérature sont souvent associées avec la définition de l'Industrie 4.0, voire même parfois utilisées comme synonymes pour le terme Industrie 4.0. Ils sont aussi appelés parfois « les technologies clés pour l'Industrie 4.0 » (Pereira et Romero, 2017).

Kagermann, Wahlster et Helbig, 2013 de même que Ganzarain et Errasti, 2016, décrivent six composantes clés de l'Industrie 4.0 à savoir : (1) usines intelligentes, (2) systèmes cyber-physiques, (3) auto-organisation, (4) nouveaux systèmes de distribution et d'approvisionnement, (5) nouveaux systèmes dans le développement de produits et services, (6) adaptation aux besoins humains, et la responsabilité sociale des entreprises. En revanche, Weyer et al., 2015 ont seulement préconisé trois composantes clés de l'Industrie 4.0 : (1) produit intelligent (2) machine intelligente, et (3) opérateur augmenté « *Augmented Operator* ». Pour sa part Posada *et al.*, 2015 résume et soulignent les principaux aspects traités par Industrie 4.0 en six autres composantes : (1) la personnalisation en masse des produits rendue possible par l'utilisation des technologies de l'information, (2) l'adaptation automatique et flexible des systèmes de production aux exigences changeantes, (3) le suivi et la connaissance des pièces et des produits et leur capacité à communiquer dans leur environnement, (4) l'amélioration de l'interface homme-machine, la coexistence avec des robots et l'émergence de nouveaux modes d'interaction et de fonctionnement, (5) la communication au sein de l'usine intelligente et l'optimisation de la production rendue possible par l'Internet des objets et (6) l'émergence de nouveaux services et modèles d'affaires, qui influent sur toute la chaîne de valeur. D'un autre côté, Pereira et Romero (2017) présentent trois composantes clés de l'Industrie 4.0 : (1) le système cyber-physique, (2) l'Internet des objets ou les objets connectés, (3) les services basés sur l'Internet des objets. Cependant, selon Hermann *et al.* (2016) et Hofmann et Rüsç (2017), citent les mêmes composantes que Pereira et Romero (2017) que sont : (1) le système cyber-physique, (2) l'Internet des objets, (3) les l'Internet des services objets, en y ajoutant (4) l'usine intelligente comme Kagermann, Wahlster et Helbig, 2013 et Ganzarain et Errasti, 2016.

En faisant un croisement de toutes les composantes citées par les différents auteurs ci-dessus, nous constatons que (1) le système cyber-physique, (2) l'Internet des objets, (3) l'Internet des services et (4) l'usine intelligente sont celles qui reviennent le plus. C'est ainsi que dans le tableau 3, nous retenons ces quatre composantes jugées clés de l'Industrie 4.0 qui seront détaillées dans les prochaines sections.

Tableau 3 : Composantes clés de l'Industrie 4.0 identifiées dans la littérature

Composantes	Appellation en anglais	Exemple d'auteurs
Systèmes cyber-physiques	Cyber-Physical Systems (CPS)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Lee, 2008; ▪ Rajkumar <i>et al.</i>, 2010 ; ▪ Baheti <i>et al.</i>, 2011; ▪ Bauernhansl, 2014 ; ▪ Lee, 2014 ; ▪ Lee <i>et al.</i>, 2015 ; ▪ Bagheri <i>et al.</i>, 2015 ; ▪ Shafiq <i>et al.</i>, 2015 ; ▪ Hermann <i>et al.</i>, 2016; ▪ Monostori <i>et al.</i>, 2016; ▪ Francalanza, 2017
Internet des objets	Internet of Things (IoT)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Haller <i>et al.</i>, 2008 ; ▪ Guisto <i>et al.</i>, 2010 ; ▪ Fleisch, 2010 ; ▪ Atzori <i>et al.</i>, 2010 ; ▪ Xia <i>et al.</i>, 2012 ; ▪ Chase, 2013; ▪ Kagermann <i>et al.</i>, 2013 ; ▪ Xu <i>et al.</i>, 2014 ; ▪ Borgia, 2014 ; ▪ Porter et Heppelmann, 2014 ; ▪ Hozdić, 2015 ; ▪ Shariatzadeh <i>et al.</i>, 2016 ; ▪ Nolin et Olson, 2016 ; ▪ Neugebauer <i>et al.</i>, 2016 ; ▪ Kiel <i>et al.</i>, 2016 ; ▪ Hermann <i>et al.</i>, 2016 ; ▪ Atzori <i>et al.</i>, 2017
Internet des services	Internet of Services (IoS)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Cardoso <i>et al.</i>, 2008 ; ▪ Terzidis <i>et al.</i>, 2012 ; ▪ Barros et Oberle, 2012 ; ▪ Wahlster <i>et al.</i>, 2014 ; ▪ Schmidt <i>et al.</i>, 2015 ; ▪ Plass, 2015
Usine intelligente	Smart Factory	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Lucke, 2008 ; ▪ Nasser, 2009 ; ▪ Kagermann <i>et al.</i>, 2013 ; ▪ Weyer <i>et al.</i>, 2015 ; ▪ Qin <i>et al.</i>, 2016; ▪ Pereira et Romero, 2017 ; ▪ Barreto <i>et al.</i>, 2017 ; ▪ Preuveneers <i>et al.</i>, 2017

3.1.1 LES SYSTÈMES CYBER-PHYSIQUES

La première composante de l'Industrie 4.0 est le système cyber-physique appelé en anglais Cyber-Physical Systems (CPS). Les systèmes cyber-physiques (CPS), qui sont fréquemment utilisés pour définir l'Industrie 4.0, représentent l'une des avancées les plus importantes en matière de développement de l'informatique et des technologies de l'information. Ainsi, d'après Monostori *et al.*, 2016 et Pereira et Romero, 2017, ces systèmes consistent en une interaction entre l'environnement physique et l'environnement virtuel qui permet de contrôler et coordonner les processus et les opérations et, simultanément, fournir et utiliser des données. En règle générale, le CPS peut être défini comme une technologie innovante permettant la gestion de systèmes interconnectés via l'intégration de leurs environnements physique et informatique (Lee *et al.*, 2015 et Pereira et Romero, 2017).

Cependant, Bagheri *et al.*, 2015 et Pereira et Romero, 2017 mettent l'accent sur le lien entre l'espace physique et le cyber espace en définissant les systèmes cyber-physiques comme des systèmes dans lesquels les systèmes naturels et créés par l'homme (espace physique) sont étroitement intégrés aux systèmes de calcul, de communication et de contrôle (cyber espace). De plus, un lien étroit existe entre la cybersécurité et les systèmes cyber physiques. Avec la connectivité accrue et l'utilisation des protocoles de communication standards fournis avec l'Industrie 4.0, il devient de plus en plus nécessaire de protéger les systèmes industriels critiques et les chaînes de fabrication des menaces de cybersécurité. Par conséquent, des communications sécurisées et fiables ainsi qu'une gestion sophistiquée de l'identité et de l'accès des machines et des utilisateurs sont essentielles (Rüßmann *et al.*, 2015 et Pereira et Romero, 2017).

En revanche en partant de l'idée que la fusion du monde physique et du monde virtuel est une composante importante de l'Industrie 4.0 comme l'indiquent Kagermann 2014, et Hermann *et al.*, 2016. Dans le même ordre d'idée, Lee, 2008 ; Hermann *et al.*, 2016 et Hofmann et Rüsçh, 2017 affirment que cette fusion est rendue possible par les CPS, qui sont des « intégrations de calcul et de processus physiques. C'est ainsi que les ordinateurs et les réseaux embarqués surveillent et contrôlent les processus physiques, généralement avec des boucles de rétroaction dans lesquelles les processus physiques affectent les calculs et inversement ».

Par ailleurs, pour Landherr *et al.*, 2016 et Pereira et Romero, 2017, la forte connexion du monde physique, du monde des services et du monde numérique peut améliorer la qualité des informations nécessaires à la planification, à l'optimisation et au fonctionnement des systèmes de fabrication. Alors, la décentralisation et le comportement autonome du processus de production sont les principales caractéristiques des CPS. Donc, l'évolution des CPS dépend principalement de l'adoption et de la reconfiguration des structures de produits. Ainsi, l'échange continu de données s'effectue en reliant intelligemment des systèmes cyber

physiques à l'aide de systèmes en nuage en temps réel (Stock et Seliger, 2016 ; Pereira et Romero, 2017).

En ce qui concerne leur structure, les CPS disposent de « deux réseaux parallèles à contrôler, à savoir un réseau physique de composants interconnectés de l'infrastructure et un réseau informatique composé de contrôleurs intelligents et des liaisons de communication entre eux » (Parvin *et al.*, 2013, p. 928 ; Hofmann et Rüsçh, 2017). Toujours dans sa structure, les CPS impliquent donc l'intégration de plusieurs agents réseau à savoir des capteurs, des actionneurs, des unités de traitement de contrôle et des dispositifs de communication (Parvin *et al.*, 2013 ; Bauernhans, 2014 ; Hermann *et al.*, 2016 ; Jeschke, *et al.*, 2017 ; Hofmann et Rüsçh, 2017 ; Barreto *et al.*, 2017). C'est ainsi, en effet que le développement des CPS se caractérise par trois phases. Tout d'abord, la première génération de CPS comprend des technologies d'identification telles que les étiquettes RFID, qui permettent une identification unique. Le stockage et l'analyse doivent être fournis sous forme de service centralisé. Ensuite, la deuxième génération de CPS est équipée de capteurs et d'actionneurs offrant une gamme de fonctions limitées. Enfin, les CPS de la troisième génération pouvant stocker et analyser des données sont équipés de multiples capteurs et actionneurs et sont compatibles avec les réseaux (Bauernhans, 2014, p. 16-17 ; Hermann *et al.*, 2016). Par conséquent, pour Rajkumar *et al.*, 2010 et Barreto *et al.*, 2017 les systèmes cyber-physiques (CPS) sont des systèmes physiques et techniques, dont les opérations peuvent être surveillées, coordonnées, contrôlées et intégrées par un système informatique et de communication.

De l'ensemble des 14 définitions recueillies dans la littérature sur les systèmes cyber-physiques et présentées dans l'annexe 1, la définition de Monostori *et al.*, 2016 et Pereira et Romero, 2017 semble en particulier à notre avis la plus complète, la plus claire de toutes, car elle englobe de manière générale presque tout ce qui a été dit par les auteurs précédents en mettant plus l'accent sur le monde physique et virtuel. En somme, nous retiendrons la définition de Monostori *et al.*, 2016 et Pereira et Romero, 2017 pour cette recherche.

L'annexe 1 présente les 11 définitions reprises de 9 articles traitant des systèmes cyber-physiques. À la vue de l'ensemble des définitions repérées dans la littérature, il en ressort un certain nombre de bénéfiques. Les systèmes cyber-physiques sont d'abord des mécanismes par lesquels les objets physiques et les logiciels sont étroitement liés, permettant à différents composants d'interagir de multiples façons pour échanger des informations (Lee, 2008 ; Baheti *et al.*, 2011 et Zhong *et al.*, 2017), mais aussi sont des systèmes physiques et techniques, dont les opérations peuvent être surveillées, coordonnées, contrôlées et intégrées par un système informatique et de communication (Rajkumar *et al.*, 2010 ; Bagheri *et al.*, 2015 ; Barreto *et al.*, 2017 et Vaidya, 2018). Ensuite, ils permettent aux ordinateurs et aux réseaux intégrés de surveiller et contrôler les processus physiques (Lee, 2008 ; Hermann *et al.*, 2016 et Hofmann et Rüsçh, 2017), mais ils sont encore des mécanismes capables d'échanger des informations de manière autonome, de déclencher des actions et de se

contrôler mutuellement (Kagermann *et al.*, 2013). De plus, ils assurent la gestion de systèmes interconnectés entre les actifs physiques et les capacités de calcul (Lee *et al.*, 2015) et aussi de prendre des décisions décentralisées (Hermann *et al.*, 2016). Enfin, ils permettent dans le domaine de la fabrication d'avoir des informations relatives à l'atelier physique et à l'espace de calcul virtuel de manière hautement synchronisées (Lee, 2014 et Hofmann et Rüsçh, 2017).

3.1.2 L'INTERNET DES OBJETS

La deuxième composante de l'Industrie 4.0 est l'Internet des objets (IdO) appelé en anglais Internet of Things (IoT). Ce terme « Internet des objets » est devenu populaire au début du XXI^e siècle et peut être considéré comme un initiateur de l'Industrie 4.0 (Kagermann *et al.*, 2013 et Hofmann et Rüsçh, 2017). Si bien que l'intégration de l'Internet des objets dans le processus de fabrication apparaît comme un facteur clé dans cette nouvelle industrie.

Toutefois, l'intérêt croissant suscité à l'égard de l'Internet des objets, souvent cité comme l'un des principaux moteurs de l'Industrie 4.0, a entraîné l'apparition de visions et de définitions différentes. En règle générale, selon Shariatzadeh *et al.*, 2016 et Pereira et Romero 2017, l'Internet des objets peut être défini comme la connexion Internet entre des objets physiques dans l'atelier, des personnes, des systèmes et des systèmes informatiques, créant ainsi un environnement de fabrication intelligent souvent appelé usine intelligente. Cette définition de Shariatzadeh *et al.*, 2016 est semblable à la définition de Kagermann *et al.*, 2013 dans laquelle ils définissent l'Internet des objets comme : une manifestation qui permet aux (robots et machines) et aux (téléphones intelligents, ordinateurs portables et tablettes) d'interagir et de coopérer en partageant des informations afin d'atteindre des objectifs communs.

Cependant, l'Internet des objets (IdO) est un terme émergent qui combine différentes technologies et approches, basées sur la connexion entre des objets physiques et l'Internet. Depuis la naissance d'Internet, l'interconnexion entre ordinateurs est devenue une réalité et l'évolution technologique au cours des dernières décennies a permis d'étendre l'Internet à un niveau supérieur : les objets intelligents (Kopetz, 2011 et Pereira et Romero, 2017). Par conséquent, d'après Borgia, 2014 et Pereira et Romero, 2017, l'objet intelligent est à la base d'une vision IdO. Ce nouveau paradigme consiste à doter les objets du quotidien d'intelligence, leur permettant non seulement de collecter des informations et d'interagir avec leur environnement, mais également d'être interconnectés avec d'autres objets, d'échanger des données et déclencher des actions grâce à l'Internet.

De leur côté, Kiel *et al.* (2016, p. 2) et Piccarozzi *et al.*, 2018 affirment que « l'Industrie 4.0, connue dans le monde entier comme l'Internet des objets industriel fait référence à l'intégration des technologies de création de valeur permettant aux fabricants d'exploiter des chaînes de valeur entièrement numérisées, connectées, intelligentes et décentralisées ». Dans le même ordre d'idée, mais en poussant plus loin la réflexion, Haller *et al.*, 2008 a défini l'IdO comme « un monde dans lequel les objets physiques sont intégrés de manière transparente dans le réseau d'information et dans lequel les objets physiques peuvent devenir des participants actifs dans les processus métier. Alors, les services sont disponibles pour interagir avec ces objets intelligents sur Internet, interroger leur état et toutes les informations qui leur sont associés, en tenant compte des questions de sécurité et de confidentialité ». En outre, Xu *et al.*, 2014 et Zhong *et al.*, 2017) considèrent l'IdO comme une convergence plus large de technologies de pointe telles que les normes sans fil omniprésentes, l'analyse de données et l'apprentissage automatique. Cela implique que plusieurs domaines traditionnels seront affectés par la technologie IdO, car elle est intégrée à tous les aspects de notre vie quotidienne.

Dans un tout autre registre, pour Hozdić, 2015 et Vaidya *et al.*, 2018, l'Internet des objets désigne un réseau mondial d'objets interconnecté et uniforme, qui communiquent via des protocoles standards. En conséquence, selon Neugebauer *et al.*, 2016 et Vaidya *et al.*, 2018 l'Internet des objets (IdO) devrait également être appelé Internet de tout (*Internet of everything en anglais* [IoE]), composé d'Internet de service (IoS), d'Internet des services de fabrication (IoM), d'Internet des personnes (IoP), d'un système embarqué et de l'Intégration de l'Information et de la Communication Technologie (IICT).

Atzori *et al.* (2017, p. 137) ont proposé une définition mise à jour de l'Internet des objets, affirmant qu'il s'agit « d'un cadre conceptuel qui exploite la disponibilité de dispositifs et de solutions d'interconnexion hétérogènes, ainsi que d'objets physiques augmentés pour fournir une base d'informations partagées à l'échelle mondiale, soutenir la conception d'applications impliquant au même niveau virtuel des personnes et des représentations d'objets ». Par conséquent, l'Internet des objets peut être considéré comme un des aspects d'Industrie 4.0, mais pas exactement comme un synonyme, car il constitue une composante et une technologie clé à part entière. En revanche, pour le CEFRIO, l'Internet des objets est défini par le projet de norme ISO/IEC 30141 comme étant une infrastructure d'interconnexion d'entités physiques, de systèmes, de sources d'information et de services intelligents, capables de traiter des informations du monde physique et du monde virtuel, et d'influer sur les activités du monde physique. L'Internet des objets permet alors de connecter une immense variété de ressources numériques et physiques, embarquées ou non. Le réseau ainsi formé permet de décentraliser la prise de décisions et de réagir en temps réel au niveau des CPS. Ainsi, il utilise des technologies telles que les puces RFID, les réseaux (WSN, RSN), les intergiciels (*middlewares*), et les logiciels (Beaudoin *et al.*, 2016).

Selon Porter et Heppelmann, 2016 et Hofmann et Rüschi, 2017, « les produits connectés et intelligents offrent des opportunités en croissance exponentielle pour de nouvelles fonctionnalités, une fiabilité bien supérieure, une utilisation beaucoup plus élevée des produits et des fonctionnalités qui transcendent les frontières des produits traditionnels ». De plus, les auteurs comme Nolin et Olson, 2016 et Hofmann et Rüschi, 2017 notent que l'Internet des objets « semble envisager une société dans laquelle tous les membres ont accès à un environnement Internet peuplé de technologies intelligentes auto-configurables, auto-gérées, partout et à tout moment ». Il devrait donc ouvrir de nombreuses opportunités économiques et peut être considéré comme l'une des technologies les plus prometteuses. Plus précisément, l'Internet des objets consiste en des « objets », tels que RFID, capteurs, actionneurs, téléphones mobiles, qui grâce à des schémas d'adressage uniques interagissent les uns avec les autres et coopèrent avec leurs composants « intelligents » voisins pour atteindre des objectifs communs (Guisto *et al.* [2010, p. 5] et Hermann *et al.*, 2016). En définitive, le développement et la prolifération des techniques de l'Internet des objets permettront aux objets de devenir plus intelligents, plus fiables et plus autonomes, ce qui permettra de fournir des produits et des services à valeur ajoutée (Kyriazis et Varvarigou, 2013 et Pereira et Romero, 2017).

De l'ensemble des 17 définitions recueillies dans la littérature sur l'Internet des objets et présentées dans l'annexe 2, la définition de Kagermann *et al.*, 2013 semble à notre avis la plus claire et la plus simple à comprendre, car elle fait référence aux objets physiques du quotidien de tout genre, aux personnes, aux systèmes informatiques tous reliés par la connexion Internet. En somme, nous retiendrons la définition de Kagermann *et al.*, 2013 dans le cadre de cette recherche.

L'annexe 2 présente les 17 définitions reprises de 8 articles traitant de l'Internet des objets. À la vue de l'ensemble des définitions repérées dans la littérature, il en ressort un certain nombre de bénéfiques. L'Internet des objets permet d'abord aux capteurs, actionneurs, téléphones mobiles d'interagir et coopérer les uns avec les autres et aussi avec tout système intelligent voisin (Atzori *et al.*, 2010 ; Guisto *et al.*, 2010 ; Hermann *et al.*, 2016 et Piccarozzi *et al.*, 2018). Elle utilise une technologie intégrée qui lui permet de communiquer directement ou indirectement, entre les objets ou avec Internet (Fleisch, 2010 ; Chase, 2013 ; Borgia, 2014 ; Hofmann et Rüschi, 2017 et Pereira et Romero, 2017). Elle permet également aux (robots et machines) et aux (téléphones intelligents, ordinateurs portables et tablettes) d'interagir et de coopérer en partageant des informations afin d'atteindre des objectifs communs (Kagermann *et al.*, 2013) et enfin favorise l'intégration de divers objets afin qu'ils puissent être mis en réseau et connectés pour la collecte et l'échange de données (Xia *et al.*, 2012 et Zhong *et al.*, 2017).

3.1.3 L'INTERNET DES SERVICES

La troisième composante de l'Industrie 4.0 est l'Internet des services appelé en anglais Internet of Services (IoS). Selon Wahlster *et al.*, 2014 et Hofmann et Rüschi, 2017, l'Internet des services (IoS) est en train d'émerger, sur la base de l'idée que les services sont facilement accessibles via les technologies web, ce qui permet aux entreprises et aux utilisateurs privés de combiner, de créer et d'offrir de nouveaux types de services à valeur ajoutée. Ce concept de l'Internet des services s'apparente à celui de l'Internet des objets, mais en étant appliqué aux services plutôt qu'aux entités physiques.

En revanche, du point de vue purement technologique, des concepts tels que l'architecture orientée service (SOA), le logiciel en tant que service (SaaS) ou l'externalisation des processus d'entreprise (BPO) sont étroitement liés à l'Internet des services (IoS). Barros et Oberle (2012, p. 6), proposent une définition plus large du terme service, à savoir « une transaction commerciale dans laquelle une partie accorde un accès temporaire aux ressources d'une autre partie afin d'exercer une fonction prescrite et un avantage associé. Les ressources peuvent être la main-d'œuvre et les compétences humaines, les systèmes techniques, les informations, les consommables, la terre et autres ». On peut supposer que les marchés de services basés sur Internet joueront un rôle clé dans les industries futures. C'est ainsi que dans le même ordre d'idée, d'après Cardoso *et al.*, 2008 ; Schmidt *et al.*, 2015 et Pereira et Romero, 2017, l'Internet des services peut être décrit comme un nouveau modèle commercial qui modifiera profondément la manière dont les services sont fournis, permettant une création de valeur plus élevée résultant de la relation entre tous les acteurs de la chaîne de valeur, tels que l'organisation, les clients, les intermédiaires, les agrégateurs et les fournisseurs. Par conséquent, l'Internet des services permet aux « fournisseurs de services d'offrir leurs services via Internet. Il est composé de participants, d'une infrastructure de services, de modèles économiques et des services eux-mêmes. Des services à valeur ajoutée sont offerts par divers fournisseurs ; ils sont communiqués aux utilisateurs ainsi qu'aux consommateurs et sont accessibles par différents moyens » (Buxmann et Ruggaber, 2009, p. 341). Ce développement permet une nouvelle manière de faire varier de façon dynamique la distribution des activités individuelles de la chaîne de valeur (Plattform Industrie 4.0, 2013, p. 4). Par ailleurs, il est concevable que ce concept transfère le concept d'usines uniques à des réseaux entiers à valeur ajoutée à l'avenir. Les usines peuvent aller encore plus loin et proposer des technologies de production spéciales au lieu de seulement des types de production. Ces technologies de production seront proposées via l'Internet des services et ils pourront être utilisés pour fabriquer des produits ou compenser les capacités de production (Scheer, 2013, p. 2).

Cependant, le concept d'Internet des services récemment apparu apporte de nouvelles opportunités au secteur des services, car il fournit une base commerciale et technique pour la création de réseaux d'entreprises entre fournisseurs de services et clients. De l'ensemble des 5 définitions recueillies dans la littérature sur l'Internet des services et présentées dans l'annexe 3, la définition de Wahlster *et al.*, 2014 et Hofmann et Rüschi, 2017 semble en particulier à notre avis la plus claire et la plus simple à comprendre. Elle fait référence aux services accessibles désormais via les technologies web, à la facilitation, à la création et à l'amélioration des relations fournisseurs clients dans le but de créer et de proposer de nouveaux types de services à valeur ajoutée au sein des entreprises. En résumé, nous retiendrons la définition de Wahlster *et al.*, 2014 et Hofmann et Rüschi, 2017 dans le cadre de cette recherche.

L'annexe 3 présente les 5 définitions reprises de 4 articles traitant de l'Internet des services. À la vue de l'ensemble des définitions repérées dans la littérature, il en ressort un certain nombre de bénéfiques. L'Internet des services permet d'abord de modifier profondément la manière dont les services sont fournis en permettant une création de valeur plus élevée résultant de la relation entre tous les acteurs de la chaîne de valeur, tels que l'organisation, les clients, les intermédiaires, les agrégateurs et les fournisseurs (Cardoso *et al.*, 2008 ; Schmidt *et al.*, 2015 et Pereira et Romero, 2017). En plus de créer de la valeur dans le secteur des services (Terzidis *et al.*, 2012), elle permet d'offrir des services facilement accessibles via les technologies web, permettant aux entreprises et aux utilisateurs privés de combiner, créer et proposer un nouveau type de services à valeur ajoutée (Wahlster *et al.*, 2014 et Hofmann et Rüschi, 2017). Elle permet également une utilisation des ressources comme la main-d'œuvre et les compétences humaines, les systèmes techniques, les informations, les consommables (Barros et Oberle, 2012 et Hofmann et Rüschi, 2017) et enfin permet le développement de la mise en réseau et de la communication au sein de l'IdO, qui produit ensuite de grandes quantités de données connues sous le nom de données volumineuses (*big data*) accessibles via le *cloud* (Plass, 2015).

3.1.4 L'USINE INTELLIGENTE

La quatrième composante de l'Industrie 4.0 est l'usine intelligente appelée en anglais Smart Factory. Selon Kagermann *et al.*, 2013, p. 19 et Hofmann et Rüschi, 2017, l'usine intelligente favorise une communication des systèmes cyber-physiques via l'Internet des objets et l'Internet des services, car elle repose sur l'idée d'un système de production décentralisé, dans lequel « les êtres humains, les machines et les ressources communiquent entre eux aussi naturellement que dans un réseau social ». Ainsi, dans une usine intelligente il convient de noter que les systèmes cyber-physiques, l'Internet des objets et l'Internet des services sont étroitement liés entre eux. Donc, selon Kagermann *et al.*, 2013, ces quatre composantes constituent les éléments clés de l'Industrie 4.0.

Par ailleurs pour Lucke, « l'usine intelligente est définie comme une usine qui aide les personnes et les machines à exécuter leurs tâches en fonction du contexte. Ceci est réalisé par des systèmes fonctionnant en arrière-plan, qu'on appelle *Calm systems* [...]. Alors, ces systèmes accomplissent leurs tâches en se basant sur des informations provenant du monde physique et virtuel. L'information du monde physique est par exemple la position ou l'état d'un outil, par opposition aux informations du monde virtuel telles que les documents électroniques, les dessins et les modèles de simulation. » (Lucke, 2008 et Hermann *et al.*, 2016). Dans ce contexte, le matériel d'une usine intelligente est nommé en anglais les *Calm systems*. La principale différence entre « les *Calm systems* et les autres types de systèmes réside dans la capacité de communiquer et d'interagir avec son environnement » (Lucke, Constantinescu et Westkämper, 2008, p. 115). En effet, sur la base des définitions données pour les systèmes cyber-physiques et l'Internet des objets, l'usine intelligente peut être définie comme une usine dans laquelle les systèmes cyber-physiques communiquent avec l'Internet des objets et assistent les personnes et les machines dans l'exécution de leurs tâches.

En outre, les liens étroits et la communication entre les produits, les machines, les systèmes de transport et les humains devraient modifier la logique de production existante. Par conséquent, les usines intelligentes peuvent être considérées comme une autre caractéristique clé d'Industrie 4.0. De ce fait, dans une usine intelligente, les produits trouvent leur chemin indépendamment dans les processus de production et sont facilement identifiables et localisables à tout moment, permettant ainsi d'avoir d'une production de masse rentable, tout en étant extrêmement flexible et individualisée. Kagermann *et al.* (2013, p. 21) et Hofmann et Rüsç, 2017 notent que les usines intelligentes « rendront la gestion des processus de fabrication de plus en plus complexes pour les personnes qui y travaillent et garantiront que la production puisse être simultanément attrayante, durable dans un environnement urbain et rentable ». Pourtant, le potentiel que pourraient offrir les usines intelligentes devrait être énorme. Il est important de comprendre que non seulement les processus de production, mais également les rôles des employés devraient changer radicalement. Spath *et al.*, 2013 et Hofmann et Rüsç, 2017 s'attendent à ce que les employés assument davantage de responsabilités, agissent en tant que décideurs et assument des tâches de supervision au lieu de conduire des chariots élévateurs, par exemple. Dans le même contexte, certaines critiques ont récemment souligné que la nature automatisée et autorégulatrice de l'usine intelligente pourrait entraîner des pertes d'emplois. Cependant, au meilleur de notre connaissance, il n'existe pas de recherche qui soutienne cette crainte.

Finalement, en ce qui concerne la gestion de la logistique, l'Industrie 4.0 devrait générer des opportunités en termes de décentralisation, d'autorégulation et d'efficacité. C'est ainsi que Preuveneers *et al.* (2017, p. 2) et Piccarozzi *et al.*, 2018 affirment que « ces révolutions technologiques transformeront les processus de production et de logistique en environnements d'usine intelligentes qui augmenteront la productivité et l'efficacité ». Dans

le même esprit, Weyer *et al.*, 2015 et Piccarozzi *et al.*, 2018 affirment que l'Industrie 4.0 est synonyme de la transformation des usines d'aujourd'hui en usines intelligentes qui surmontent les défis actuels en permettant un cycle de vie de produits plus court, des produits hautement personnalisés qui puissent répondre à la forte concurrence mondiale.

De l'ensemble des 7 définitions recueillies dans la littérature sur l'usine intelligente et présentées dans l'annexe 4, la définition de Kagermann *et al.*, 2013, p. 19 et Hofmann et Rüsçh, 2017 semble à notre avis la plus claire et la plus simple à comprendre. Elle montre d'une part l'existence de lien de communication entre les êtres humains et les machines dans l'exécution des tâches en fonction du contexte. D'autre part, elle permet aux employés de réaliser plus de travaux intellectuels (assurer plus de responsabilités, prendre des décisions, assurer des tâches de supervision) et moins de travaux physiques et manuels ce qui n'est pas et ne saurait être sans conséquence dans la perte ou la disparition de certains emplois. En somme, nous retiendrons la définition de Kagermann *et al.*, 2013, p. 19 et Hofmann et Rüsçh, 2017 pour cette recherche.

L'annexe 4 présente les 7 définitions reprises de 7 articles traitant de l'usine intelligente. À la vue de l'ensemble des définitions repérées dans la littérature, il en ressort un certain nombre de bénéfiques. L'usine intelligente favorise d'abord une communication des systèmes cyber-physiques via l'Internet des objets et l'Internet des services (Kagermann *et al.*, 2013 et Hofmann et Rüsçh, 2017) ensuite aide les personnes et les machines à exécuter leurs tâches en fonction du contexte (Lucke, 2008, Hermann *et al.*, 2016). Elle permet également une intégration avec les clients et les fournisseurs et une adoption de modèles commerciaux innovants (Nasser, 2009 ; Barreto *et al.*, 2017). De plus, elle consiste en une nouvelle intercommunication en temps réel intégratif entre chaque ressource de fabrication (capteurs, actionneurs, convoyeurs, machines, robots, etc.) (Qin *et al.*, 2016 et Pereira et Romero, 2017). Elle facilite la communication entre les êtres humains, les machines et les ressources comme dans un réseau social (Kagermann *et al.*, 2013 et Hofmann et Rüsçh, 2017), mais encore de contrôler et de surveiller des processus par les CPS (Pereira et Romero, 2017) et enfin d'augmenter la productivité et l'efficacité des produits (Preuveneers *et al.*, 2017 et Piccarozzi *et al.*, 2018).

4. CADRE D'ANALYSE DE L'INDUSTRIE 4.0

Dans cette section, nous présentons les résultats de la revue de la littérature sur les défis, les opportunités, les freins et les compétences requises pour l'implantation de l'Industrie 4.0. Par la suite, nous faisons un état des lieux sur les bénéfiques et défis perçus par les PME manufacturières au Canada et au Québec vis-à-vis de l'Industrie 4.0. Nous terminons cette section en présentant l'orientation que nous donnons à notre recherche.

4.1 CADRE DE RÉFÉRENCE

Le sujet de l'Industrie 4.0 étant très récent, il n'existe que très peu de modèles dans la littérature qui peuvent nous servir de cadre de référence et qui prennent en compte les aspects organisationnels liés à l'implantation de l'Industrie 4.0. Nous avons repéré quatre modèles théoriques dans la littérature à savoir les modèles de Qin *et al.* (2016), Schumacher *et al.* (2016), Pereira et Romero (2017) et enfin Schneider (2018). Le tableau 4 ci-après présente les dimensions qui sont considérées dans chacun de ces quatre modèles de la littérature. Chacun de ces modèles présente ce qu'implique l'implantation de l'Industrie 4.0 pour chaque dimension.

Tableau 4 : Dimensions d'analyse de l'Industrie 4.0 (Traduction libre)

Dimensions	Qin <i>et al.</i> (2016)	Schumacher <i>et al.</i> (2016)	Pereira et Romero (2017)	Schneider (2018)
Industrie			X	
Coopération et réseaux				X
Économie			X	
Modèles d'affaires et de marché	X		X	X
Produits et services	X	X	X	
Clients	X	X		
Usine	X			
Opérations		X		
Technologie		X		
Environnement de travail			X	
Développement des compétences/Ressources humaines/Personnes		X	X	X
Gouvernance		X		
Culture		X		
Stratégie et analyse		X		X
Planification et mise en œuvre				X
Changement et leadership		X		X

Dans les sections 3.1.1 à 3.1.4 de cette section, nous allons présenter un à un les quatre modèles cités plus haut.

4.1.1 MODÈLE DE QIN ET AL. (2016)

Le premier modèle de Qin *et al.* (2016) regroupe quatre dimensions pour l'analyse de l'implantation de l'Industrie 4.0, ainsi que quelques exemples d'éléments qui supportent la compréhension de chacun d'eux. Ces dimensions sont : (1) usine, (2) affaires, (3) produits et (4) clients. Ainsi, les quatre dimensions du modèle suggérées par Qin *et al.* (2016) se détaillent comme suit :

- **Usine :**
 - intégrer de nouvelles ressources de fabrication (capteurs, actionneurs, machines, robots, convoyeurs, etc.) de sorte qu'elles soient connectées et qu'elles permettent l'échange automatique des informations (Lucke *et al.*, 2008 ; Qin *et al.*, 2016) ;
 - permettre à l'usine de devenir suffisamment consciente et intelligente pour permettre l'entretien des machines, le contrôle du processus de production et la gestion de l'usine (Lucke *et al.*, 2008 ; Qin *et al.*, 2016) ;
 - contrôler les processus non seulement de manière commandée par un système décentralisé, mais également contrôlé de manière interdépendante (Lucke *et al.*, 2008 ; Qin *et al.*, 2016).
- **Affaires :**
 - disposer d'un réseau de communication complet entre diverses entreprises, usines, fournisseurs, logistiques, ressources, clients, etc. (Kagermann *et al.*, 2013 ; Qin *et al.*, 2016) ;
 - permettre à chaque section du réseau d'optimiser sa configuration en temps réel en fonction des demandes et aussi de l'état des autres sections du réseau, ce qui permet de maximiser les profits de toutes les entreprises disposant de ressources de partage limitées (Kagermann *et al.*, 2013 ; Qin *et al.*, 2016).
- **Produits :**
 - permettre de bénéficier d'un nouveau type de produits générés par le secteur manufacturier, qui correspond à un produit intelligent qui grâce à des capteurs intégrés, des composants identifiables et des processeurs permet la transmission de conseils fonctionnels aux clients et aussi de

l'information sur les utilisations (Abramovici et Stark, 2013 ; Qin et al., 2016) ;

- ajouter de nombreuses fonctions aux produits pour les rendre plus intelligents dans le but de mesurer l'état des produits, de suivre les produits et d'analyser les résultats en fonction des informations recueillies (Abramovici et Stark, 2013 ; Qin et al., 2016) ;
- avoir un journal d'information de production complet pouvant être intégré aux produits intelligents pour aider les développeurs de produit à optimiser la conception, la prévision et la maintenance (Abramovici et Stark, 2013 ; Qin et al., 2016).

- **Clients :**

- fournir de nouvelles méthodes d'achat aux clients leur permettant de commander un produit très personnalisé en choisissant n'importe quelle fonction du produit (Schlechtendahl et al., 2015 ; Qin et al., 2016) ;
- offrir aux clients la possibilité de modifier leurs commandes et leurs idées à tout moment pendant la production, même à la dernière minute et sans frais (Schlechtendahl et al., 2015 ; Qin et al., 2016) ;
- permettre aux clients de disposer à tout moment des informations sur la production du produit, mais également de recevoir des conseils d'utilisation en fonction des comportements des utilisateurs (Schlechtendahl et al., 2015 ; Qin et al., 2016).

4.1.2 MODÈLE DE SCHUMACHER ET AL. (2016)

Le deuxième modèle est celui de Schumacher *et al.* (2016). Son modèle présente neuf dimensions pour l'analyse de l'implantation de l'Industrie 4.0. Ces dimensions sont : (1) stratégie, (2) leadership, (3) clients, (4) produits, (5) opérations, (6) culture, (7) personne, (8) gouvernance et (9) technologie. Ainsi, les neuf dimensions du modèle suggérées par Schumacher *et al.* (2016) se détaillent comme suit :

- **Stratégie :**

- mettre en œuvre une feuille de route de l'Industrie 4.0 (Schumacher *et al.*, 2016) ;
- adapter des modèles de gestion (Schumacher *et al.*, 2016).

- **Leadership :**
 - avoir la volonté des dirigeants (Schumacher *et al.*, 2016) ;
 - permettre l'existence d'une coordination centrale pour l'Industrie 4.0 (Schumacher *et al.*, 2016).
- **Clients :**
 - utiliser les données clients (Schumacher *et al.*, 2016) ;
 - permettre la numérisation des ventes/services (Schumacher *et al.*, 2016) ;
 - offrir aux clients des compétences en matière de médias numériques (Schumacher *et al.*, 2016).
- **Produits :**
 - offrir la personnalisation et la numérisation des produits (Schumacher *et al.*, 2016) ;
 - permettre l'intégration des produits dans d'autres systèmes (Schumacher *et al.*, 2016).
- **Opérations :**
 - décentraliser les processus (Schumacher *et al.*, 2016) ;
 - permettre la modélisation, la simulation et la collaboration interdisciplinaire (Schumacher *et al.*, 2016).
- **Culture :**
 - partager les connaissances (Schumacher *et al.*, 2016) ;
 - favoriser l'innovation ouverte, l'échange des technologies de l'information et de la communication (TIC) et la collaboration interentreprises (Schumacher *et al.*, 2016).
- **Personnes :**
 - disposer des compétences en informatique (Schumacher *et al.*, 2016) ;
 - favoriser l'ouverture et l'autonomie face aux nouvelles technologies (Schumacher *et al.*, 2016).

- **Gouvernance :**
 - instaurer une réglementation du travail pour l'Industrie 4.0 (Schumacher *et al.*, 2016) ;
 - améliorer l'adéquation des normes technologiques et la protection de la propriété intellectuelle (Schumacher *et al.*, 2016).
- **Technologie :**
 - disposer de technologies modernes (Schumacher *et al.*, 2016) ;
 - utiliser des périphériques mobiles (Schumacher *et al.*, 2016) ;
 - favoriser la communication machine à machine (Schumacher *et al.*, 2016).

4.1.3 MODÈLE DE PEREIRA ET ROMERO (2017)

Le troisième modèle est celui de Pereira et Romero (2017). Son modèle présente six dimensions pour l'analyse de l'implantation de l'Industrie 4.0. Ces dimensions sont : (1) industrie, (2) produits et services, (3) modèles d'affaires et marché, (4) économie, (5) environnement de travail et (6) développement des compétences. Ces six dimensions du modèle suggérées par Pereira et Romero (2017) se détaillent comme suit :

- **Industrie :**
 - permettre une production décentralisée et numérisée, dans laquelle les éléments de production sont capables de se contrôler de manière autonome, de déclencher des actions et de réagir aux changements de leur environnement (Erol *et al.*, 2016 ; Pereira et Romero, 2017) ;
 - intégrer pleinement les produits et les processus, en passant de la production standardisée à la personnalisation de masse, ce qui apporte un degré de complexité plus élevé (Dombrowski et Wagner, 2014 ; Pereira et Romero, 2017) ;
 - impacter de manière importante les processus industriels, les systèmes de fabrication et les chaînes d'approvisionnement (Roblek *et al.*, 2016 ; Pereira et Romero, 2017) ;
 - transformer le paysage industriel afin de permettre la numérisation de la production, l'automatisation et la connexion du site de fabrication

dans une chaîne d'approvisionnement intégrée (Roblek et al., 2016 ; Pereira et Romero, 2017) ;

- favoriser une intégration complète du réseau et un échange d'information en temps réel (Roblek et al., 2016 ; Pereira et Romero, 2017) ;
- favoriser l'augmentation de la productivité puisqu'elle affectera toute la chaîne d'approvisionnement, le développement de produits, les processus d'ingénierie et la logistique (Pereira et Romero, 2017).

- **Produits et services :**

- entraîner un accroissement de la demande pour le développement de produits plus complexes et plus intelligents (Porter et Heppelmann, 2015 ; Pereira et Romero, 2017) ;
- permettre aux produits d'être plus modulaires et configurables, favorisant la personnalisation de masse afin de répondre aux besoins spécifiques des clients (Jazdi, 2014 ; Pereira et Romero, 2017) ;
- favoriser l'innovation et l'introduction de nouveaux produits et services en tant que systèmes embarqués pouvant être réactifs et interactifs, pouvant être gérés et suivis en temps réel, optimisant l'ensemble de la chaîne de valeurs et fournissant l'information pertinente sur leurs activités (Kagermann et al., 2013 ; Pereira et Romero, 2017).

- **Modèles d'affaires et marché :**

- favoriser la naissance de nouveaux modèles commerciaux innovants plus adaptés à cette nouvelle réalité que les modèles d'affaires et de marché traditionnels déjà existants (Glova et al., 2014 ; Pereira et Romero, 2017) ;
- favoriser l'intégration entre les fabricants et les clients, ce qui permet une interaction plus étroite avec les clients et l'adaptation des modèles commerciaux aux exigences du marché (Geissbaue et al., 2016 ; Pereira et Romero, 2017) ;
- renforcer la compétitivité grâce à la suppression des barrières entre information et structures physiques permettant la création de modèles de marché plus complexes et numériques (Zezulka et al., 2016 ; Pereira et Romero, 2017).

- **Économie :**
 - développer des technologies émergentes qui auront un impact sur la productivité et la compétitivité (Kagermann, 2015 ; Pereira et Romero, 2017) ;
 - favoriser une convergence entre les mondes physiques et virtuels grâce à la numérisation ce qui aura un impact généralisé dans tous les secteurs économiques (Kagermann, 2015 ; Pereira et Romero, 2017).

- **Environnement de travail :**
 - transformer les emplois et les compétences requises en raison de l'évolution des progrès technologiques liés à l'Industrie 4.0 (Kagermann et al., 2013 ; Pereira et Romero, 2017) ;
 - créer des interfaces hommes-machines, qui englobent l'interaction entre les travailleurs et un ensemble de nouvelles méthodes de travail collaboratif (Kagermann et al., 2013 ; Pereira et Romero, 2017) ;
 - transformer l'environnement de travail actuel en augmentant le nombre de robots et de machines intelligentes et en fusionnant les mondes physiques et virtuels (Dombrowski et Wagner, 2014 ; Zuehlke, 2010 ; Pereira et Romero, 2017) ;
 - transformer les profils des postes, ainsi que la gestion, l'organisation et la planification du travail à cause de la naissance croissante de nouvelles technologies (Roblek et al., 2016 ; Pereira et Romero, 2017) ;
 - redéfinir les emplois actuels et prendre des mesures pour adapter la main-d'œuvre aux nouveaux emplois qui seront créés dans le but d'éviter le chômage technologique (Roblek et al., 2016 ; Pereira et Romero, 2017).

- **Développement des compétences :**
 - exiger de nouvelles compétences et créer des opportunités pour l'acquisition de ces compétences grâce à des formations de haute qualité qui conduiront à des changements démographiques et sociaux (Erol et al., 2016 ; Pereira et Romero, 2017) ;

- acquérir des compétences interdisciplinaires et émergences de nouveaux domaines de compétences (Magruk, 2016 ; Pereira et Romero, 2017) ;
- augmenter de l'automatisation des tâches, ce qui signifie que les travailleurs doivent être préparés à l'exécution de nouvelles tâches (Erol et al., 2016 ; Pereira et Romero, 2017) ;
- adapter les formations en ingénierie aux nouvelles tendances et opportunités technologiques (Erol et al., 2016 ; Pereira et Romero, 2017) ;
- permettre aux chefs d'entreprise d'adapter leur stratégie de gestion aux nouvelles exigences du marché (Erol et al., 2016 ; Pereira et Romero, 2017) ;
- disposer de plus en plus de personnel qualifié dans les domaines technologiques et informatiques pour répondre aux besoins de l'Industrie 4.0 (Pereira et Romero, 2017).

4.1.4 MODÈLE DE SCHNEIDER (2018)

Le quatrième modèle est celui de Schneider (2018) qui présente six dimensions pour l'analyse de l'implantation de l'Industrie 4.0. Ces dimensions sont : (1) stratégie et analyse, (2) planification et mise en œuvre, (3) coopération et réseaux, (4) modèles d'affaires, (5) ressources humaines et (6) changement et leadership. Les six dimensions du modèle suggérées par Schneider (2018) se détaillent comme suit :

- **Analyse et stratégie :**
 - permettre la collecte de données et la génération de nouvelles sources de revenus au moyen de services numériques à valeur ajoutée (Porter et Heppelmann, 2014) ;
 - lever les barrières à l'entrée grâce à la collecte et à l'analyse rapide des données (Iansiti et Lakhani, 2014) ;
 - redéfinir le champ d'activité et souligner l'implication active du leadership de l'entreprise en tant que facteur de succès crucial (Schneider, 2018).

- **Planification et mise en œuvre :**
 - aider les entreprises à faire des économies importantes sans perturber les processus de production en cours (Shellshear et al., 2015) ;
 - estimer les coûts et les avantages des investissements de l'Industrie 4.0 (Schneider, 2018) ;
 - donner la possibilité de lever les barrières à l'entrée et de créer des normes de facto grâce à une accumulation précoce de données pouvant favoriser un démarrage rapide tout en développant une culture d'expérimentation et d'apprentissage par essais et erreurs (Kane et al., 2015).

- **Coopération et réseaux :**
 - offrir aux PME la possibilité de compenser leur manque de ressources et d'expertise, de réduire leurs risques d'investissement et de mise en œuvre, d'exploiter pleinement les effets de mise en réseau et de mieux répondre aux besoins des clients avec, par exemple, des services développés conjointement (Geissbauer et al., 2014 ; Bischoff et al., 2015) ;
 - permettre aux entreprises de réduire les coûts de développement et de déploiement de logiciels, de partager les ressources informatiques et d'accéder à des applications logicielles de fabrication appropriée facilitant les innovations (produits et processus communs) (Davis et al., 2012 ; Holtewert et al., 2013 ; Papazoglou et al., 2015) ;
 - permettre aux entreprises manufacturières de tirer profit de la digitalisation de la chaîne logistique pour assurer des opérations interentreprises fluides et se transformer en réseaux intégrés de création de valeurs, dans lesquels les entreprises se regroupent et unissent leurs compétences essentielles (Brettel et al., 2014).

- **Modèles d'affaires :**
 - permettre aux entreprises d'avoir des produits hautement personnalisés, des combinaisons produits-services intégrées et bien synchronisées ainsi que des solutions de services numériques innovantes (Iansiti et Lakhani, 2014) ;

- aider les entreprises à développer, évaluer les risques et opérationnaliser des modèles économiques cohérents pour l'Industrie 4.0 (Rudtsch et al., 2014) ;
- améliorer en continu l'efficacité des processus de création de valeurs (Schneider, 2018).

- **Ressources humaines :**

- développer des stratégies pour façonner le lieu de travail du futur, qualifier les employés et renforcer les capacités numériques (Schneider, 2018) ;
- développer de nouvelles formes de collaborations homme-robot (Botthof et Hartmann, 2015) ;
- automatiser des tâches simples et répétitives tandis que de nouvelles tâches plus complexes apparaissent ou émergent (Becker et Stern, 2016) ;
- disposer d'un profil de compétences plutôt interdisciplinaire que spécialisé (Blanchet et al., 2014) ;
- assurer le traitement des données et le développement de logiciels, car ils sont mis de l'avant comme principales sources d'avantage concurrentiel dans Industrie 4.0 (Porter et Heppelmann 2015 ; The Economist, 2015) ;
- offrir de nouvelles possibilités technologiques permettant des processus de formation et d'apprentissage plus efficaces et plus sûrs en vue d'améliorer la qualification des employés (Huang et al., 2010 ; Blümel, 2013 ; Quint et al., 2015 ; Schneider, 2018).

- **Changement et leadership :**

- insister sur les rôles des expériences et de l'apprentissage itératif afin de mieux gérer les changements (Fleisch et al., 2014) ;
- intégrer les données des médias sociaux pour obtenir une utilisation extrêmement flexible des employés (Bauer et al., 2014) ;
- mettre en place des systèmes de motivation individuels basés sur des données, qui seraient nécessairement basés sur le suivi des activités des employés (Kaur et Sood, 2015 ; Stock et Seliger, 2016).

4.1.5 DIMENSIONS RETENUES DANS LE CADRE DE NOTRE ÉTUDE

Les quatre modèles présentés plus haut présentent en tout 18 dimensions différentes. Aucun de ces quatre modèles n'est complet à lui seul, mais ils sont plutôt complémentaires. C'est la raison pour laquelle nous avons décidé de proposer un modèle qui reprend toutes les dimensions tout en les regroupant. Ainsi, en nous basant sur les dimensions qui regroupent les aspects techniques, organisationnels et managériaux tirées des modèles de Qin *et al.* (2016); Shumacher *et al.* (2016); Pereira et Romero (2017) et Schneider (2018), nous proposons de regrouper l'ensemble de ces dimensions en dix groupes de : (1) industrie, (2) coopération et réseaux, (3) économie, (4) modèles d'affaires et marché, (5) produits et les services, (6) clients, (7) usine incluant opération et technologie, (8) environnement de travail, (9) développement des compétences incluant ressources humaines et personnes et enfin (10) gouvernance qui inclut culture, stratégie et analyse, planification et mise en œuvre, ainsi que la gestion du changement et le leadership.

La figure 5 présentée ci-après présente les dix regroupements. Ce modèle met ensemble les dimensions qui avaient des similitudes comme usine (opération et technologie), développement des compétences (ressources humaines et personnes), gouvernance (culture, stratégie et analyse, planification et mise en œuvre, ainsi que changement et leadership). Ces nouvelles dimensions que nous proposons seront utilisées dans la suite de ce document comme cadre pour l'analyse des défis, les barrières, les opportunités et les bénéfices associés à l'implantation de l'Industrie 4.0.

D	Industrie
I	Coopération et réseaux
M	Économie
E	Modèles d'affaires et de marché
N	Produits et services
S	Clients
I	Usine (Opérations/Technologie)
O	Environnement de travail
N	Développement des compétences/Ressources humaines/Personnes
S	Gouvernance (Culture/Stratégie et analyse/Planification et mise en œuvre/Changement et leadership)

Figure 5 : Dimensions retenues pour l'analyse des défis, des barrières, des opportunités et des bénéfices de l'implantation de l'Industrie 4.0

4.2 OPPORTUNITÉS ET BÉNÉFICES DE L'INDUSTRIE 4.0

Dans cette section, nous présentons les résultats de la revue de littérature faite sur les opportunités et les bénéfices de l'Industrie 4.0. Le tableau 5 présente les principaux résultats en termes d'opportunités et de bénéfices pour chacune des dix dimensions de notre cadre d'analyse présenté à la section 3.1.5.

Nous constatons qu'il y a de nombreux bénéfices et opportunités associés à l'implantation de l'Industrie 4.0. Du point de vue industriel, on note par exemple une production décentralisée et numérisée [Zamfirescu *et al.*, 2014 ; Shafiq *et al.*, (2015, 2016) ; Erol *et al.*, 2016 ; Hofmann et Rüsç, 2017 ; Pereira et Romero, 2017], une automatisation (Schmitt *et al.*, 2013 ; Pereira et Romero, 2017), une intégration des données (Vogel-Heuser et Hess, 2016 ; Ji *et al.*, 2016), le tout favorisant une augmentation de la compétitivité

(Mrugalsk et Wyrwick, 2017). Sur le plan de la coopération et du réseautage, l'Industrie 4.0 offre une intégration réseau et un échange d'informations en temps réel (Dombrowski et Wagner, 2014 ; Pereira et Romero, 2017), une exploitation des effets de la mise en réseau entre les différents partenaires pour mieux répondre aux besoins des clients (Geissbauer *et al.*, 2014 ; Bischoff *et al.*, 2015). L'implantation de l'Industrie 4.0 offre également de nouvelles opportunités commerciales et des avantages économiques (Pereira et Romero, 2017 ; Kagermann *et al.*, 2013 ; Glova *et al.*, 2014 ; Mrugalsk et Wyrwick 2017 ; Pereira et Romero, 2017). L'innovation joue un rôle essentiel pour l'augmentation de la productivité et l'amélioration de la compétitivité (Qin *et al.*, 2016 ; Pereira et Romero, 2017). Pour les produits et services, l'introduction de nouveaux produits et services en tant que systèmes embarqués (Kagermann *et al.*, 2013), la personnalisation de masse afin de répondre aux exigences spécifiques, des clients (Jazdi, 2014 ; Schumacher *et al.*, 2016) se comptent parmi les bénéfices de l'Industrie 4.0. Avec un modèle 4.0, plusieurs bénéfices s'offrent aussi aux clients tels que la possibilité de commander n'importe quelle fonction de produits, de modifier sa commande à n'importe laquelle des étapes de la production, sans frais, de disposer de nouvelles méthodes d'achat (Schlechtendahl *et al.*, 2015), de permettre en plus au client non seulement de connaître l'information sur la production du produit, mais également de recevoir les conseils d'utilisation en fonction de ses propres comportements (Schlechtendahl *et al.*, 2015). De plus, on note avec l'Industrie 4.0 une réduction du rapport coûts/efficacité (Kagermann *et al.*, 2013 ; Shafiq *et al.*, (2015, 2016) ; Hofmann et Rüsçh, 2017), un contrôle des processus de production et une gestion du système d'usine (Lucke *et al.*, 2008). En lien avec l'environnement de travail, l'Industrie 4.0 permet une augmentation du nombre de robots et de machines intelligentes (Pereira et Romero, 2017), le développement de nouvelles formes de collaborations homme-robot (Blanchet *et al.*, 2014), l'acquisition de nouvelles compétences requises (Erol *et al.*, 2016 ; Magruk, 2016), ainsi que l'amélioration des processus de production et d'ingénierie d'une part et l'amélioration de la qualité des produits et services d'autre part. Enfin, sur le plan de la gouvernance, l'Industrie 4.0 permet l'adaptation des modèles de gestion (Schumacher *et al.*, 2016) et la levée des barrières à l'entrée grâce à la collecte et à l'analyse rapide des données (Iansiti et Lakhani, 2014, Kane *et al.*, 2015).

Tableau 5 : Principales opportunités et bénéfices de l'Industrie 4.0 (Traduction libre)

Dimensions	Opportunités et bénéfices	Exemple d'auteurs
Industrie	Production décentralisée et numérisée	Zamfirescu <i>et al.</i> , 2014 ; Shafiq <i>et al.</i> , (2015, 2016) ; Erol <i>et al.</i> , 2016 ; Hofmann et Rüsçh, 2017 ; Pereira et Romero, 2017
	Numérisation de la production (contrôle automatique)	Erol <i>et al.</i> , 2016 ; Pereira et Romero, 2017

	Automatisation	Schmitt <i>et al.</i> , 2013 ; Pereira et Romero, 2017
	Intégration de données	Vogel-Heuser et Hess, 2016 ; Ji <i>et al.</i> , 2016
	Virtualisation des systèmes	Shafiq <i>et al.</i> , (2015, 2016)
	Émergence de nouvelles technologies	Glova <i>et al.</i> , 2014
	Une plus grande flexibilité dans les opérations	Pereira et Romero, 2017
	Une allocation plus efficace des ressources	Pereira et Romero, 2017
	Opportunités d'optimisation des processus de création de valeur et d'intégration à travers la chaîne de valeurs	Ji <i>et al.</i> , 2016; Vogel-Heuser et Hess, 2016 Hofmann et Rüschi, 2017 ; Pereira et Romero, 2017
	Augmentation de la productivité	Pereira et Romero, 2017 Mrugalski et Wyrwick, 2017
Coopération et réseaux	Intégration réseau et échange d'informations en temps réel	Dombrowski et Wagner, 2014 ; Roblek <i>et al.</i> , 2016 ; Pereira et Romero, 2017
	Offrir aux PME la possibilité de compenser leur manque de ressources et d'expertise, réduire leurs risques d'investissement et de mise en œuvre, exploiter pleinement les effets de mise en réseau et mieux répondre aux besoins des clients avec, par exemple, des services développés conjointement	Geissbauer <i>et al.</i> , 2014 ; Bischoff <i>et al.</i> , 2015
	Création d'environnements collaboratifs	Glova <i>et al.</i> , 2014
	Existence d'un réseau de communication complet entre différentes entreprises, usines, fournisseurs, logistique, ressources, clients, etc.	Kagermann <i>et al.</i> , 2013
	Permettre aux entreprises manufacturières de tirer profit de la digitalisation de la chaîne logistique pour assurer des opérations interentreprises fluides et se transformer en réseaux intégrés de création de valeurs, dans lesquels les entreprises se regroupent et unissent leurs compétences essentielles	Brettel <i>et al.</i> , 2014
	Réduire les coûts de développement et de déploiement de logiciels, partager les ressources informatiques et accéder à des applications logicielles de fabrication dédiées facilitant les innovations (produits et processus communs) pour les entreprises	Davis <i>et al.</i> , 2012 ; Holtewert <i>et al.</i> , 2013 ; Papazoglou <i>et al.</i> , 2015

Économie	Favoriser une convergence entre les mondes physiques et virtuels grâce à la numérisation ce qui aura un impact généralisé dans tous les secteurs économiques	Kagermann, 2015 ; Pereira et Romero, 2017
	Apporter de nouvelles opportunités commerciales et des avantages économiques	Pereira et Romero, 2017
	Développer des technologies émergentes qui auront un impact sur la productivité et la compétitivité	Kagermann, 2015 ; Pereira et Romero, 2017
Modèles d'affaires et marché	Favoriser la naissance de nouvelles opportunités et de nouveaux modèles commerciaux innovants	Kagermann <i>et al.</i> , 2013 ; Glova <i>et al.</i> , 2014 ; Mrugalsk et Wyrwick 2017 ; Pereira et Romero, 2017
	Création de modèles de marché plus complexes et numériques	Zezulka <i>et al.</i> , 2016 ; Pereira et Romero, 2017
	Renforcer la compétitivité grâce à la suppression des barrières entre information et structures physiques permettant la création de modèles de marché plus complexes et numériques	Zezulka <i>et al.</i> , 2016 ; Pereira et Romero, 2017
	L'Industrie 4.0 favorise l'intégration entre les fabricants et les clients, permettant une interaction plus étroite avec les clients et l'adaptation des modèles commerciaux aux exigences du marché	Geissbaue <i>et al.</i> , 2016 ; Pereira et Romero, 2017
	Permettre aux entreprises d'avoir des produits hautement personnalisés, des combinaisons produits-services intégrées et bien synchronisées ainsi que des solutions de services numériques innovantes	Iansiti et Lakhani, 2014
	Développement, évaluation des risques et opérationnalisation de modèles économiques cohérents pour l'Industrie 4.0	Rudtsch <i>et al.</i> , 2014
	Efficacité accrue des processus de création de valeurs	Schneider, 2018
Produits et les services	Permettre aux entreprises de disposer de produits/services plus intelligents	Jazdi, 2014 ; Porter et Heppelmann, 2015 ; Pereira et Romero, 2017
	Personnaliser avec des lots de petites tailles	Shafiq <i>et al.</i> , (2015, 2016)
	Livraison d'un meilleur service client	Koch <i>et al.</i> , 2014
	Personnalisation de masse afin de répondre aux exigences spécifiques des clients	Jazdi, 2014
	Innovation et introduction de nouveaux produits et services en tant que systèmes embarqués	Kagermann <i>et al.</i> , 2013
	Transporter des informations et des connaissances pour transmettre les conseils fonctionnels aux clients et	Abramovici et Stark, 2013

	transmettre l'information sur les utilisations du système de fabrication	
	Ajouter de nombreuses fonctions aux produits pour les rendre plus intelligents dans le but de mesurer l'état des produits, de suivre les produits et d'analyser les résultats en fonction des informations recueillies	Abramovici et Stark, 2013
	Avoir un journal d'information de production complet pouvant être intégré aux produits intelligents pour aider les développeurs de produit à optimiser la conception, la prévision et la maintenance	Abramovici et Stark, 2013
	Offrir une personnalisation et une numérisation des produits	Schumacher <i>et al.</i> , 2016
	Permettre l'intégration de produits dans d'autres systèmes	Schumacher <i>et al.</i> , 2016
Clients	Fournir de nouvelles méthodes d'achat aux clients leur permettant de commander un produit très personnalisé en choisissant n'importe quelle fonction du produit	Schlechtendahl <i>et al.</i> , 2015
	Offrir aux clients la possibilité de modifier leurs commandes et leurs idées à tout moment pendant la production, même à la dernière minute et sans frais	Schlechtendahl <i>et al.</i> , 2015
	L'avantage des produits intelligents, c'est qu'ils permettent aux clients non seulement de connaître l'information sur la production du produit, mais également de recevoir les conseils d'utilisation en fonction de leurs propres comportements	Schlechtendahl <i>et al.</i> , 2015
	Utilisation des données client	Schumacher <i>et al.</i> , 2016
	Numérisation des ventes/services	Schumacher <i>et al.</i> , 2016
	Offrir aux clients des compétences du client en matière de médias numériques	Schumacher <i>et al.</i> , 2016
Usine	Haute qualité et faibles coûts de production en masse	Pine, 1993
	Réduire les coûts/efficacité	Kagermann <i>et al.</i> , 2013 ; Shafiq <i>et al.</i> , (2015, 2016) ; Hofmann et Rüsck, 2017
	Personnalisation et mise en marché plus rapide	Goldman, Nagel et Preiss, 1995 ; Schweiger, 2011
	Modularité/flexibilité/adaptation flexible	Kagermann <i>et al.</i> , 2013 ; Shafiq <i>et al.</i> , (2015, 2016) ; Vogel-Heuser et Hess, 2016 ; Ji <i>et al.</i> , 2016 ; Mrugalsk and Wyrwick 2017 ;

	Intégrer de nouvelles ressources de fabrication (capteurs, actionneurs, machines, robots, convoyeurs, etc.) de sorte qu'elles soient connectées et qu'elles permettent l'échange automatique des informations	Lucke <i>et al.</i> , 2008
	Permettre à l'usine de devenir suffisamment consciente et intelligente pour permettre l'entretien des machines, le contrôle du processus de production et la gestion de l'usine	Lucke <i>et al.</i> , 2008
	Contrôler les processus non seulement de manière commandée par un système décentralisé, mais également contrôlé de manière interdépendante	Lucke <i>et al.</i> , 2008
Environnement de travail	Transformer les emplois et les compétences requises en raison de l'évolution des progrès technologiques liés à l'Industrie 4.0	Kagermann <i>et al.</i> , 2013 ; Pereira et Romero, 2017
	Créer des interfaces hommes-machines, qui englobent l'interaction entre les travailleurs et un ensemble de nouvelles méthodes de travail collaboratif	Kagermann <i>et al.</i> , 2013 ; Pereira et Romero, 2017
	Développer de nouvelles formes de collaborations homme-robot	Bothof et Hartmann, 2015
	Redéfinir les emplois actuels et prendre des mesures pour adapter la main-d'œuvre aux nouveaux emplois qui seront créés dans le but d'éviter le chômage technologique	Roblek <i>et al.</i> , 2016 ; Pereira et Romero, 2017
	Mettre en place des systèmes de motivation individuels basés sur des données, qui seraient nécessairement basés sur le suivi de chaque activité d'un employé	Kaur et Sood, 2015 ; Stock et Seliger, 2016
	Communication entre machines intelligentes, produits intelligents et employés	Pereira et Romero, 2017
	Les tâches faciles et répétitives sont automatisées, tandis que de nouvelles tâches plus complexes émergent	Becker et Stern, 2016
	Optimiser la prise de décision	Mrugalsk et Wyrwick 2017
	L'intégration de l'Industrie 4.0 dans les systèmes de fabrication et la mise en œuvre croissante de nouvelles technologies auront un impact sur les profils des postes, ainsi que sur la gestion, l'organisation et la planification du travail	Roblek <i>et al.</i> , 2016 ; Pereira et Romero, 2017
Développement des compétences	Acquérir des compétences interdisciplinaires et émergences de nouveaux domaines de compétences	Magruk, 2016
	Industrie 4.0 transforme les emplois et les compétences requises	Pereira et Romero, 2017
	Adapter les formations en ingénierie aux nouvelles tendances et opportunités technologiques	Erol <i>et al.</i> , 2016

	Permettre aux chefs d'entreprise d'adapter leur stratégie de gestion aux nouvelles exigences du marché	Erol <i>et al.</i> , 2016
	Acquisition des compétences requises grâce à une formation de qualité	Erol <i>et al.</i> , 2016
	Impact considérable sur le marché du travail et les rôles professionnels	Pereira et Romero, 2017
	Avoir un profil de compétences plutôt interdisciplinaire que spécialisé	Blanchet <i>et al.</i> , 2014
	Une automatisation accrue des tâches	Erol <i>et al.</i> , 2016 ; Pereira et Romero, 2017
	Les gestionnaires qui devraient adapter leur stratégie de gestion aux nouvelles exigences du marché	Erol <i>et al.</i> , 2016
	Disposer de plus en plus de personnel qualifié sera nécessaire dans les domaines technologiques et informatiques pour répondre aux exigences de l'Industrie 4.0	Schumacher <i>et al.</i> , 2016 ; Pereira et Romero, 2017
	Améliorer les processus de production et d'ingénierie	Pereira et Romero, 2017
	Compétences des employés en matière de technologies de l'information et de la communication, ouverture des employés aux nouvelles technologies, autonomie des employés	Schumacher <i>et al.</i> , 2016
	Optimiser la relation entre clients et organisations	Pereira et Romero, 2017
	Disposer d'un profil de compétences plutôt interdisciplinaire que spécialisé	Blanchet <i>et al.</i> , 2014
	Développer des stratégies pour façonner le lieu de travail du futur, qualifier les employés et renforcer les capacités numériques	Schneider, 2018
	Changer les exigences de formation et transformer l'environnement de travail actuel	Pereira et Romero, 2017
Gouvernance	Réglementation du travail pour l'Industrie 4.0, adéquation des normes technologiques, protection de la propriété intellectuelle	Schumacher <i>et al.</i> , 2016
	Partage des connaissances, innovations ouvertes et collaborations entre entreprises, valeur des Technologies de l'Information et de la Communication dans l'entreprise	Schumacher <i>et al.</i> , 2016
	Mise en œuvre de la feuille de route de l'Industrie 4.0, ressources disponibles pour la réalisation, l'adaptation des modèles de gestion	Schumacher <i>et al.</i> , 2016

	Mise en place de nouvelles méthodes de gestion, existence d'une coordination centrale pour l'Industrie 4.0	Schumacher <i>et al.</i> , 2016
	Mettre en place des stratégies pour la collecte de données et la génération de nouvelles sources de revenus au moyen de services numériques à valeur ajoutée	Porter et Heppelmann, 2014
	Lever les barrières à l'entrée grâce à la collecte et à l'analyse rapide des données	Iansiti et Lakhani, 2014 Kane <i>et al.</i> , 2015
	Estimer les coûts et les avantages des investissements de l'Industrie 4.0	Schneider, 2018
	Développer des stratégies pour façonner le lieu de travail du futur, qualifier les employés et renforcer les capacités numériques	Schneider, 2018
	Développer de nouvelles formes de collaborations homme-robot	Botthof et Hartmann, 2015
	Intégrer les données des médias sociaux pour obtenir une utilisation extrêmement flexible des employés	Bauer <i>et al.</i> , 2014
	Mettre en place des systèmes de motivation individuels basés sur des données, qui seraient nécessairement basés sur le suivi des activités des employés	Kaur et Sood, 2015 ; Stock et Seliger, 2016
	Insister sur les rôles des expériences et de l'apprentissage itératif afin de mieux gérer les changements	Fleisch <i>et al.</i> , 2014

Trois autres dimensions qui n'ont pas été introduites dans les modèles étudiés, mais qui paraissent importantes à nos yeux, sont la dimension écologique de durabilité, la dimension de logistique et la dimension sociale. En lien avec la dimension écologique de la durabilité, l'Industrie 4.0 offre plusieurs avantages. L'équilibrage de la charge peut être optimisé pour réduire la consommation d'énergie. Cela se base sur des simulations d'amélioration de processus ainsi que sur la prédiction de la consommation d'énergie via des systèmes d'énergie intelligents. De plus, la conception de la fabrication peut être améliorée grâce à l'interconnexion directe des données entre la conception et l'utilisation du produit, conduisant à une meilleure gestion du cycle de vie des produits, y compris le recyclage. Ainsi, l'Industrie 4.0 aide à mettre en évidence et à réduire les émissions de gaz à effet de serre. En conséquence, la réduction de la consommation de déchets et de ressources peut être améliorée (Müller *et al.*, 2018).

En lien avec la logistique, la réduction des processus de transport ainsi que des flux de matières inutiles peut également être réalisée. En outre, le nombre d'erreurs de livraison, le temps d'attente inutile et la quantité de marchandises endommagées peuvent être réduits par

la transparence des données tout au long de la chaîne d'approvisionnement. La production décentralisée proche de là où les produits sont consommés diminue encore les coûts logistiques ainsi que les impacts environnementaux. De la même manière, de nouvelles technologies de production telles que la fabrication additive peut aider à réduire le gaspillage du processus de production et de logistique, par exemple pour des pièces de rechange (Müller *et al.*, 2018).

En lien avec la dimension sociale de l'Industrie 4.0, plusieurs avantages sont mentionnés pour les employés, tels que l'amélioration de l'apprentissage humain grâce à des systèmes d'assistance intelligents et des interfaces homme-machine qui améliorent la satisfaction des employés sur les lieux de travail industriels. En général, un remplacement des tâches simples est prévu, alors que des tâches telles que surveillance, collaboration et formation seront développées davantage. Les tâches qui incluent la planification et le suivi ainsi que la prise de décision pourraient relever de systèmes autonomes, et éventuellement remplacer des emplois dans ce domaine. Par conséquent, la mise en œuvre organisationnelle de l'Industrie 4.0 nécessite des processus de transformation ciblés, souvent appelés « transformation numérique ». Cela nécessite de nouvelles mentalités pour gérer les défis de la transformation numérique ainsi qu'une stratégie commune pour aborder la qualification et l'acceptation des employés (Müller *et al.*, 2018).

4.3 DÉFIS ET BARRIÈRES ASSOCIÉS À L'INDUSTRIE 4.0

Dans cette section, nous présentons les résultats de la revue de littérature faite sur les défis et les barrières de l'Industrie 4.0. Ainsi, l'objectif est d'arriver à faire ressortir les défis et les barrières qui existent pour chacune des dix dimensions retenues à la section 3.1.5. En conséquence, le tableau 6 présente les résultats des défis et des barrières que nous avons relevés pour chacune des dix dimensions provenant de notre cadre d'analyse avec les auteurs qui en ont fait état.

Selon le tableau 6, de nombreux défis et barrières sont associés avec l'implantation de l'Industrie 4.0. Tout d'abord, notons le degré de complexité croissant relié à la pleine intégration des produits et des processus, en passant de la production de masse à la personnalisation de masse (Dombrowski et Wagner, 2014), l'absence de systèmes assurant une protection suffisante des données pour les entreprises de fabrication lors de la mise en œuvre de l'Industrie 4.0 (Constantine, 2014 ; Gölzer et al., 2015 ; Zhou et al., 2016) et la sélection des formes de collaboration appropriées ainsi que des partenaires (Davis *et al.*, 2012 ; Brettel *et al.*, 2014 ; Chen et Tsai, 2016).

Sur le plan économique, les entreprises doivent faire face à des délais de commercialisation réduits, à des cycles de vie des produits plus courts et à la nécessité de réduire les coûts pour rester compétitives (Ganschar *et al.*, 2013 ; BMBF, 2014). Elles

doivent maintenant conclure des alliances stratégiques avec leurs fournisseurs ou leurs concurrents pour rester compétitives (Ganschar *et al.*, 2013 ; Helmrich, 2015 ; Brühl, 2015). Le développement de nouveaux modèles d'affaires bien qu'étant un des bénéfices de l'Industrie 4.0 constitue un défi pour certaines entreprises (Arnold *et al.*, 2016 ; Burmeister *et al.*, 2016 ; Laudien et Daxbröck, 2016). En lien avec les produits et services, les entreprises doivent protéger leur savoir-faire industriel (Wolter *et al.*, 2015) dans une logique où le réseautage et la coopération sont de mise. Pour les clients, les entreprises doivent faire face aux attentes des clients qui demandent un niveau plus élevé de personnalisation et de flexibilité (Stock-Homburg, 2013 ; Helmrich, 2015). Par ailleurs, l'absence d'infrastructure technologique pour certaines entreprises constitue une barrière pour la mise en œuvre de l'Industrie 4.0 (Varghese et Tandur, 2014 ; Zhou *et al.*, 2016 ; Waibel *et al.*, 2017).

Parmi les défis en lien avec l'environnement de travail, les entreprises doivent réussir à éviter le chômage technologique, redéfinir les emplois actuels, prendre des mesures pour adapter la main-d'œuvre aux nouveaux emplois qui seront créés (Roblek *et al.*, 2016), développer des stratégies pour attirer les jeunes, tout en conservant les connaissances des employés seniors (Stock-Homburg, 2013). D'un autre côté, un défi que plusieurs entreprises doivent surmonter est le manque de compétences adéquates pour accélérer la marche vers cette quatrième révolution industrielle (Wolter *et al.*, 2015). Parmi les barrières qui peuvent bloquer l'implantation de l'Industrie 4.0, il y a également l'absence de plan stratégique dynamique pour soutenir l'adoption de l'Industrie 4.0 (Koch *et al.*, 2014 ; Zhou *et al.*, 2016), l'exigence d'évaluer l'impact sur les marchés et la concurrence avant d'entamer la transformation (Iansiti et Lakhani, 2014 ; Porter et Heppelmann, 2014 ; Agarwal et Brem, 2015 ; Porter et Heppelmann, 2015 ; Schumacher *et al.*, 2016) et aussi la gouvernance, le contrôle et la coordination des processus de transformation qui peut s'avérer difficile à accomplir (Fleisch *et al.*, 2014 ; Hirsch-Kreinsen, 2014 ; *The Economist*, 2015).

Tableau 6 : Principaux défis et barrières associés de l'Industrie 4.0 (Traduction libre)

Dimensions	Défis et barrières	Exemple d'auteurs
Industrie	Les entreprises doivent chercher à aller vers une production décentralisée et numérisée, dans laquelle les éléments de production sont capables de se contrôler de manière autonome, de déclencher des actions et de réagir aux changements de leur environnement	Erol <i>et al.</i> , 2016
	Chercher à faciliter la pleine l'intégration des produits et des processus, en passant de la production de masse à la personnalisation de masse, ce qui apporte un niveau de complexité plus élevé	Dombrowski et Wagner, 2014

	Chercher à avoir une plus grande flexibilité des opérations et une affectation plus efficace des ressources	Pereira et Romero, 2017
	Chercher à aboutir à une intégration complète du réseau et à un échange d'information en temps réel	Roblek <i>et al.</i> , 2016
	Fiabilité et stabilité nécessaire pour la communication machine à machine (M2M) critique, y compris une latence très courte et stable	Wolter <i>et al.</i> , 2015
	Absence de systèmes assurant une protection suffisante des données pour les entreprises de fabrication lors de la mise en œuvre de l'Industrie 4.0	Constantine, 2014 ; Gölzer <i>et al.</i> , 2015 ; Zhou <i>et al.</i> , 2016
Coopération et réseaux	Évaluer le sens de la collaboration interorganisationnelle	Davis <i>et al.</i> , 2012 ; Brettel <i>et al.</i> , 2014 ; Chen et Tsai, 2016
	Identifier et sélectionner les formes de collaboration appropriées ainsi que les partenaires	Davis <i>et al.</i> , 2012 ; Brettel <i>et al.</i> , 2014 ; Chen et Tsai, 2016
Économie	Avec le processus de mondialisation en cours, les entreprises doivent faire face à des délais de commercialisation réduits, à des cycles de vie des produits plus courts et à la nécessité de réduire les coûts pour rester compétitives	Ganschar <i>et al.</i> , 2013 ; BMBF, 2014
	Avec des modèles économiques classiques devenant facilement vulnérables aux substituts, les entreprises doivent rationaliser leurs processus d'innovation et transformer leur modèle commercial en privilégiant le service	Shahd et Hampe, 2015
	Les entreprises doivent conclure des alliances stratégiques avec leurs fournisseurs ou leurs concurrents pour rester compétitives. Cela conduit en outre à la corrélation de chaînes de valeur entières, ce qui accroît la complexité des processus	Ganschar <i>et al.</i> , 2013 ; Helmrich, 2015 ; Brühl, 2015
Modèles d'affaires et marché	Développer de nouveaux modèles d'affaires	Arnold <i>et al.</i> , 2016 ; Burmeister <i>et al.</i> , 2016 ; Laudien et Daxbröck, 2016
	Décider de l'innovation du modèle d'entreprise en lien avec le modèle d'affaires	
Produits et services	Défis en matière de fiabilité de la production à cause de la grande complexité des systèmes de contrôle dans les usines intelligentes	Salkin <i>et al.</i> , 2018
	Défis liés à l'intégration de produits dans d'autres systèmes	Schumacher <i>et al.</i> , 2016

	Nécessité de maintenir l'intégrité des processus de production	Wolter <i>et al.</i> , 2015
	Nécessité de protéger le savoir-faire industriel	Wolter <i>et al.</i> , 2015
Clients	Les attentes des clients ont évolué vers un stade plus élevé de personnalisation et de flexibilité	Stock-Homburg, 2013 ; Helmrich, 2015
	Pour les clients, la collecte et l'analyse d'énormes quantités de données par les fabricants peuvent être considérées comme une menace pour leur vie privée	Sung, 2018
	Réduire l'écart entre le consommateur et le fabricant constituera un énorme défi pour les deux parties	Sung, 2018
	Compétence du client en matière de médias numériques	Schumacher <i>et al.</i> , 2016
Usine	En raison de la croissance exponentielle des technologies, les entreprises doivent être en mesure de traiter efficacement une énorme quantité de données (<i>big data</i>)	Huber et Kaiser, 2015
	Les infrastructures informatiques étendues, telles que les réseaux de communication et les protocoles Internet, doivent être construites et mise en œuvre	Brühl, 2015 ; SPD, 2015
	Les données doivent être protégées des accès non autorisés	Dorst, 2015 ; Huber et Kaiser, 2015 ; Shahd et Hampe, 2015 ; SPD, 2015
	Problèmes de sécurité informatique	Wolter <i>et al.</i> , 2015
	Nécessité d'éviter tout problème informatique, car cela entraînerait des interruptions de production coûteuses	Wolter <i>et al.</i> , 2015
	Absence d'infrastructure technologique pour aider les entreprises de fabrication à mettre en œuvre l'Industrie 4.0	Varghese et Tandur, 2014 ; Zhou <i>et al.</i> , 2016 ; Waibel <i>et al.</i> , 2017
	Une connectivité non sécurisée entrave la communication en temps réel entre les entreprises de fabrication, ce qui entrave la mise en œuvre de l'Industrie 4.0	Deloitte, 2015 ; Zhou <i>et al.</i> , 2016 ; Khan <i>et al.</i> , 2017
Environnement de travail	Pour éviter le chômage technologique, il faut redéfinir les emplois actuels, prendre des mesures pour adapter la main-d'œuvre aux nouveaux emplois qui seront créés	Roblek <i>et al.</i> , 2016
	Qualifier les employés pour leur permettre de s'orienter vers des espaces de travail dotés de processus plus complexes et garantir le maintien des emplois dans des environnements de travail en mutation	Hecklau <i>et al.</i> , 2016
	Concevoir le lieu de travail futur et numérique dans les entreprises puis qualifier les employés	Chryssolouris <i>et al.</i> , 2013 ; Quint <i>et al.</i> , 2015 ;

		Rentzos <i>et al.</i> , 2015 ; Schuh <i>et al.</i> , 2015 ; Becker and Stern, 2016
	Des stratégies doivent être développées pour attirer les jeunes, tout en conservant les connaissances des employés seniors	Stock-Homburg, 2013
	S'assurer de la flexibilité croissante des employés résultant des changements dans les organisations de travail	Stock-Homburg, 2013
	Réticence générale au changement de la part des parties prenantes	Wolter <i>et al.</i> , 2015
	Perte de nombreux emplois au profit de processus automatiques et de processus contrôlés par l'informatique, en particulier pour les couches de la société peu instruites	Wolter <i>et al.</i> , 2015
	La mise en œuvre de l'Industrie 4.0 dans l'industrie manufacturière supprime certaines opportunités d'emploi en raison du remplacement des humains par des robots et de l'utilisation intensive de l'automatisation dans le système de production ce qui constitue un véritable casse-tête pour les entreprises	Zhou <i>et al.</i> , 2016 ; Zezulka <i>et al.</i> , 2016 ; Waibel <i>et al.</i> , 2017
Développement des compétences	Améliorer l'efficacité et la performance individuelles/de groupe	Hamlin et Stewart, 2011
	Améliorer l'efficacité et la performance organisationnelles	Hamlin et Stewart, 2011
	Développer des connaissances, des aptitudes et des compétences	Hamlin et Stewart, 2011
	Augmenter le potentiel humain et la croissance personnelle	Hamlin et Stewart, 2011
	Les entreprises doivent qualifier leurs employés pour des tâches plus stratégiques, coordonnées et créatives, avec des responsabilités plus élevées	Ganschar <i>et al.</i> , 2013 ; Brühl, 2015
	Les employés doivent en outre acquérir les compétences nécessaires pour se préparer à l'augmentation du travail virtuel, par exemple avec des lunettes virtuelles	Stock-Homburg, 2013 BMBF, 2014
	Manque de compétences adéquates pour accélérer la marche vers la quatrième révolution industrielle	Wolter <i>et al.</i> , 2015
Gouvernance	Mettre en place des stratégies pour évaluer l'impact de l'Industrie 4.0 sur les marchés et la concurrence	Iansiti et Lakhani, 2014 ; Porter et Heppelmann, 2014 ; Agarwal et Brem, 2015 ;
	Déterminer une approche stratégique générale	
	Développer un chemin de transformation stratégique	

		Porter et Heppelmann, 2015 ; Schumacher <i>et al.</i> , 2016
	Effectuer des analyses coûts-avantages et prendre des décisions d'investissement	Bildstein et Seidelmann, 2014 ; Schuh <i>et al.</i> , 2014 ; Helu <i>et al.</i> , 2015 ; Bierer <i>et al.</i> , 2016
	Évaluer l'impact de l'Industrie 4.0 sur la vie professionnelle	Chryssolouris <i>et al.</i> , 2013 ; Quint <i>et al.</i> , 2015 ; Rentzos <i>et al.</i> , 2015 ; Schuh <i>et al.</i> , 2015 ; Becker and Stern, 2016
	Gouverner, contrôler et coordonner les processus de transformation	Fleisch <i>et al.</i> , 2014 ; Hirsch-Kreinsen, 2014 ; <i>The Economist</i> , 2015
	Développer une stratégie pour tous les acteurs impliqués dans la chaîne de valeur, afin de parvenir à un consensus sur les questions de sécurité et l'architecture pertinente avant le début de la mise en œuvre de l'Industrie 4.0	Wan et Zhou, 2016
	Établir une culture d'expérimentation, de prise de risque et de collaboration	Fleisch <i>et al.</i> , 2014 ; Hirsch-Kreinsen, 2014 ; <i>The Economist</i> , 2015
	Mettre en place des stratégies d'investissements qui encouragent les initiatives de l'Industrie 4.0 dans le secteur de la fabrication	Koch <i>et al.</i> , 2014 ; Zhou <i>et al.</i> , 2016
	Absence de plan stratégique dynamique pour soutenir l'adoption de l'Industrie 4.0 dans l'industrie manufacturière	Koch <i>et al.</i> , 2014 ; Zhou <i>et al.</i> , 2016
	Absence d'une équipe de gestion qualifiée pour exécuter les nouveaux modèles d'entreprise inventifs d'Industrie 4.0	Deloitte, 2015 ; Hecklau <i>et al.</i> , 2016

4.4 FREINS À L'ADOPTION DE L'INDUSTRIE 4.0

Dans cette section, nous présentons les résultats de la revue de littérature scientifique et professionnelle faite sur les freins associés à l'adoption de l'Industrie 4.0. Le tableau 7 présente les résultats des principaux freins liés à l'adoption de l'Industrie 4.0.

Tableau 7 : Principaux freins liés à l'adoption de l'Industrie 4.0 (Traduction libre)

Freins/Obstacles	Exemple d'auteurs
L'absence de normes	Glass <i>et al.</i> , 2018
Le manque de partenaires de coopération innovants	Glass <i>et al.</i> , 2018
Une infrastructure en retard	Glass <i>et al.</i> , 2018
La cybersécurité / Une sécurité informatique insuffisante / La sécurité des données / La perte des données	Glass <i>et al.</i> , 2018 ; Hofmann et Rüsçh, 2017 ; Bédard-Maltais, 2017
L'absence du « droit à l'erreur » dans les entreprises	Normand, 2018
Le manque de temps / Le manque « de temps d'innover » chez les employés	CEFRIIO, 2017 ; Normand, 2018
L'absence d'une stratégie claire (Mauvaise définition du besoin)	Normand, 2018
Avoir « la bonne personne à la bonne place » (Mauvais gestionnaire)	Normand, 2018
Le manque de main-d'œuvre (travailleurs) qualifiée / Le manque de savoir-faire / Le manque de personnel compétent / Perte des employés spécialisés	Glass <i>et al.</i> , 2018 ; CEFRIIO, 2017 ; Bédard-Maltais, 2017
La difficulté de retenir et d'attirer une main-d'oeuvre compétente	Beechler <i>et al.</i> , 2019 ; Whysall <i>et al.</i> , 2019
Risque financier / Manque d'accès au financement / Mauvais investissement / Mauvaise estimation du budget / Risque de marché / Risque de récession / Risque monétaire	Bédard-Maltais, 2017 ; CEFRIIO, 2017 ; Glass <i>et al.</i> , 2018
La non-convergence d'Industrie 4.0 avec le type de besoins et de service à la clientèle	CEFRIIO, 2017
Les coûts excessifs	Bédard-Maltais, 2017
Le rendement du capital investi incertain	Bédard-Maltais, 2017

La résistance, la réticence au changement chez les employés	Bédard-Maltais, 2017
La complexité de la technologie	Bédard-Maltais, 2017
La difficulté à savoir par où commencer	Bédard-Maltais, 2017
L'analyse pertinente des données	Bédard-Maltais, 2017
L'intégration des données	Bédard-Maltais, 2017
La difficulté à percevoir les avantages réels de ces projets	Bédard-Maltais, 2017

En analysant les données de ce tableau, il ressort un grand nombre de freins liés à l'adoption de l'Industrie 4.0. Les principaux freins sont l'absence de normes, une infrastructure en retard (Glass *et al.*, 2018), l'absence du « droit à l'erreur » dans les entreprises, une mauvaise définition du besoin (Normand, 2018), le manque de main-d'œuvre (travailleurs) qualifiée, le risque financier, le manque d'accès au financement (Bédard-Maltais, 2017 ; CEFRIO, 2017 ; Glass *et al.*, 2018), la résistance et la réticence au changement chez les employés, la complexité de la technologie ainsi que la difficulté à savoir par où commencer (Bédard-Maltais, 2017) pour ne citer que ceux-là.

4.5 COMPÉTENCES REQUISES POUR L'ADOPTION DE L'INDUSTRIE 4.0

Dans cette section, nous présentons les résultats de la revue de littérature faite sur les compétences requises associées à l'adoption de l'Industrie 4.0. Remarquons que la littérature scientifique consultée demeure très vague sur le sujet et la littérature professionnelle est presque muette, car la majorité des entreprises n'en sont qu'à leur début et recherchent leurs repères.

Selon Hecklau *et al.* (2016) pour développer une main-d'œuvre susceptible de répondre aux besoins actuels et futurs du marché, il faut identifier les compétences requises. Ainsi, les compétences sont définies comme l'ensemble des compétences, aptitudes, connaissances, attitudes et motivations dont une personne a besoin pour surmonter les tâches et les défis propres au travail (von Solga *et al.*, 2011 et Armstrong et Taylor, 2014). Malgré la littérature assez limitée sur la nature des compétences requises suite à l'implantation de l'Industrie 4.0, quatre catégories principales émergent pour classer les compétences à savoir les compétences techniques, méthodologiques, sociales et personnelles. Les compétences techniques

englobent toutes les connaissances et aptitudes professionnelles. Les compétences méthodologiques incluent toutes les compétences et aptitudes nécessaires à la résolution de problèmes en général et à la prise de décisions. Les compétences sociales englobent toutes les compétences et aptitudes, ainsi que l'attitude de coopérer et de communiquer avec les autres. Enfin, les compétences personnelles incluent les valeurs sociales, les motivations et les attitudes de la personne (Graßmann, 2005 ; von Solga *et al.*, 2011 et Becker, 2013).

Le tableau 8 inspiré du modèle de Hecklau *et al.*, 2016, nous présente les quatre catégories de compétences, les compétences requises, le contexte et les auteurs qui en ont fait état.

Tableau 8 : Ensemble de compétences agrégées par catégories (Hecklau *et al.*, 2016) (Traduction libre)

Catégories	Compétences requises	Contexte	Auteurs
Compétences techniques	Connaissance de pointe	En raison de l'augmentation des responsabilités, la connaissance devient de plus en plus importante.	Joerres <i>et al.</i> , 2016 ; Ten Hompel <i>et al.</i> , 2016
	Compétences techniques	Des compétences techniques complètes sont nécessaires pour passer de tâches opérationnelles à des tâches plus stratégiques.	Davies <i>et al.</i> , 2011 ; Joerres <i>et al.</i> , 2016
	Compréhension des processus	Une complexité de processus plus élevée nécessite une compréhension plus large et plus approfondie des processus.	Bauer <i>et al.</i> , 2015 ; Gehrke <i>et al.</i> , 2015 ; Ten Hompel <i>et al.</i> , 2016
	Compétences multimédias	Pour augmenter le travail virtuel, les employés doivent pouvoir utiliser les médias intelligents par exemple les lunettes intelligentes.	Davies <i>et al.</i> , 2011 ; Störmer <i>et al.</i> , 2014 ; Joerres <i>et al.</i> , 2016
	Compétences de codage	La croissance des processus numérisés crée un besoin accru d'employés dotés de compétences de codage.	Störmer <i>et al.</i> , 2014 ; Pompa, 2015 ; Joerres <i>et al.</i> , 2016
	Comprendre la sécurité informatique	Le travail virtuel sur des serveurs ou des plates-formes oblige les employés à prendre conscience de la cybersécurité.	Störmer <i>et al.</i> , 2014 ; Gehrke <i>et al.</i> , 2015 ;

			Ten Hompel <i>et al.</i> , 2016
Compétences méthodologiques	Créativité	Le besoin de produits plus innovants, ainsi que les améliorations internes, nécessitent de la créativité.	Störmer <i>et al.</i> , 2014 ; Pompa, 2015 ; Joerres <i>et al.</i> , 2016
	Esprit d'entreprise	Chaque employé ayant des tâches plus responsables et stratégiques doit agir en tant qu'entrepreneur.	Störmer <i>et al.</i> , 2014 ; Morgan, 2014 ; Joerres <i>et al.</i> , 2016
	Résolution de problèmes	Les employés doivent être en mesure d'identifier les sources d'erreur et d'améliorer les processus.	Davies <i>et al.</i> , 2011 ; Störmer <i>et al.</i> , 2014 ; Joerres <i>et al.</i> , 2016
	Résolution de conflits	Une plus grande orientation service améliore les relations avec les clients ; les conflits doivent être résolus.	Joerres <i>et al.</i> , 2016
	Prise de décision	Les employés assumant des responsabilités plus élevées en matière de processus, ils doivent prendre leurs propres décisions.	Davies <i>et al.</i> , 2011 ; Störmer <i>et al.</i> , 2014 ; Joerres <i>et al.</i> , 2016
	Aptitudes analytiques	La structuration et l'examen de grandes quantités de données et de processus complexes deviennent obligatoires.	Störmer <i>et al.</i> , 2014 ; Morgan, 2014 ; Joerres <i>et al.</i> , 2016
	Compétences en matière de recherche	Nécessité de pouvoir utiliser des sources fiables d'apprentissage continu dans des environnements en mutation.	Störmer <i>et al.</i> , 2014
	Orientation d'efficacité	Orientation vers l'efficacité — Les problèmes complexes doivent être résolus plus efficacement, par ex. analyser des quantités croissantes de données.	Morgan, 2014 ; Bauer <i>et al.</i> , 2015
Compétences sociales	Compétences interculturelles	Comprendre différentes cultures, en particulier des habitudes de travail divergentes, lorsque l'on travaille à l'échelle mondiale.	Davies <i>et al.</i> , 2011 ; Pompa, 2015

	Compétences linguistiques	Être capable de comprendre et de communiquer avec des partenaires et des clients mondiaux.	Pompa, 2015
	Aptitudes à la communication	L'orientation vers le service exige de bonnes aptitudes d'écoute et de présentation, tandis que l'augmentation du travail virtuel requiert des compétences de communication virtuelle suffisantes.	Morgan, 2014 ; Pompa, 2015 ; Joerres <i>et al.</i> , 2016
	Compétences de mise en réseau	Travailler dans une chaîne de valeur fortement mondialisée et entrelacée nécessite les réseaux de connaissances.	Störmer <i>et al.</i> , 2014 ; Joerres <i>et al.</i> , 2016
	Capacité à travailler en équipe	La croissance du travail en équipe et du travail partagé sur les plates-formes suppose la capacité à suivre les règles de l'équipe.	Störmer <i>et al.</i> , 2014 ; Gehrke <i>et al.</i> , 2015 ; Joerres <i>et al.</i> , 2016
	Capacité à faire des compromis et à coopérer	Les entités tout au long de la chaîne de valeur développent des partenaires égaux ; chaque projet doit créer des situations gagnant-gagnant, en particulier dans les entreprises où le nombre de projets est en augmentation.	Störmer <i>et al.</i> , 2014 ; Joerres <i>et al.</i> , 2016
	Capacité à transférer des connaissances	Les entreprises doivent conserver leurs connaissances au sein de l'entreprise en particulier dans le cadre du changement démographique actuel, les connaissances explicites et tacites doivent être échangées.	Störmer <i>et al.</i> , 2014 ; Gehrke <i>et al.</i> , 2015 ; Joerres <i>et al.</i> , 2016
	Compétences en leadership	Des tâches plus responsables et des hiérarchies aplaties font de chaque employé un leader.	Ten Hompel <i>et al.</i> , 2016
Compétences personnelles	Flexibilité	L'augmentation du travail virtuel rend les employés indépendants du temps et du lieu ; la rotation des tâches exige également que les employés fassent preuve de souplesse dans leurs responsabilités professionnelles.	Störmer <i>et al.</i> , 2014 ; Morgan, 2014 ; Pompa, 2015 ; Joerres <i>et al.</i> , 2016

	Tolérance à l'ambiguïté	Accepter le changement, en particulier le changement propre au travail, en raison de la rotation ou à la réorientation des tâches.	Morgan, 2014 ; Gehrke <i>et al.</i> , 2015 ; Joerres <i>et al.</i> , 2016
	Motivation à apprendre	Des changements plus fréquents dans le cadre du travail obligent les employés à vouloir apprendre.	Morgan, 2014 ; Gehrke <i>et al.</i> , 2015
	Capacité à travailler sous pression	Les employés impliqués dans des processus d'innovation doivent faire face à une pression accrue, en raison de cycles de vie et de délais de commercialisation plus courts.	Störmer <i>et al.</i> , 2014
	État d'esprit durable	En tant que représentants de leur entreprise, les employés doivent également soutenir les initiatives de développement durable.	Joerres <i>et al.</i> , 2016
	Conformité	Règles plus strictes en matière de sécurité informatique, d'utilisation de la machine ou d'horaires de travail.	Störmer <i>et al.</i> , 2014. Pompa, 2015

En analysant les données de ce tableau, les compétences techniques regroupent les connaissances de pointes (Joerres *et al.*, 2016 ; Ten Hompel *et al.*, 2016), les compétences techniques (Davies *et al.*, 2011 ; Joerres *et al.*, 2016), les compétences de codage (Störmer *et al.*, 2014 ; Pompa, 2015 ; Joerres *et al.*, 2016) et les compétences en sécurité informatique (Störmer *et al.*, 2014 ; Gehrke *et al.*, 2015 ; Ten Hompel *et al.*, 2016). Ensuite, les compétences méthodologiques regroupent d'une part la créativité (Störmer *et al.*, 2014 ; Pompa, 2015 ; Joerres *et al.*, 2016) et l'esprit d'entreprise (Störmer *et al.*, 2014 ; Morgan, 2014 ; Joerres *et al.*, 2016), et d'autre part la capacité de résolution des problèmes (Davies *et al.*, 2011 ; Störmer *et al.*, 2014 ; Joerres *et al.*, 2016) et la résolution des conflits (Joerres *et al.*, 2016) ainsi que des aptitudes analytiques (Störmer *et al.*, 2014 ; Morgan, 2014 ; Joerres *et al.*, 2016). Les compétences sociales regroupent les compétences interculturelles (Davies *et al.*, 2011 ; Pompa, 2015), la capacité à travailler en équipe (Störmer *et al.*, 2014 ; Gehrke *et al.*, 2015 ; Joerres *et al.*, 2016) et les compétences en matière de leadership (Ten Hompel *et al.*, 2016). Enfin, les compétences personnelles regroupent la flexibilité (Störmer *et al.*, 2014 ; Morgan, 2014 ; Pompa, 2015 ; Joerres *et al.*, 2016), la motivation à apprendre (Morgan, 2014 ; Gehrke *et al.*, 2015), la capacité à travailler sous pression (Störmer *et al.*, 2014) et la conformité (Störmer *et al.*, 2014 ; Pompa, 2015).

4.6 ÉTAT DE LA SITUATION DES PME MANUFACTURIÈRES AU CANADA ET AU QUÉBEC VIS-À-VIS DE L'INDUSTRIE 4.0

Après avoir complété la revue de littérature scientifique sur les bénéfices, opportunités, barrières et freins induits par l'implantation de l'Industrie 4.0, nous présentons dans cette section les résultats concernant l'état de la situation des PME manufacturières au Canada et au Québec vis-à-vis de l'Industrie 4.0. Nous relatons en particulier les bénéfices, opportunités, barrières et freins que les entreprises canadiennes et québécoises ont eus à gérer.

Au Canada, les entreprises qui ont entamé le virage 4.0 disent avoir accru leur productivité de 60 %, réduit leurs coûts d'exploitation de 50 % et amélioré la qualité globale de leurs produits de 42 %, comblant par conséquent leur retard (Boston Consulting Group, 2015). Elles sont même presque deux fois plus susceptibles d'avoir une croissance annuelle de leurs revenus de 10 % par rapport aux entreprises qui n'ont pas adopté ces technologies numériques (Les Affaires, 2017). Bien que près de 40 % des PME canadiennes du secteur de la fabrication aient mis en œuvre des projets de ce type, seulement 3 % d'entre elles ont entièrement numérisé leur production, et 17 % en sont à l'étape de la planification (Bédard-Maltais, 2017).

Par ailleurs, Les Affaires (2017) indique que cette révolution requière une relance de l'industrie manufacturière, des stratégies numériques à adopter et un audit numérique à engager. Ainsi, pour la relance de l'industrie manufacturière, il est aujourd'hui possible de créer une usine intelligente avec des capteurs sans fil, des logiciels et d'autres technologies de pointe utilisées de concert afin d'optimiser la production et d'améliorer la satisfaction des clients. Ces outils permettent à l'entreprise d'avoir une réaction rapide et précise par rapport aux changements du marché, d'offrir des produits personnalisés et d'intensifier son efficacité opérationnelle dans le cadre d'un cycle d'amélioration continue. L'usine connectée repose en partie sur des équipements et des outils qui sont offerts depuis plusieurs années déjà : systèmes de gestion et de processus ERP (**E**nterprise **R**essource **P**lanning), les logiciels de conception et de fabrication assistées par ordinateur, capteurs, automates et robots (Les Affaires, 2017). À ce titre, Sébastien Houle, directeur général de Productique Québec, estime que l'usine 4.0 est l'intégration de tous ces systèmes qui facilitent la connexion des équipements et des systèmes de gestion pour collecter, analyser des données et réagir en temps réel (Les Affaires, 2017).

En outre, il convient de savoir que l'adoption des stratégies numériques à l'ère de l'Industrie 4.0 implique un changement dans la culture et la vision de l'entreprise. Il ne s'agit pas uniquement d'une affaire de programmes informatiques, mais aussi d'une élaboration de nouvelle stratégie d'affaires au préalable (Les Affaires, 2017). Il paraît donc utile de créer

des pratiques de gestion fiables avant de se lancer dans une démarche 4.0. En effet, une entreprise qui déploie un logiciel pour recueillir des informations sur la planification et la productivité ne saurait atteindre ses objectifs que si elle implante au préalable des systèmes d'indicateurs de performance (Les Affaires, 2017). Du reste, dans le contexte de l'Industrie 4.0, l'audit numérique permet de déterminer la maturité numérique de l'entreprise, et d'accompagner des PME manufacturières dans les enjeux de la transformation numérique. L'audit numérique est d'autant plus important que les dirigeants d'entreprises manufacturières se montrent sceptiques quant au développement de l'usine 4.0 sans ce diagnostic initial (Les Affaires, 2017).

Toutefois, le journal Les Affaires (2019) révèle que le virage informatique est, dans l'ensemble, bien enclenché dans les entreprises québécoises de 50 employés et plus. Par contre, la véritable transformation numérique prend, pour le moment, la forme des mesures ad hoc visant à améliorer beaucoup plus la productivité plutôt que l'expérience client. En dépit de la nécessité de revoir cette stratégie pour la survie de l'entreprise, les gestionnaires québécois restent quand même très confiants en ce qui concerne le degré d'adoption du numérique au sein de leurs entreprises ; et 26 % d'entre eux se considèrent même avant-gardistes dans leurs secteurs (Les Affaires, 2019). Il va sans dire que les entreprises québécoises s'estiment déjà bien avancées dans le virage numérique, et qu'elles sont optimistes quant à son impact sur les affaires courantes. Un optimisme qui se traduit par la volonté de 54 % des investisseurs d'injecter davantage de ressources dans les technologies numériques, soit 31 % de plus que les années qui ont précédé l'an 2019 (Les Affaires, 2019). L'impact du virage 4.0 sur le secteur de la fabrication promet d'être remarquable à l'image des entreprises européennes et américaines où des usines hautement automatisées peuvent désormais se mesurer aux usines à faible coût de l'Asie (Bédard-Maltais, 2017).

C'est dans cette dynamique que Placide Poba-Nzaou, professeur à l'École des sciences de la gestion de l'Université du Québec à Montréal, et spécialiste en adoption des technologies de l'information et en transformations numériques, affirme qu'il faut tirer des leçons des pratiques des entreprises ayant réussi leur transformation vers l'usine 4.0 (Les Affaires, 2019). D'abord, la première leçon consiste à retenir que les entreprises qui ont réussi leur transformation sont celles qui ne percevaient pas la décision de passer au 4.0 comme un simple choix, mais comme une nécessité, voire une question de survie ; puis, il est important de profiter de l'expérience des leaders du 4.0 ; et enfin il est crucial de comprendre qu'il faut tirer profit du capital humain en trouvant des mécanismes pour rendre le travail humain plus intéressant, diversifié et productif et non de remplacer uniquement les employés par des machines (Les Affaires, 2019). Par ailleurs, les entreprises qui mettent en place une transition vers l'Industrie 4.0 pensent pouvoir améliorer leur rentabilité grâce à une réduction des coûts de main-d'œuvre, et par ailleurs, grâce à un taux d'utilisation d'actifs maximisé (réduction du temps de changement des produits, réduction des arrêts-machine, des stocks et du temps

de maintenance, etc.), et grâce à plus de flexibilité dans le processus de fabrication qui permet d'accroître la valeur des produits et d'améliorer les marges (CCMM, 2017).

Au Canada, les entreprises qui adoptent les technologies numériques 4.0 en tirent de réels avantages. Selon Bédard-Maltais (2017), une étude de la Banque de Développement du Canada (BDC) mentionne que 60 % des entreprises ayant adopté les technologies numériques affirment que leur productivité s'est considérablement accrue, car une usine intelligente offre la capacité à l'entreprise d'anticiper, de prévenir les temps d'arrêt et d'optimiser l'efficacité. Rayhan Abdulmughnee, conseiller d'affaires à BDC, annonce aussi que les technologies numériques permettent d'indiquer, grâce aux capteurs, le nombre total d'articles ou de produits, combien de ces articles sont défectueux et le temps de production par article (Bédard-Maltais, 2017). De surcroît, 50 % des utilisateurs du numérique affirment avoir réduit leurs coûts d'exploitation grâce à l'entretien préventif qui limite les réparations coûteuses, à l'amélioration du flux de production, à l'utilisation d'imprimantes 3D qui rend accessible le prototypage, réduit les coûts de conception et accélère la mise en marché (Bédard-Maltais, 2017). Également, 42 % des entreprises impliquées dans la numérisation disent avoir amélioré la qualité globale de leurs produits tandis que 13 % indiquent avoir amélioré leur capacité à innover.

L'Industrie 4.0 permet aussi l'utilisation adéquate et performante de l'information pour des prises de décisions. Selon Rayhan Abdulmughnee, conseiller d'affaires à BDC, l'utilisation de l'Industrie 4.0 peut être payante pour les entreprises qui utilisent les données pour prendre des décisions stratégiques, même si au début, les entrepreneurs sont souvent submergés par toutes les données qu'ils obtiennent et ne savent pas très souvent comment s'y prendre. C'est dans ce contexte que les propriétaires d'entreprises doivent définir les données dont ils ont besoin et ensuite la fréquence à laquelle ces données doivent être examinées. (Bédard-Maltais, 2017). C'est le cas de Superior Cabinets, une entreprise de conception et de fabrication de cuisines sur mesure basée à Saskatoon. Cette entreprise a investi deux millions de dollars dans les technologies numériques en vue de transformer l'entreprise. Et cet investissement a permis de mettre en place des stratégies qui consistent à utiliser un logiciel permettant au personnel de concevoir une cuisine avec les clients dans les magasins de l'entreprise en Saskatchewan et en Alberta, puis de transmettre la commande directement à l'usine grâce à un processus sans papier très efficace et l'impression 3D dont elle se sert pour créer divers articles dans les processus de fabrication. Cette initiative a aidé l'entreprise à faire passer le nombre de systèmes logiciels qu'elle utilise de dix-sept à deux et d'accroître sa productivité à environ 50 %, de réduire son taux de gaspillage de 7 % à 2 % pour ses coûts de vente, d'améliorer l'expérience client de façon spectaculaire en accélérant l'exécution des commandes, en augmentant la visibilité de leur traitement et en éliminant plusieurs opérations manuelles. Cette entreprise a commencé à surveiller une série de mesures liées aux finances et au service à la clientèle, dont le contrôle de la qualité, la livraison à temps et d'autres indicateurs de rendement clé. Elle a également créé un portail

en ligne où les employés peuvent suivre la progression des commandes et obtenir des statistiques en temps réel sur le service.

Selon Hébert *et al.* (2016), la mise en place d'une stratégie numérique facilite aussi la protection des informations sensibles au sein d'une entreprise. L'Industrie 4.0 apporte le savoir-faire pour assurer au mieux la gestion de la cybersécurité et, par ailleurs, faciliter l'acquisition de nouvelles compétences requises afin de réussir la transition vers l'Industrie 4.0. S'il est vrai que l'importance de l'Industrie 4.0 n'est plus à démontrer, il faut reconnaître que beaucoup reste encore à faire en ce qui concerne les compétences à acquérir. Jonathan Gaudreault, directeur du Consortium de recherche en ingénierie des systèmes industriels 4.0 à l'université Laval, estime que le système académique ne répond pas encore à la demande. Plusieurs nouvelles compétences doivent être développées telles que les compétences en lien avec la gestion des données (data management), la sécurité des données (data security), l'interaction humain-machine (Human-machine interaction), la conception d'interfaces utilisateurs (user interface design), le développement de logiciels (software development), la programmation (programming), la science des données (data science), l'analytique (analytics) (Les Affaires, 2018). Ainsi, l'enjeu majeur des entreprises qui s'investissent dans l'Industrie 4.0 porte sur le recrutement et la formation des employés compétents. Autrement dit, il s'agit de trouver l'approche adéquate pour que l'entreprise réussisse sa nouvelle reconfiguration de sorte à préserver ses avantages concurrentiels. D'après le Ministère de l'Économie et de l'Innovation (MEI) (2016a), l'Industrie 4.0 est une véritable opportunité pour les PME manufacturières de s'engager dans le numérique avec pour corollaires d'importants changements au niveau du mode de gestion de la main-d'œuvre et des modèles d'affaires. Ces nouveaux modèles vont nécessiter selon Man et Strandhagen (2017) l'intégration horizontale des produits, des différentes parties prenantes telles que les clients, les travailleurs, les fournisseurs, et les équipements de fabrication intégrés dans un réseau virtuel qui permet d'interchanger des données dans différentes phases du cycle de vie du produit.

Pour autant, les PME manufacturières contemporaines en quête de productivité orientent leurs efforts autour du produit et gèrent une série d'activités et de processus minimales qui sont : les achats, la fabrication, la livraison, la vente et le service après-vente du produit. Ainsi pour être plus efficaces, il est important que les entreprises standardisent leur processus avec des logiciels et fassent de l'amélioration continue en cherchant à faire des économies d'échelle, à réduire leurs coûts, à augmenter la qualité et leur efficacité, etc (Beaudoin *et al.*, 2016). Dans ce contexte, les PME manufacturières orientées vers l'Industrie 4.0 et en quête de valeur ajoutée et d'agilité recueillent un maximum de données qu'elles jugent importantes dans le but d'apporter un plus à leurs activités et à leur modèle d'affaires. Ces données collectées sont des informations qui proviennent, selon Beaudoin *et al.* (2016), de leur chaîne d'approvisionnement (par exemple : variabilité des coûts des matières premières, temps de livraison, capacité des fournisseurs, etc.), de leur chaîne

logistique (par exemple : commandes en préparation, déplacements, énergie, etc.), de leur environnement d'affaires (par exemple médias sociaux, nouvelles tendances et besoins des clients, commandes prévisionnelles, etc.), et des données issues du produit lui-même, comme de son environnement (par exemple, données biométriques d'un vêtement ou d'une montre intelligente, données d'usage d'un moteur, capteur de chaleur, de vibration, etc.).

En somme, la révolution de l'Industrie 4.0 des entreprises manufacturières aspire à capter en temps réel les perturbations, les variations, les changements de tendance, les nouveaux besoins des clients, et à générer des décisions rapides pour s'ajuster et rechercher de la flexibilité dans les processus de production plus personnalisée, voire dans la réinvention de l'offre commerciale (Beaudoin *et al.*, 2016).

4.7 CADRE D'ORIENTATION DE LA THÉMATIQUE

Notre classement des dimensions suivantes — industrie, usine, coopération et réseaux, économie, modèles d'affaires et marché, produits et les services, clients, environnement de travail, développement des compétences, et gouvernance — nous ont permis de faire une analyse de l'Industrie 4.0 sous les aspects organisationnels que les entreprises (les PME en particulier) rencontrent dans sa mise en œuvre.

En effet, lors de la détermination des opportunités et bénéfiques, celles-ci rencontrent des défis et des risques, ainsi que des facteurs propices et des freins inhérents à son adoption.

Notre attention s'est portée en particulier sur trois dimensions : environnement de travail, développement des compétences et gouvernance. Plusieurs chercheurs ont tenté de donner leur vision sur certaines de ces dimensions. À titre d'exemple, Pereira et Romero (2017) ont abordé entre autres les dimensions propres à l'environnement du travail et au développement des compétences, Schumacher *et al.* (2016) et Schneider (2018) ont quant à eux abordé la dimension de la gouvernance qui inclut les ressources humaines, la culture, la stratégie et l'analyse, la planification et la mise en œuvre, ainsi que le changement et le leadership. Néanmoins, cela n'est pas suffisant, car les données statistiques manquent. Les revues de littérature n'en parlent presque pas ou très peu ou seulement en quelques lignes, sans vraiment aborder ces dimensions dans leurs recherches. Toutefois au Canada, et au Québec en particulier, seules des enquêtes réalisées par le Centre francophone d'informatisation des organisations (CEFRIO) et la Banque de Développement du Canada (BDC) en 2017 font état de brèves données statistiques portant sur quelques-unes de nos dimensions sans y apporter non plus des études approfondies.

Compte tenu d'une littérature lacunaire en information et d'un manque de sondages au Québec au sujet de nos dimensions — environnement de travail, développement des compétences et gouvernance —, nous avons décidé d'orienter nos recherches dans ce sens et d'apporter notre contribution en axant notre réflexion sur le thème : « **la faisabilité organisationnelle des projets d'implantation de l'Industrie 4.0 dans les PME manufacturières de la région de Chaudière-Appalaches** ».

5. MÉTHODOLOGIE DE RECHERCHE

Pour cette étude, la méthodologie de recherche qualitative est employée. Cette méthodologie permet de répondre aux questions de recherche relatives à des situations complexes ou aux questions ayant trait à l'exploration, à la description et à la compréhension de phénomènes. De façon générale, les recherches qualitatives visent le même but, soit celui de rendre compte de l'expérience humaine dans un milieu naturel (Fortin et Gagnon, 2016). Dans notre cas, une collecte de données par des entrevues semi-structurées sera réalisée auprès de 15 PME manufacturières de la région de Chaudière-Appalaches. Nous définissons la PME comme une entreprise ayant entre 1 et 499 employés inclusivement, dont le chiffre d'affaires ne dépasse pas 50 millions de dollars. La population d'entreprises retenue concerne l'ensemble de toutes les PME manufacturières implantées au Canada qu'elles adoptent ou non l'Industrie 4.0. La taille de l'échantillon de cette recherche qualitative n'a pas été prédéterminée mais basée sur le concept de saturation. L'échantillon est composé de gestionnaires qui occupent des postes de direction (les directeurs, les hauts dirigeants) et ont des connaissances sur l'Industrie 4.0 ou des responsables (employés) de la transformation numérique des entreprises manufacturières. Les répondants doivent donc respecter ces critères d'inclusion.

Pour constituer notre échantillon, nous avons contacté 240 entreprises manufacturières dans la région de Chaudière-Appalaches dont les coordonnées ont été obtenues sur le site <https://www.icriq.com/fr/avancee> par le Système de Classification des Industries de l'Amérique du Nord (SCIAN) Canada version 3.0. Quinze entreprises étaient favorables à nous accorder une entrevue de 60 à 90 minutes, ce qui nous a permis d'atteindre les résultats recherchés auprès de cet échantillon représentatif d'entreprises du secteur manufacturier de la Chaudière-Appalaches. Le recrutement de ces entreprises s'est déroulé sur une période de trois mois entre la mi-juin et la mi-septembre 2019.

Les entreprises interrogées appartiennent à une variété de secteur d'activité tel que l'industrie du bois, l'industrie du plastique, l'industrie du textile, l'industrie de l'aéronautique et composite industriel, l'industrie de l'électronique, l'industrie des moules en acier et aluminium, l'industrie de la construction, l'industrie d'éclairage résidentiel et commercial et

l'industrie d'équipementier. De plus, les différentes personnes ayant participé à nos entrevues ont tous des profils de responsabilités différents : directeur recherche et développement, directeur général, président, directeur des opérations, technicien réseau et programmeur, responsable en informatique, coordonnateur des opérations, vice-président innovation et services aux opérations, vice-président recherche et développement, chargé des projets technologie de l'information, vice-présidente aux opérations.

Les quinze entreprises ont été classées en deux grands groupes qui eux aussi ont été scindés en des sous-groupes compte tenu du profil que présentait chacune des entreprises une fois sur le terrain. Le tableau 9 présente la classification de ces entreprises.

Tableau 9 : Indentification des entreprises

Groupes	Codes	Sous-groupes	Numéro du Participant	Types d'industrie
Pas d'adoption de l'Industrie 4.0	A	Répondants n'ayant pas adopté l'Industrie 4.0	1	Industrie d'équipementier (équipement de tracteur {agricole}, de jardin, de pelouse, équipement de quatre roues)
			2	Industrie de la construction (porte et fenêtre)
			3	Industrie du plastique
			4	Industrie de l'électronique (systèmes de chauffage)
			12	Industrie des moules en acier et aluminium
			14	Industrie de l'aéronautique et composite industriel
	B	Répondant en processus d'adoption de l'Industrie 4.0	11	Industrie du textile
	C	Répondants qui envisagent d'implanter l'Industrie 4.0	7	Industrie du plastique
			9	Industrie du plastique
	D	Répondant ayant au sein de son entreprise une personne-ressource qui a travaillé dans un environnement 4.0	8	Industrie du bois
E	Répondant qui implante l'Industrie 4.0 chez des clients	13	Industrie d'équipementier (bois, construction, équipement de bâtiment {électricité, plomberie, etc})	
Adoption de l'Industrie 4.0	F	Répondants ayant adopté l'Industrie 4.0	5	Industrie du bois
			6	Industrie d'éclairage résidentiel et commercial
			10	Industrie du bois
	G	Répondant ayant travaillé pour une autre entreprise qui a adopté l'Industrie 4.0, mais qui travaille actuellement comme consultant à son propre compte	15	Industrie du plastique

Le fait d'avoir pu obtenir différents secteurs d'activité et différents profils d'intervenants nous a permis de collecter des données riches en interprétation qui nous sont été utiles dans lors de l'interprétation des résultats.

Le recrutement des entreprises s'est d'abord fait avec les participants d'abord par courriel et ensuite par appel téléphonique a été réalisée sur une durée de trois mois, entre la mi-juin et la mi-septembre 2019. Ensuite, la réalisation des entrevues a été faite sur une période d'environ trois semaines de la fin septembre à la mi-octobre 2019 dans la région de Chaudière-Appalaches. Une fois les entrevues complétées, leurs enregistrements ont été transcrits et analysés par la méthode d'analyse de contenu. Cette méthode consiste à traiter le contenu des données narratives de manière à en découvrir les thèmes saillants et les tendances. Ainsi, on pourrait se demander quels sont les groupes de données similaires susceptibles de former les catégories. Ce processus analytique comporte la fragmentation des données en unités d'analyse plus petites, le codage qui associe chaque unité d'analyse à une catégorie et le regroupement du matériel codé selon les concepts ou les catégories (Fortin et Gagnon, 2016).

Par ailleurs, comme toute recherche avec les êtres humains, notre étude devait respecter certaines considérations éthiques dans sa réalisation, plus particulièrement en ce qui a trait aux personnes qui y participent. Ainsi, une demande de certification éthique a été soumise au comité d'éthique de la recherche avec des êtres humains de l'UQAR qui nous a délivré un certificat d'éthique. Les participants ont reçu l'assurance que leur anonymat serait préservé et que les réponses qu'ils fourniraient demeureraient confidentielles. Nous avons obtenu le consentement libre et éclairé de tous les participants pressentis à l'étude après leur avoir présenté le but de l'étude, les risques et les avantages potentiels de celle-ci et aussi en leur assurant qu'ils pouvaient se retirer de la recherche à tout moment comme cela a été stipulé dans le formulaire de consentement signé de tous. Finalement, les questions ont été posées avec neutralité afin d'éviter de biaiser les résultats obtenus.

6. PRÉSENTATION DES RÉSULTATS DES ENTREVUES

Dans cette section, nous présentons les résultats obtenus de nos entrevues auprès des entreprises ayant ou non adopté l'Industrie 4.0 pour les défis, les opportunités, les freins, les prérequis, les compétences requises, l'environnement de travail et la gouvernance afin de faire ressortir leur point de vue. Avant d'entrer dans le vif du sujet, une compréhension du mot défi, frein et enjeu s'avère indispensable afin de permettre au lecteur de cerner et comprendre le sens des mots utilisés. Ainsi, les défis font référence à une situation difficile dans laquelle nous avons de la difficulté à réaliser notre objectif et que nous devons obligatoirement surmonter. En revanche, les freins sont tout ce qui nous empêche de relever un défi. Ils renvoient alors à la notion d'obstacle, de contrainte, d'entrave. C'est donc tout ce qui empêche d'avancer, tout ce qui empêche ou retarde une action, une progression. C'est

aussi tout ce qui ralentit ou peut mettre un terme au développement de quelque chose. Cependant, les enjeux sont intégrés ici aussi aux freins puisque les enjeux réfèrent en général à ce qu'on peut perdre (donc, ne pas atteindre nos objectifs) ou gagner (donc, atteindre nos objectifs) face une situation ou une action donnée.

5.1 RÉSULTATS EN LIEN AVEC LES DÉFIS ET LES BARRIÈRES LIÉES À L'IMPLANTATION DE L'INDUSTRIE 4.0 OU DE L'UNE DE SES COMPOSANTES DANS UNE ENTREPRISE

Le tableau 10 ci-dessous résume les principaux résultats en matière de défis et de barrières. Au vue des données extraites des entrevues et des informations de ce tableau, nous constatons que les **besoins financiers** et les **barrières sur le plan des ressources humaines** sont des préoccupations importantes qui concernent toutes les entreprises ayant adopté ou non l'Industrie 4.0. Ensuite, viennent les **défis stratégiques** ; les **défis techniques, matériels et logistiques** qui sont pour la majorité des cas des préoccupations pour les entreprises n'ayant pas adopté l'Industrie 4.0 ainsi que pour les entreprises l'ayant adopté. Enfin, seules les entreprises n'ayant pas adopté l'Industrie 4.0 ont des **défis relationnels**.

Tableau 10 : Résultats des entrevues liés aux défis et barrières de l'implantation de l'Industrie 4.0 ou de l'une de ses composantes dans une entreprise

Défis & Barrières	Sous défis & barrières	Pas d'adoption 4.0										Adoption 4.0					
		1	2	3	4	12	14	11	7	9	8	13	5	6	10	15	
		A					B	C		D	E	F			G		
Barrières liées aux ressources humaines	Nouvelles compétences requises	X			X			X	X					X	X	X	X
	Besoin en personnel qualifié																
Défis techniques, matériels et logistiques	Collecte, analyse, traitement et sécurisation des données		X		X		X					X	X				X
	Absence de matériels et d'infrastructures technologiques pour la mise en œuvre de l'Industrie 4.0										X		X				
	Connectivité des objets, des logiciels, des équipements	X															
	Difficulté de fabrication des produits personnalisés et à la pièce pour les clients	X		X			X										
Défis financiers	Besoin en investissement et en rentabilité		X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
Défis stratégiques	Développement et élaboration de plans stratégiques et numériques 4.0	X	X					X	X	X	X						X
	Volonté de la part du dirigeant de ne pas se lancer dans l'Industrie 4.0					X											
Défis relationnels	Réduction du déséquilibre entre l'offre disponible des entreprises et la demande attendue des clients (la personnalisation des produits)											X					
	Élaboration de collaborations, d'alliances stratégiques avec leurs fournisseurs ou leurs concurrents pour rester compétitives																
	Identification de consultants capables de répondre en un temps record aux besoins de l'entreprise							X		X		X					

6.1.1 LES DÉFIS FINANCIERS

Nous constatons que les **besoins financiers** (besoin en investissement et rentabilité) sont les points majeurs communs évoqués par toutes les entreprises qu'elles aient ou non adopté l'Industrie 4.0. Pour la majorité des répondants, la question de la rentabilité est importante. C'est ainsi que le répondant 14 (groupe A) nous a signifié qu'il vaut mieux commencer par un projet de petite taille très ciblé et qui a un très grand retour sur investissement. Le répondant 3 (groupe A) quant à lui dit que le problème est que la majorité des personnes qui veulent se lancer dans l'implantation de l'Industrie 4.0 ne savent pas si cela sera rentable ou non, car cela prend nécessairement des capitaux. Cependant, le répondant 11 (groupe B) estime qu'il est difficile de voir le retour sur investissement du 4.0. Il estime que c'est impossible de mesurer l'impact de l'investissement sur le court et moyen terme, mais plutôt sur du long terme, car c'est totalement intangible. De plus, le répondant 8 (groupe D) renchérit en disant qu'en termes d'investissement il faut commencer à la base. Il faut donc connaître le type de procédé, le type de technologie dont on a réellement besoin, mais à l'échelle de son entreprise. Cela fait donc dire de la part du répondant 5 (groupe F) que le tout est une question de budget, de moyen. Ce qui reconforte la position du répondant 7 (groupe C) qui trouve qu'investir dans l'Industrie 4.0 c'est assez dispendieux.

6.1.2 LES BARRIÈRES DES RESSOURCES HUMAINES

Les nouvelles compétences requises et le besoin en personnel qualifié constituent des **barrières en ce qui concerne les ressources humaines**, pour la totalité des entreprises ayant adopté l'Industrie 4.0 et une infime partie des entreprises n'ayant pas adopté l'Industrie 4.0. Les répondants 5 et 10 (groupe F) et le répondant 7 (groupe C) estiment que la véritable préoccupation est de trouver les bonnes personnes, le personnel et/ou la main d'œuvre qualifiée capable d'implanter l'Industrie 4.0 et aussi de disposer des compétences pour s'adapter et travailler dans ce nouveau milieu. Ainsi, le répondant 11 confirme par ses propos effectivement que cela prend du personnel qualifié et compétent capable de l'implanter l'Industrie 4.0. Cependant, il se pose le problème de l'aspect générationnel comme le soulignent les répondants 1 et 4 (groupe A) et le répondant 6 (groupe F) et donc de la résistance du staff (personnel) de s'adapter à toutes nouvelles formes de changement (répondant 4). Dans cet ordre d'idée, pour le répondant 15 (groupe G) il y a donc un véritable défi de gestion de changement, car tout changement a obligatoirement de gros impacts au niveau des employés dans les entreprises.

6.1.3 LES DÉFIS TECHNIQUES, MATÉRIELS ET LOGISTIQUES

Sur le plan des **défis techniques**, la collecte, l'analyse, le traitement et la sécurité des données sont les points jugés importants par environ la moitié des répondants des entreprises n'ayant pas adopté l'Industrie 4.0 et par un seul des répondants des entreprises ayant adopté l'Industrie 4.0. Les répondants 4 et 14 (groupe A) et le répondant 15 (groupe G) estiment qu'il y a un réel défi au niveau du système de collecte des données. Ainsi, le répondant 14 (groupe A) dit qu'il faut être conscient de ce qu'on fait, qu'il ne faut pas juste se lancer dans l'Industrie 4.0 en disant je vais prendre toutes les données possibles et après ça je vais trouver quoi faire avec, il faut déjà avoir une bonne idée d'où commencer et quoi faire exactement des données recueillies. C'est effectivement là qu'intervient aussi le défi au niveau du système d'analyse et de traitement des données. De plus pour le répondant 15 (groupe G), le principal défi est de savoir comment les gens vont utiliser le système et comment ils vont faire les transactions à l'intérieur du système. Selon ses propos, « ... *lorsque la qualité des données rentrée dans le système n'est pas bonne, ce qui va en sortir ne le sera pas non plus...* ». Le répondant 13 (groupe E) étant un installateur de l'Industrie 4.0 chez les clients, estime que l'Industrie 4.0 c'est beaucoup d'information à analyser et traiter. En tant qu'intégrateur, il a le devoir et l'obligation de rendre l'information la plus simple et la plus claire possible afin qu'il soit facile au client de la comprendre, de l'interpréter en vue de prendre les meilleures décisions. Pour sa part, l'Industrie 4.0 est considérée comme un outil de prise de décision. D'où il faut vraiment simplifier les processus et présenter l'information au client dans un format assez simple grâce à des tableaux de bord assez clairs et précis. Il est soutenu aussi par le répondant 14 (groupe A) qui confirme que l'Industrie 4.0 est bel et bien un outil de prise de décision pour les dirigeants d'entreprise. Selon lui, lorsqu'on lie et agrège toutes ces données-là, il y a des indicateurs qui vont en sortir et qui vont permettre aux responsables de prendre la bonne décision. Dans ce même ordre d'idée, le répondant 8 (groupe D) estime qu'afin que l'Industrie 4.0 devienne un outil d'aide à la prise de décision, il faut au préalable être capable de définir clairement son besoin. Et là encore si le besoin est clairement défini, il faut encore être capable de dire exactement ce qu'on veut implanter comme outil pour contrôler son procédé dans la chaîne de production de l'entreprise. Toutefois, le répondant 2 (groupe A) met un accent particulier sur la sécurité des données. Il estime que si son système informatique plante une journée, c'est bien problématique pour lui, alors qu'avec le papier le travail est bien plus long, mais on y arrive étant donné qu'il a une petite entreprise. Il est néanmoins certain que pour les grandes entreprises c'est différent, car la grande majorité ont des serveurs qui sont capables d'enregistrer et de faire des sauvegardes de données sur d'autres serveurs qui peuvent prendre le relai immédiatement dans un délai très court sans grande incidence sur le rendement de l'entreprise.

Par contre, sur le plan des **défis matériels et logistiques**, la connectivité des objets, des logiciels, des équipements ; l'absence de matériels et d'infrastructures technologiques pour la mise en œuvre l'Industrie 4.0 et la difficulté de fabrication des produits personnalisés et à la pièce pour les clients ne sont plus des défis auxquels font face les entreprises ayant déjà adopté l'Industrie 4.0, car elles ne sont plus à leurs débuts dans la migration vers l'Industrie 4.0. Ces défis concernent en revanche l'ensemble des entreprises n'ayant pas adopté l'Industrie 4.0. Ainsi, le répondant 9 (groupe C) déclare qu'il est difficile d'installer des logiciels intelligents sur des machines vétustes. Le répondant 13 (groupe E) affirme qu'il leur est parfois difficile voir quasiment impossible d'implanter un nouvel équipement sur des infrastructures vieillissantes. Et, là encore s'ils y arrivent à adapter de nouveaux équipements sur des anciens, cela revient très cher au client en termes d'investissement. D'où, ils recommandent à leurs clients d'investir une bonne fois dans l'achat de nouveaux équipements ou pour moderniser toutes leurs infrastructures. En revanche, pour le répondant 1 (groupe A), il y a le défi de prouver l'utilité de l'interconnexion entre les objets et le défi de personnaliser les produits. Ce dernier point est aussi soutenu d'une part par le répondant 14 (groupe A) qui déclare que le défi est de faire une production à la pièce et non une production standardisée et d'autre part le répondant 3 (groupe A) qui suggère de faire une fabrication en pièce unitaire au lieu d'une fabrication en série.

6.1.4 LES DÉFIS STRATÉGIQUES

Les **défis stratégiques** touchent dans la grande majorité les entreprises n'ayant pas adopté l'Industrie 4.0. Un peu plus de la moitié des entreprises n'ayant pas adopté l'Industrie 4.0 contre un quart des entreprises ayant adopté l'Industrie 4.0 s'accordent sur le fait qu'il est primordial de développer et d'élaborer des plans stratégiques et numériques 4.0. Ainsi le répondant 15 (groupe G) estime qu'il est difficile de mettre un time line (une ligne de temps) sur un projet dit 4.0 parce que les étapes en amont sont essentielles et préalables si l'on désire avoir le résultat escompté. Toujours dans ce même ordre d'idée, bien qu'il soit difficile d'estimer la durée exacte d'un projet 4.0, car chaque projet à ses propres contraintes, le répondant 11 (groupe B) estime qu'idéalement, qu'il faut que le projet soit assez concis dans le temps parce que si on ne met pas un barème, le projet ne se terminera jamais. D'où la nécessité d'avoir un leader, un chef de file, une personne entièrement dédiée au projet et qui va par la suite distribuer les tâches à chacun de ses collaborateurs pour la réalisation du projet. De plus, le répondant 2 (groupe A) affirme qu'il faut une vision des cadres et des employés donc une vision d'ensemble permettant d'étudier le processus de la planification et visant à contribuer à ce qu'on se rende vers l'objectif fixé tel que suggéré aussi par le répondant 9 (groupe C). Toutefois, le répondant 1 (groupe A) et le répondant 8 (groupe D) estiment tous les deux qu'il faut aussi mettre en place une culture d'amélioration continue dans les entreprises. Cela permet de commencer par solidifier la base de toute entreprise et

ensuite estimer si c'est réalisable pour l'entreprise d'aller vers l'Industrie 4.0. Par conséquent, force est de constater que sans un plan de route, il est généralement difficile pour toute entreprise voulant faire des changements d'avoir un état des lieux de la situation présente et d'ainsi faire des projections futures.

6.1.5 LES DÉFIS RELATIONNELS

Les **défis relationnels** sont des enjeux importants pour les entreprises n'ayant pas adopté l'Industrie 4.0. Les défis comme l'élaboration de collaborations, des alliances stratégiques avec leurs fournisseurs ou leurs concurrents pour rester compétitives et l'identification de consultants capables de répondre en un temps record aux besoins de l'entreprise ont été identifiés par le répondant 11 (groupe B), le répondant 9 (groupe C) et le répondant 13 (groupe E). Cela s'explique par le fait que les entreprises qui n'ont pas adopté l'Industrie 4.0, mais qui sont en processus d'implantation ou qui ont l'intention d'implanter sont encore à un stade embryonnaire, un stade d'exploration, tandis que les entreprises ayant adopté l'Industrie 4.0 sont à un stade très avancé et disposent à l'interne d'un maximum de ressources pour faire face à ce défi qui n'est plus le leur. Par exemple, le répondant 11 (groupe B) souligne la difficulté d'avoir de bons fournisseurs de services. Il déclare que c'est assez facile de trouver des consultants surtout grâce aux subventions, mais que le véritable problème est de trouver les bons et meilleurs consultants, car certains ont beau avoir des diplômes mais sont incompetents puisque ce n'est pas leurs champs ou domaines d'expertise. Ensuite, le répondant 9 (groupe C) bien qu'ayant un fournisseur de logiciel ERP, il n'est pas du tout satisfait du service par ce dernier, car il est tout le temps débordé, ce qui fait qu'il a de la misère à obtenir satisfaction dans les plus brefs délais. Le service laisse alors à désirer ce qui a un impact sur le rendement de l'entreprise.

6.2 RÉSULTATS EN LIEN AVEC LES OPPORTUNITÉS ET LES BÉNÉFICES LIÉES À L'IMPLANTATION DE L'INDUSTRIE 4.0 OU DE L'UNE DE SES COMPOSANTES DANS UNE ENTREPRISE

Le tableau 11 ci-dessous résume les principaux résultats en matière d'opportunités et de bénéfices. Au vue des données extraites des entrevues et des informations de ce tableau, nous remarquons que dans l'ensemble, les entreprises ayant adopté ou non l'Industrie 4.0 perçoivent des **avantages pour leurs entreprises**. De plus, la majorité des entreprises n'ayant pas adopté l'Industrie 4.0 trouvent que l'Industrie 4.0 permettrait **d'offrir plus de valeur aux emplois**.

Tableau 11 : Résultats des entrevues liés aux opportunités et bénéfices de l'implantation de l'Industrie 4.0 ou de l'une de ses composantes dans une entreprise

Opportunités & Bénéfices	Sous opportunités & bénéfices	Pas d'adoption 4.0											Adoption 4.0				
		1	2	3	4	12	14	11	7	9	8	13	5	6	10	15	
		A					B	C		D	E	F			G		
Avantages pour les entreprises	Accroissement de la productivité des entreprises			X	X	X	X	X	X	X		X	X			X	
	Amélioration de la qualité globale des produits			X	X			X	X			X	X			X	
	Amélioration de la capacité à innover			X	X			X	X			X	X			X	X
	Disponibilité des données extraites											X					X
Emplois à valeur ajoutée	Amélioration des conditions de travail																
	Réaffectation des tâches	X	X	X				X			X		X				

6.2.1 LES AVANTAGES POUR LES ENTREPRISES

La majorité des entreprises ayant adopté ou non l'Industrie 4.0 voient à travers l'implantation de l'Industrie 4.0 ou de l'une de ses composantes de nombreux bénéfices et opportunités. Force est de constater que les entreprises ayant déjà adopté l'Industrie 4.0 en tirent de nombreux avantages. L'accroissement de la productivité des entreprises, l'amélioration de la qualité globale des produits et l'amélioration de la capacité à innover ainsi que la disponibilité des données extraites constituent des **avantages pour les entreprises**. En effet, pour le répondant 3 (groupe A) l'Industrie 4.0 sert à améliorer l'efficacité et permet la création de nouveaux produits, car le marché change tout le temps et il faut constamment s'adapter. De plus, les répondants 4 et 12 (groupe A) déclarent respectivement que l'Industrie 4.0 pourrait être un avantage pour la conception de nouveaux produits et offrirait des opportunités pour améliorer la performance de la production dans les entreprises. Selon l'avis du répondant 14 (groupe A), l'Industrie 4.0 fait penser directement aux machines monitoring qui permettent d'améliorer la productivité. Alors, il estime que cela a un gros impact sur le *bottom line* au sein de l'entreprise. En plus du gain de productivité auquel le répondant 11 (groupe B), le répondant 7 (groupe C), le répondant 13 (groupe E), le répondant 5 (groupe F) font tous référence, le répondant 11 (groupe B) dit que l'Industrie 4.0 permet de réduire ou d'éliminer les risques d'erreur et de se faire de grosses marges bénéficiaires en vendant directement son produit fini au consommateur sans passer par des intermédiaires (par exemple par des ventes en ligne). Quant au répondant 7 (groupe C), il déclare que l'Industrie 4.0 pourrait offrir des opportunités pour vendre d'autres produits et services, ce qui permet d'ouvrir de nouvelles portes de marché et permettre aux clients de passer des commandes spécifiques en ligne selon leurs besoins. Cet avantage pour les clients a été aussi notifié par le répondant 9 (groupe C). De surcroît, selon le répondant 13 (groupe E), l'Industrie 4.0 permet d'une part de faire une optimisation de chacun des équipements, car il le voit comme un outil qui sert à minimiser le temps d'arrêt. D'autre part l'Industrie 4.0 permet d'intégrer aussi bien la maintenance préventive et/ou la maintenance prédictive et il est aussi vu comme un outil d'aide à la décision pour les décideurs d'entreprise. Également, le répondant 5 (groupe F) estime que l'industrie 4.0 permet de faire des profits, d'enlever du temps dans les tâches manuelles et ainsi avoir du temps pour aller chercher d'autres clients, ou penser à d'autres choses pour augmenter la rentabilité de son entreprise. Mais encore, l'Industrie 4.0 permet de faire un meilleur suivi de l'inventaire en temps réel selon le répondant 10 (groupe F). Finalement, selon le répondant 15 (groupe G), l'Industrie 4.0 a permis à l'entreprise d'être plus compétitive sur le marché et d'être capable d'aller chercher de nouveaux contrats car selon ses dires si l'entreprise n'avait pas implanté l'Industrie 4.0, elle n'aurait pas été en mesure d'atteindre ce niveau de précision au niveau des données recueillies.

6.2.2 LES EMPLOIS À VALEUR AJOUTÉE

La naissance des **emplois à valeur ajoutée** est une opportunité pour une majorité des entreprises n'ayant pas adopté l'Industrie 4.0, car elle offre une amélioration des conditions de travail, leur permet de procéder à une réaffectation des tâches et ainsi de se préparer si elles veulent migrer un jour vers une implantation de l'Industrie 4.0. Le répondant 1 (groupe A) et le répondant 8 (groupe D) estiment que l'amélioration des conditions de travail dans les entreprises permet d'offrir et d'améliorer les emplois. Par exemple, il y a pour les employés du plancher moins de travail manuel avec d'énormes risques d'erreur et d'appréciation, mais plus de travail intellectuel dirait-on grâce à l'assistance d'une machine (robot) pour un très faible taux de risque d'erreur et une meilleure appréciation. Bien que le répondant 11 (groupe B) affirme aussi que l'Industrie 4.0 permet d'améliorer les conditions de travail, il estime qu'il est important de trouver des incitatifs permettant de retenir les employés, d'être capable de fournir au personnel un environnement qui est intéressant, qui est dynamique et qui prouve que l'entreprise est tournée vers l'avenir et pas vers le passé. Cependant, le répondant 2 (groupe A) déclare que la réaffectation vers d'autres tâches permet de résoudre en partie la problématique du manque de main d'œuvre. De plus, le répondant 1 (groupe A) dit qu'il faut procéder à un déplacement de la main d'œuvre vers des postes moins manuels et des postes de contrôle qualité et éviter les mises à pied massives des employés. Le répondant 3 (groupe A) et le répondant 8 (groupe D) renchérissent en déclarant que les jobs ne se perdent pas nécessairement, mais que les employés changent de catégorie pour monter vers les bureaux ou changent de tâches en délaissant certaines tâches plus complexes et contraignantes au profit de nouvelles tâches plus souple et simple à exécuter. Par conséquent, le répondant 5 (groupe F) préconise de trouver des systèmes aidant l'humain à progresser plus vite, de permettre et de faciliter la gestion de certaines tâches à distance. Du coup, les employés peuvent travailler de n'importe lequel des lieux pour le compte de l'entreprise pour des tâches qui ne nécessitent pas une présence physique obligatoire.

6.3 RÉSULTATS EN LIEN AVEC LES FREINS ET LES RISQUES PROBABLES LIÉES À L'IMPLANTATION DE L'INDUSTRIE 4.0 OU DE L'UNE DE SES COMPOSANTES DANS UNE ENTREPRISE

Le tableau 12 ci-dessous résume les principaux résultats en matière de freins et risques. Au vue des données extraites des entrevues et des informations de ce tableau, nous constatons que les **enjeux financiers**, les **enjeux humains** et les **enjeux technologiques** sont des freins très importants tant pour les entreprises n'ayant pas adopté l'Industrie 4.0 que pour les entreprises ayant adopté l'Industrie 4.0. En revanche, les **enjeux stratégiques** et les **enjeux de clientèle** sont des obstacles pour les entreprises n'ayant pas adopté le 4.0. À l'opposé, les **enjeux de planification** apparaissent comme des freins pour les entreprises ayant adopté l'Industrie 4.0, car elles sont à un stade plus avancé dans le processus d'implantation.

6.3.1 LES ENJEUX FINANCIERS

Les **enjeux financiers** constituent des obstacles majeurs pour toutes les entreprises, qu'elles aient ou non adopté l'Industrie 4.0. Selon le répondant 3 (groupe A), nous avons des risques financiers, risques de marché, des risques de récession, car pour lui pour faire du 4.0 il faut disposer de capitaux, ce qui veut dire qu'il faut investir. Le répondant 7 (groupe C) estime qu'il faut aller étape par étape, donc être en mesure de planifier ses besoins et par la suite voir si on est capable de les réaliser étant donné qu'en bout de ligne il y a un risque monétaire. Le répondant 6 (groupe F) déclare qu'il y a le risque pour une entreprise de trop investir plus que ce dont elle a réellement besoin. Dans un autre ordre d'idée, le répondant 9 (groupe C) attire notre attention sur la difficulté de chiffrer à l'avance l'investissement d'un projet d'Industrie 4.0 et l'équipement qui va avec surtout pour les entreprises n'ayant pas adopté l'Industrie 4.0. C'est donc une question de budget déclare le répondant 5 (groupe F), car de petites entreprises veulent faire comme les grandes entreprises qui ont un gros chiffre d'affaires alors qu'elles n'ont même pas le budget qu'il faut. De plus, il affirme que le risque financier intervient aussi quand on fait un mauvais investissement. Cela s'explique par le fait qu'au lieu d'acheter des équipements de qualité qui coûtent cher, on préfère d'abord acheter des équipements de mauvaise qualité qui coûtent moins cher. Étant donné que la qualité ne suit pas, à un moment où un autre on finit par en payer le prix. Il faut donc avoir les reins assez solides pour supporter ses coûts supplémentaires qui interviennent par la suite. Alors, l'idéal est d'éviter d'investir dans du pas cher, car cela ne dure pas longtemps. Le répondant 13 (groupe E) étant un installateur pousse plus loin cette réflexion compte tenu de la réalité qu'il rencontre sur le terrain en faisant des installations chez les clients. Il estime qu'il est plus avantageux donc moins compliqué d'implanter de nouvelles technologies dans une nouvelle usine, car la technologie y est déjà (ordinateur récent, système à la fine pointe) et elle est relativement plus récente puis le coût pour l'ajout de nouvel équipement n'est pas tellement élevé. D'un autre côté pour le répondant 15 (groupe F), le risque financier peut apparaître car leur projet n'est pas aligné avec leur plan stratégique. Il explique que, dans le cas de son entreprise, ils ont réussi à implanter l'Industrie 4.0, car ils savaient clairement où ils s'en allaient, ils savaient clairement ce dont ils avaient besoin pour atteindre les résultats puis au final ils les ont atteints. Aussi, le répondant 15 (groupe F) constate que beaucoup d'entreprises se lancent dans le 4.0 parce c'est à la mode. Il affirme « ... *qu'on ne se lance pas dans le 4.0 juste pour faire du 4.0, mais on se lance dans le 4.0 pour répondre à un besoin stratégique ...* ». Il pense que si on n'est pas en mesure de justifier convenablement pourquoi il faut investir dans un tel projet, il vaudra mieux ne pas investir son argent.

6.3.2 LES ENJEUX HUMAINS

Les **enjeux humains** représentent aussi un autre frein qui affecte toutes les entreprises ayant ou non adopté l'Industrie 4.0. Tout d'abord la résistance, la réticence au changement chez les employés est un frein pour une grande partie des entreprises n'ayant pas adopté l'Industrie 4.0. Ce frein est vu sous plusieurs angles. Le premier angle est le risque de perte d'emploi. Le répondant 3 (groupe A) déclare que les employés ont peur de perdre leurs emplois avec la venue de l'Industrie 4.0. Il affirme cependant que les employés ne perdent pas nécessairement leurs emplois, mais qu'ils changent de catégorie pour monter vers les bureaux. Le deuxième angle est une incompréhension de la part des employés de la raison d'être derrière le virage vers l'Industrie 4.0. Selon le répondant 11 (groupe B), ce manque de compréhension est lié au fait que le message n'est pas clair. Il faut donc trouver le moyen de bien faire passer l'information, de l'appliquer et ainsi présenter les retombées aux plus réticents. Le troisième angle est lié aux changements radicaux qui interviennent du jour au lendemain dans une entreprise. Selon le répondant 7 (groupe C), commencer par tout changer (le job, la façon de faire, la façon de procéder) du jour au lendemain sans une période de transition et d'adaptation pourrait engendrer la perte d'employés qui trouveront du travail dans d'autres entreprises dans un contexte de pénurie de main d'œuvre. Il vaut mieux donc tout faire pour garder ses employés en faisant attention à faire des changements radicaux. Il est donc préférable d'y aller par étape. Le quatrième angle est relié à la peur. Le répondant 8 (groupe D) déclare qu'il y a des gens qui ont peur du changement, qui ont peur de la technologie, qui ont peur de perdre leur chasse gardée. Il préconise à la base une culture, des équipes qui avec les différentes réalités sont prêtes à se lancer dans n'importe quel projet.

Ensuite, pour le répondant 6 (groupe F), le dirigeant peut représenter lui-même une barrière pour son entreprise. Il donne son exemple de lui en tant que responsable informatique dans son entreprise. Il nous explique qu'au début il ne connaissait pas nécessairement les besoins de l'entreprise, car c'était difficile pour lui d'avoir l'information voulue et les personnes habilitées ne connaissaient pas clairement leurs besoins. Mais depuis quelques années, ils ont développé un plan d'affaires qui précise les objectifs, les actions à faire et les résultats attendus. De ce point, il ressort alors l'enjeu d'avoir la bonne personne à la bonne place comme nous le fait remarquer aussi le répondant 5 (groupe F).

Puis, le répondant 10 (groupe F) voit quant à lui le risque de perte d'employés spécialisés, donc de main d'œuvre qualifiée. Lorsqu'un problème quelconque (par exemple en informatique) survient dans une entreprise et qu'il n'y a pas la personne qualifiée pour intervenir immédiatement, cela pose un réel problème. Il faut alors de bonnes collaborations avec les consultants et les fournisseurs fiables pour des équipements et des services à offrir à l'entreprise.

Enfin, il y a aussi un frein lorsque la vision du dirigeant d'entreprise et des cadres sont différentes pour l'avenir de l'entreprise. Le répondant 8 (groupe D) nous explique que si le PDG n'est pas prêt à donner les moyens aux cadres qui veulent faire avancer l'entreprise, cela n'aboutira pas. Et à l'inverse, si le PDG prône un projet sans que les cadres s'allignent, le projet aurait de la difficulté à aboutir.

6.3.3 LES ENJEUX TECHNOLOGIQUES

Les **enjeux technologiques** constituent des préoccupations importantes, surtout pour les entreprises ayant adopté l'Industrie 4.0 et non des moindres pour les entreprises n'ayant pas adopté l'Industrie 4.0. Les répondants 1 et 2 (groupe A) déclarent avoir de la difficulté dans l'adoption des technologies de l'Industrie 4.0. Ainsi, le répondant 1 (groupe A) nous dit qu'avec la structure actuelle de son entreprise il leur est impossible d'automatiser certaines sections de l'entreprise, donc impossible d'interconnecter les machines pour les faire parler entre elles. Alors selon ce répondant, l'assemblage manuel reste et demeure actuellement la meilleure méthode pour une entreprise comme la leur. Il estime qu'il faut plutôt chercher à voir dans quel autre secteur de l'entreprise (les postes), cela serait plus profitable. Par exemple, il précise que l'apport des technologies de l'Industrie 4.0 serait la bienvenue au niveau du poste de la peinture et de la soudure pour la qualité, la vérification, l'automatisation. Selon ce même répondant, le fait que l'entreprise ne se soit pas en mesure de s'adapter à l'évolution de son temps pour se mettre à jour constitue un véritable handicap. L'entreprise doit donc faire un gros pas de géant dans le but de rattraper son retard. Ainsi pour lui, le manque d'automatisation des entreprises est un frein pour avoir au final des objets connectés. En revanche le répondant 6 (groupe F) précise que d'autres entreprises font tout pour être à jour dans les avancées technologiques, mais après adoption des technologies constatent qu'elles ont une structure trop avancée pour les besoins de l'entreprise. Il y a donc matière à réfléchir. Il présente le cas de la structure informatique de son entreprise afin de mieux appuyer ses propos. La fibre optique dont ils disposent depuis trois ans n'est pas utilisée à cause de la restructuration de l'entreprise pour avoir une structure plus petite. Bien qu'elle ne soit utilisée qu'à la moitié de sa capacité, la fibre optique leur coûte encore des frais d'environ 1500 \$/mois alors qu'un modem qui coûterait seulement 200 \$/mois serait suffisant pour les besoins en matière de gestion des courriels et de sauvegarde des données. Le répondant 6 (groupe F) souligne ainsi le danger de voir avec l'Industrie 4.0 plus grand que ce dont l'entreprise a réellement besoin.

Un autre frein et non des moindres concerne la question de la cybersécurité. Le répondant 4 (groupe A) affirme qu'il y a un plus gros risque de perte ou/et de vol de données pour les grandes entreprises hautement technologiques, où le secret professionnel doit être gardé que pour de petites entreprises comme la sienne. Par contre, le répondant 11 (groupe B) y voit plus une crainte au niveau de la perte des données qu'au niveau de la sécurité des

données. Il déclare que « ... *sa faille à lui est au niveau de la perte des données, car il l'a déjà vécu une fois dans le passé où il y avait deux serveurs en miroir puis il y en a un qui a flanché et ça a fait un effet de boule de neige qui a fait flancher l'autre, puis tout a été perdu ...* ». La solution pour y remédier a été toujours d'avoir des serveurs en miroir, mais aussi de pouvoir sauvegarder les données sur le *cloud* pour être capable de les récupérer si besoin y est en cas de pépin. De plus, le répondant 2 (groupe A) suggère que pour les pannes électroniques, il faut les prévoir à la conception afin de savoir comment y faire face à ce genre de situation et y remédier rapidement. Le répondant 10 (groupe F) affirme qu'avec l'Industrie 4.0 toutes les entreprises dépendent et dépendront qu'elles le veillent ou non de l'informatique. Il en ressort de nos entretiens que la plupart des entreprises ayant déjà adopté l'Industrie 4.0 travaillent tous les jours pour améliorer, renforcer et faire face aux enjeux technologiques qu'exige l'Industrie 4.0 afin de ne pas se retrouver dépassée par les avancées technologiques mondiales. Par conséquent, elles doivent donc se donner les moyens de leur politique pour faire fonctionner toute la technologie.

6.3.4 LES ENJEUX STRATÉGIQUES

Nous constatons que les **enjeux stratégiques** constituent une véritable préoccupation pour bon nombre d'entreprises qui n'ont pas adopté l'Industrie 4.0 et pour les entreprises qui l'ont déjà adoptée. Les répondants 11 (groupe B) et 8 (groupe D) estiment que l'absence d'une stratégie claire constitue un frein pour eux. Ainsi, le répondant 8 (groupe D) déclare qu'il faut être capable de définir clairement son besoin afin d'être en mesure de savoir ce que cela va véritablement apporter et de pouvoir dire l'usage qu'on en fera. L'exemple du répondant 11 (groupe B) qui a voulu implanter un ERP dans son entreprise illustre parfaitement les dires du répondant 8 (groupe D). Ce dernier s'est rendu compte que cela posait plus de problèmes qu'il en résolvait étant donné que le besoin était mal défini et qu'il voulait faire comme ses confrères qui ont implanté des ERP étant donné que cela était à la mode. Cependant, le répondant 15 (groupe G) du fait de son expérience avec l'adoption de l'Industrie 4.0 nous a déclaré que « ... *les entreprises qui voient ce risque-là c'est probablement parce que leur projet n'est pas nécessairement aligné avec leur plan stratégique ...* ». Dans le cas de son entreprise, ils savaient clairement où ils s'en allaient et ils savaient clairement les résultats escomptés qui ont finalement été atteints. Cela revient donc à dire que beaucoup d'entreprises se lancent dans le 4.0 parce que c'est à la mode. Or, on ne se lance pas dans le 4.0 pour faire du 4.0, mais on se lance dans le 4.0 pour répondre à un véritable besoin stratégique et non pour faire comme tout le monde.

Toutefois, le répondant 2 (groupe A) et le répondant 7 (groupe C) estiment que l'absence d'entreprises pouvant servir d'exemples pour d'autres entreprises est également un frein. Le répondant 7 (groupe C) pense que « ... *cela serait le fun pour les dirigeants des entreprises qui n'ont pas adopté l'Industrie 4.0 de trouver les voies et moyens afin de pouvoir*

aller visiter des entreprises qui ont adopté l'Industrie 4.0 dans le but de comprendre leur réalité avant et après l'adoption de l'Industrie 4.0 et de s'en inspirer pour la leur si le besoin se fait réellement sentir ... ».

6.3.5 LES ENJEUX DE PLANIFICATION

Le répondant 11 (groupe B) déclare qu'il est difficile pour les employés de percevoir du premier coup les avantages réels d'un projet d'implantation de l'Industrie 4.0. Ainsi, « ... *bien que des réunions soient organisées avec les employés pour leur expliquer le comment, le pourquoi de tout ça, bien que cela soit clair pour le dirigeant si cela n'est pas expliqué de la meilleure des manières et de la façon la plus claire possible, on observe un manque de compréhension total chez les employés ...* ». Il faut donc trouver les voies et moyens pour faire passer clairement le message et y aller en douceur donc étape par étape pour que tout le monde adhère. Cependant pour le répondant 15 (groupe G) il y a des risques c'est certain. Mais pour lui dans tout projet il y a un risque. Il pense que le plus gros risque auquel les entreprises sont exposées c'est si l'équipe de projet change en cours de route. Il pense « ... *que ce qui a fait un succès aussi de son entreprise c'est que l'équipe de départ est restée la même jusqu'à la fin. Si en cours de route il y avait eu un membre qui avait quitté puis qu'il y en avait eu un autre qui se s'était ajouté, alors c'est là que les besoins changent, car on change d'idée, on change un paquet d'éléments, on perd le focus et à la fin le résultat n'est finalement pas aussi bon qu'on le pensait obtenir à la base ...* ». Par conséquent, selon lui « ... *pour éviter de se lancer dans un immense projet qui ne verra jamais le jour puis qui va s'échelonner au final sur des années durant, il est super important de bien définir le projet et de commencer par quelque chose qui va payer très vite afin de créer un effet waouh le plus rapidement possible ...* ». Les différents points des **enjeux de planification** qui sont abordés représentent des obstacles peuvent affecter tous les types d'entreprises pour l'adoption de l'Industrie 4.0.

6.3.6 LES ENJEUX DE CLIENTÈLE

Les risques comme la non-convergence de l'Industrie 4.0 avec le type de besoins et le service à la clientèle ainsi que la difficulté pour un sous-traitant d'avoir une véritable planification stratégique sont des **enjeux de clientèle** auxquels certaines entreprises n'ayant pas adopté l'Industrie 4.0 doivent faire face. Le répondant 11 (groupe B) déclare « ... *qu'en tant qu'entreprise sous-traitante sa conduite est dictée par ceux pour qui il travaille et qui dans son cas à lui représente ses clients. Force est de constater qu'il est dans un segment d'activité où il a un contrôle assez limité. Donc, il dépend en majorité de sa clientèle bien qu'il a le contrôle sur ce qui se fait au sein de son entreprise ...* ». Cependant, pour le

répondant 13 (groupe E) le risque est une non-convergence de l'Industrie 4.0 avec le type de besoins et de service à la clientèle. Pour lui en tant que manufacturier implantateur il doit gérer les attentes du client. Il y a donc un risque que le client se décourage, raison pour laquelle il faut s'assurer que l'information que le client va utiliser pour prendre ses décisions soit la plus simple et la plus claire possible à traiter. Cela « ... *n'est pas toujours évident à obtenir compte tenu de la quantité d'informations fournies par les équipements interconnectés entre elles ...* ».

6.4 RÉSULTATS EN LIEN AVEC LES PRÉREQUIS NÉCESSAIRES POUR LA RÉUSSITE DE L'IMPLANTATION DE L'INDUSTRIE 4.0 OU DE L'UNE DE SES COMPOSANTES DANS UNE ENTREPRISE

Le tableau 13 ci-dessous résume les principaux résultats en matière de prérequis. Au vu des données extraites des entrevues et des informations de ce tableau, nous remarquons que les entreprises qui ont adopté ou non l'Industrie 4.0 s'accordent à dire qu'il est primordial d'avoir des prérequis comme les **aptitudes techniques** et des **aptitudes technologiques** avant d'amorcer le virage vers l'Industrie 4.0. Cependant, dans la majorité des cas, les entreprises n'ayant pas adopté l'Industrie 4.0 estiment qu'il faut avoir des **aptitudes managériales** pour bien aborder le virage de l'Industrie 4.0.

Tableau 13 : Résultats des entrevues liés aux prérequis nécessaires pour la réussite de l'implantation de l'Industrie 4.0 ou de l'une de ses composantes dans une entreprise

Prérequis	Sous prérequis	Pas d'adoption 4.0											Adoption 4.0				
		1	2	3	4	12	14	11	7	9	8	13	5	6	10	15	
		A					B	C		D	E	F			G		
Aptitudes managériales	Disposer d'une bonne planification								X								X
	Avoir une bonne connaissance de sa structure d'entreprise										X						
	Avoir une bonne rentabilité (investissement en capitaux)		X	X													
	Avoir un mode de gestion, de croyance, de persévérance et de mesure des résultats			X													
	Avoir un <i>business case</i>						X										
	Être conscient de ses enjeux et savoir par où commencer						X										
Aptitudes techniques	Disposer de nouvelles compétences requises								X			X		X	X		
	Maîtriser ses procédés														X	X	
	Avoir un minimum de compétences avant d'arriver au sein de l'entreprise	X							X								
	Faire de l'entretien ou de la maintenance préventive et prédictive											X					
Aptitudes technologiques	Sélectionner et déployer correctement son progiciel (ERP ou SAP)						X							X		X	

6.4.1 LES APTITUDES MANAGÉRIALES

Nous constatons que les **aptitudes managériales** sont des prérequis primordiaux pour la plupart des entreprises n'ayant pas adopté l'Industrie 4.0 et pour les entreprises l'ayant adopté. Selon le répondant 14 (groupe A), il faut être conscient de ses enjeux et savoir par où commencer exactement. Pour y arriver, le répondant 14 (groupe A) déclare qu'« ... *il faut avoir un business case car s'il n'y a pas de business il n'y a donc pas de projet...* ». En revanche, selon le répondant 7 (groupe C) et le répondant 15 (groupe G) il faut disposer d'une bonne planification. Les deux répondants s'accordent sur le fait que si l'on veut bien faire les choses, on doit y aller étape par étape, donc d'agir en amont et de tirer les leçons du passé. En effet, le répondant 15 (groupe G) avec son expérience estime qu'« ... *il est vital d'alléger ses processus, de les restructurer, de les mapper, de les optimiser, avant de les informatiser...* ». De plus, le répondant 2 (groupe A) et le répondant 3 (groupe A) disent que comme prérequis une entreprise doit d'une part avoir une bonne rentabilité et un bon investissement en capital. Il faut en complément selon l'avis du répondant 3 (groupe A) avoir un bon mode de gestion, de la persévérance et de mesure des résultats, car il est important de mesurer ses résultats pour savoir si on a une amélioration ou non. Il nous explique « ... *c'est l'amélioration de l'efficacité étant donné que tout ce qui tend à se mesurer, tend à s'améliorer et par ricochet tout ce qu'on peut mesurer comme efficacité...* ».

6.4.2 LES APTITUDES TECHNIQUES

Les **aptitudes techniques** sont des prérequis indispensables que les entreprises qui ont ou non adopté l'Industrie 4.0 doivent obligatoirement avoir. Le répondant 1 (groupe A) et le répondant 7 (groupe C) déclarent qu'il faut nécessairement avoir un minimum de compétences avant d'arriver au sein de l'entreprise. Pour ce faire, au niveau des ressources humaines il y a d'une part « ... *un besoin de personne qui ont un minimum de compétences quel qu'elles soient avant d'arriver dans l'entreprise et le reste de la formation se fait à l'interne...* » et d'autre part « ... *il faut qu'ils soient capables de s'adapter à toutes nouveautés...* » affirme le répondant 1 (groupe A). Cela constitue alors un véritable casse-tête pour les entreprises qui ne disposent pas d'employés ayant le type de compétence recherché pour travailler dans un environnement 4.0.

De surcroît, en plus du minimum de compétence à avoir, le répondant 7 (groupe C) dit que l'entreprise doit offrir aux employés des formations bien ciblées qui répondront efficacement à ses besoins. Pour y arriver, il suggère « ... *de cibler les bonnes personnes c'est-à-dire trouver les leaders qui ont de l'influence sur les autres employés puis de s'assurer que ces personnes sont ouvertes et disposent à apprendre dans le but de transmettre*

à leur tour leurs savoirs aux autres employés. Du coup, le reste des employés va embarquer progressivement ... ». Il s'agit donc de trouver les leaders parmi les employés et de les former.

Également le répondant 10 (groupe F) et le répondant 15 (groupe G) disent que comme autre prérequis pour les entreprises, il est primordial de maîtriser ses procédés. Pour y arriver, le répondant 15 (groupe G) déclare qu'« ... il est vital d'alléger ses processus, de les restructurer, de les mapper, de les optimiser, avant de les informatiser ... ». D'ailleurs le répondant 10 (groupe F) renchérit en affirmant que « ... si tu ne maîtrises pas ce que tu fais à la base, il ne faut pas essayer de mettre du 4.0 par-dessus de quelque chose qui n'est pas Lean. Il croit que le prérequis c'est d'avoir tous types de compétences à l'interne que cela soit en informatique, en électronique, dans le manufacturier, etc. Si quelqu'un n'a pas ce qu'il lui faut à l'interne puis qu'il se fie juste à l'aide-externe, ça risque d'être voué à de l'échec ... ». Aussi, le répondant 13 (groupe E) souligne l'importance pour toutes les entreprises qu'elle ait ou non adopté l'Industrie 4.0 de faire de l'entretien ou de la maintenance préventive et prédictive, car c'est la base qu'il faut réussir à faire à la perfection avant de se lancer dans l'implantation de l'Industrie 4.0.

6.4.3 LES APTITUDES TECHNOLOGIQUES

Toute entreprise voulant ou non adopter l'Industrie 4.0 doit avoir des **aptitudes technologiques**, car c'est un prérequis à ne pas négliger étant donné qu'il constitue la base, la charpente de toute installation technologique dans une industrie manufacturière. C'est ainsi que le répondant 14 (groupe A), le répondant 6 (groupe F) et le répondant 15 (groupe G) reconnaissent tous qu'il faut être en mesure de sélectionner et de déployer correctement son progiciel (ERP ou SAP). De plus le répondant 15 (groupe G) déclare qu'il faut avoir les solutions adéquates pour son secteur d'activité et aussi avoir une bonne capacité de prise en charge à l'interne, tandis que le répondant 14 (groupe A) préconise de vraiment trouver le moment propice pour commencer. Donc, « ... il faut commencer petit à un endroit de l'entreprise où il y aura un grand impact ... ». De plus le répondant 6 (groupe F) estime que c'est un atout si l'on recrute à la base des personnes qui ont un minimum de connaissance dans l'utilisation des progiciels de gestion.

6.5 RÉSULTATS EN LIEN AVEC LES COMPÉTENCES REQUISES QUE LES EMPLOYÉS ET LES CADRES SUPÉRIEURS DEVRAIENT AVOIR POUR L'IMPLANTATION DE L'INDUSTRIE 4.0 OU DE L'UNE DE SES COMPOSANTES DANS UNE ENTREPRISE

Le tableau 14 ci-dessous résume les principaux résultats en matière de compétences requises. Au vu des données extraites des entrevues et des informations de ce tableau, nous observons que l'ensemble des employés et des cadres des entreprises ayant ou non adopté l'Industrie 4.0 doivent avoir pour la grande majorité des **compétences opérationnelles** et des **compétences en informatique**. Toutefois, les entreprises ayant ou non adopté l'Industrie 4.0 s'accordent sur le fait que les cadres dans leur majorité doivent avoir des **compétences managériales** afin de travailler dans un environnement 4.0.

6.5.1 LES COMPÉTENCES OPÉRATIONNELLES

Nous observons que pour des entreprises interrogées, les employés et les cadres devraient avoir des **compétences opérationnelles** comme des **connaissances de pointe**, une **compréhension des processus** et des **compétences techniques**. De l'ensemble des informations collectées auprès de nos répondants nous constatons que ces trois points se complètent. D'après le répondant 15 (groupe G) lorsqu'on veut faire l'analyse des données recueillies, ça demande quand même une certaine expertise. On ne peut donc pas confier l'analyse des données à tout le monde. En effet, le répondant 15 (groupe G) estime qu'il faut disposer d'une équipe compétente au sein de son entreprise. Il faut alors selon le répondant 2 (groupe A), le répondant 12 (groupe A) et le répondant 15 (groupe G) des compétences en informatique, des compétences de programmeur et des compétences d'analyste. De plus, le répondant 11 (groupe B) nous dit que « ... *cela prend aussi des compétences au niveau de l'industrie, des compétences pour la façon de fonctionner et des compétences dans la chaîne de valeur à l'interne ...* ». Du coup le répondant 12 (groupe A) déclare que « ... *cela peut prendre plus de connaissance qu'on en a ...* ». L'exemple du répondant 10 (groupe F) nous le confirme car lui qui n'avait aucune connaissance dans le domaine informatique est actuellement responsable de la section informatique de son entreprise. Il estime qu'« ... *il faut s'entourer de certaines qualifications dont on a besoin et être capable de comprendre telle ou telle affaire pour y arriver ...* ». Par conséquent en partant ça prend des personnes capables de faire tout ce travail. Bien évidemment, pour y arriver l'employé ou le cadre doit vivre avec son processus et il faut leur donner le temps nécessaire afin qu'il soit en mesure de comprendre et d'interpréter convenablement les données permettant de prendre les bonnes décisions qui s'imposent a déclaré le répondant 8 (groupe D).

6.5.2 LES COMPÉTENCES EN INFORMATIQUE

Les entreprises ayant ou non adopté l'Industrie 4.0 s'accordent toutes sur le fait qu'il est primordial pour les employés et les cadres de disposer d'un minimum de **compétences en informatique (aptitudes analytiques, compétences de codage, capacité de faire parler les données informatiques)**. Le répondant 6 (groupe F) déclare « ... *que bien que cela soit assez surprenant, dans l'entreprise tout le monde sans exception doit avoir au moins un minimum de connaissance en informatique en particulier dans l'utilisation de l'outil informatique afin d'être en mesure d'exécuter certaines tâches ...* ». Le répondant 13 (groupe E) dit « ... *que grâce à des capteurs, il est question de s'assurer que les données qu'on va chercher sont bonnes et qu'il faut que les gens sur le plancher comprennent que les capteurs sont importants puis qu'il faut les maintenir en bon état de marche et s'assurer qu'ils sont adéquats ...* ». Cela permet d'avoir les bonnes données pour bien les interpréter. Le

répondant 8 (groupe D) estime qu'en plus d'avoir des compétences particulières, il faut s'entourer d'une équipe technique pour soutenir l'informatique, les connexions et les outils de mesure, ce qui permettra de pouvoir interpréter les données. En effet, nous constatons que le répondant 13 (groupe E), le répondant 5 (groupe F) et le répondant 15 (groupe G) estiment qu'à partir du moment où les données sont disponibles, il faut savoir lire, analyser et interpréter les chiffres.

Le répondant 11 (groupe B) nous dit qu'« ... *en région il est souvent difficile de trouver des diplômés dans un domaine spécifique comme l'informatique en situation de pénurie de main-d'œuvre ...* ». Alors, des entreprises sont obligées d'embaucher des administrateurs réseau qui ont de l'expérience et de bonnes connaissances pour exécuter certaines tâches et prendre aussi certaines décisions a déclaré le répondant 14 (groupe A).

6.5.3 LES COMPÉTENCES MANAGÉRIALES

Les **compétences managériales** ont été mentionnées par toutes les entreprises qui ont adopté ou non l'Industrie 4.0. Ainsi, il faut avoir les compétences qu'il faut pour former les employés au sein de l'entreprise et être un bon pédagogue. La majorité des répondants déclarent que les employés doivent avoir avant tout un minimum de compétences que ce soient des compétences informatiques, techniques ou technologiques et le reste va s'apprendre sur le terrain au sein de l'entreprise. De plus, il y a aussi la possibilité d'offrir des formations internes de remise à niveau pour les employés travaillant déjà dans les entreprises afin de répondre à un besoin affirment le répondant 8 (groupe D), le répondant 6 (groupe F), le répondant 10 (groupe F) et le répondant 15 (groupe G). De plus, le répondant 6 (groupe F) rajoute que dans son entreprise « ... *avant d'embaucher une nouvelle personne, l'équipe des ressources humaines s'assure que cette dernière a certaines connaissances en informatique, dans l'utilisation de la suite office, et dans l'utilisation des progiciels de gestion pour ne citer que ceux-là ...* ». Cependant, le répondant 7 (groupe C) déclare que « *si l'on réussit à apporter des changements sans pour autant changer la routine des employés et des cadres du jour au lendemain de façon intelligente, c'est assez intéressant, car la transition doit se faire en douceur* ». De plus, le répondant 8 (groupe D) déclare que « *pour être en mesure d'interpréter convenablement un tableau de bord, cela nécessite une formation au préalable sur comment faire* ». Il trouve que ces formations sont assez importantes.

6.5.4 LES TRAITS ET CARACTÉRISTIQUES

Le tableau 15 ci-dessous résume les principaux résultats en matière de traits et de caractéristiques que les employés et les cadres supérieurs devraient avoir pour l'implantation

de l'Industrie 4.0 issue des compétences requises. Au vu des données extraites des entrevues et des informations de ce tableau, nous constatons que pour l'ensemble des entreprises ayant adopté ou non l'Industrie 4.0, les employés et les cadres doivent avoir des traits et des caractéristiques communs dans le but de traverser de la meilleure des manières la transition vers l'Industrie 4.0.

Tableau 15 : Résultats des entrevues présentant les traits et caractéristiques que les employés et les cadres supérieurs devraient avoir pour l'implantation de l'Industrie 4.0 ou de l'une de ses composantes dans une entreprise

	Pas d'adoption 4.0											Adoption 4.0			
	1	2	3	4	12	14	11	7	9	8	13	5	6	10	15
Traits et caractéristiques	A						B	C		D	E	F			G
Ouverture d'esprit	X			X				X	X	X				X	X
Curiosité /Créativité								X	X	X					
Bonne capacité d'écoute									X					X	

De l'ensemble des compétences requises présentées par les intervenants, il ressort une panoplie de **traits et de caractéristiques** communes que les employés et les cadres doivent avoir en toutes circonstances qu'elles aient ou non adopté l'Industrie 4.0. Il s'agit entre autres de l'ouverture d'esprit, de la curiosité et d'une bonne capacité d'écoute afin de s'adapter et de gérer au mieux tous les changements vers l'Industrie 4.0. Ces traits et caractéristiques ont été évoqués par une majorité des répondants. Par exemple, le répondant 1 (groupe A) déclare que les employés et les cadres doivent avoir un état d'esprit eux-mêmes pour pouvoir être capables d'identifier les besoins, de voir les opportunités qui s'offrent et d'en tirer les profits. Le répondant 10 (groupe F) dit qu'il faut que l'ouverture d'esprit soit accompagnée d'une bonne capacité de compréhension, d'une bonne capacité d'écoute et qu'il faut s'entourer des bonnes personnes. C'est ainsi que le répondant 8 (groupe D) estime qu'on a besoin de gens curieux, de gens intéressés, de gens qui veulent apprendre grâce à des formations de nouvelles choses. De plus, le répondant 7 (groupe C) estime que si on est ouvert d'esprit alors on peut apprendre et on peut faire des changements, d'où un bon état mental. En outre, pour le répondant 15 (groupe G) le but c'est d'être clair, d'avoir des instructions de travail qui sont claires également et de prendre le temps de bien former le personnel. Selon lui, dans son entreprise « ... à partir du moment où il y a eu une ouverture d'esprit de la part du personnel, il n'y a pas eu de frein ... ». Par conséquent « ... si tout est expliqué comme il faut et que les enjeux sont mis sur la table puis que l'on est en mesure de démontrer ce que ces changements apportent au travail du personnel et à l'entreprise, tout va bien ... ». « Il naît alors un esprit de recevabilité et d'acceptabilité », a déclaré le répondant 4 (groupe A).

6.6 RÉSULTATS EN LIEN AVEC L'ENVIRONNEMENT DE TRAVAIL REQUIS POUR L'IMPLANTATION DE L'INDUSTRIE 4.0 OU DE L'UNE DE SES COMPOSANTES DANS UNE ENTREPRISE

Le tableau 16 ci-dessous résume les principaux résultats en matière d'environnement de travail. Au vue des données extraites des entrevues et des informations de ce tableau, nous remarquons que les entreprises trouvent que travailler dans un environnement 4.0 aurait des **impacts tant bénéfiques pour les employés que pour l'entreprise**. Cependant, pour obtenir ces bénéfices, l'environnement de travail 4.0 **exige d'une part que les employés** soient compétents et apportent des changements à leur profil et **exige d'autre part que les cadres** apportent des changements dans leur planification et font plus de tests afin de rendre leurs produits de meilleure qualité.

Tableau 16 : Résultats des entrevues liés à l'environnement de travail à avoir pour l'implantation de l'Industrie 4.0 ou de l'une de ses composantes dans une entreprise

Environnement de travail	Sous environnement de travail	Pas d'adoption 4.0											Adoption 4.0			
		1	2	3	4	12	14	11	7	9	8	13	5	6	10	15
		A					B	C	D	E	F				G	
Impacts bénéfiques pour les employés	Attraction, rétention															
	Développement de connaissances	X	X	X	X		X	X					X			
	Amélioration des conditions de travail															
	Clarté des rôles	X								X						
Impacts bénéfiques pour l'entreprise	Optimisation de la prise de décision			X						X						
	Collaboration										X	X	X		X	
	Interaction homme-homme et homme-machine															
	Exécution des tâches en temps réel et tournées vers l'avenir							X								X
	Circulation descendante et ascendante de l'information			X				X								
Exigences pour les employés	Transformation de profil	X	X				X							X	X	
	Plus de compétences															
Exigences pour les cadres	Changement de la planification													X		
	Beaucoup de temps et de tests à réaliser													X		

6.6.1 LES IMPACTS BÉNÉFIQUES POUR LES EMPLOYÉS

Nous avons constaté que l'Industrie 4.0 aurait des **impacts bénéfiques sur l'environnement de travail des employés**. Il s'agit de l'attraction, de la rétention, du développement de connaissances, de l'amélioration des conditions de travail et de la clarté des rôles. Ces impacts positifs sont identifiés en grande partie tant par les entreprises n'ayant pas adopté l'Industrie 4.0 que par les entreprises ayant adopté l'Industrie 4.0. D'après le répondant 3 (groupe A), « ... *il faut offrir de meilleurs services aux employés, de meilleures conditions de travail (régime de travail, salaire, condition de retraite, condition d'assurance maladie, etc.) et il faut s'adapter avec les changements du marché ...* ». Donc, il faut que les conditions soient assez attrayantes pour garder les employés. C'est ainsi que pour le répondant 2 (groupe A) « ... *il faut que l'employé voit que cela est bénéfique à la fois pour lui et pour l'entreprise... Mais s'il constate que cela n'est bénéfique seulement que pour l'entreprise, cela bloque et il se pose des questions ...* ». En effet, les répondants 1 et 4 (groupe A) estiment que la réussite dépend de la manière et de l'angle d'approche des employés. Alors, selon l'avis du répondant 4 (groupe A), tout dépend de comment cela est apporté à l'employé, car si on le met en place et qu'on n'explique rien c'est problématique et l'employé pourrait se sentir lésé ou se demander pourquoi est-ce qu'on veut faire des changements. Il ne voit donc pas l'enjeu. Raison pour laquelle le répondant 1 (groupe A) insiste sur l'importance de donner la formation à l'interne, car tout le monde a un peu peur de l'impact que des changements au travail peuvent avoir sur son quotidien et son avenir. Pour y arriver à faire passer convenablement le message, le répondant 14 (groupe A) et le répondant 11 (groupe B) déclarent que cela nécessite une bonne gestion de changement. Donc, pour y arriver, il faut dans un premier temps impliquer les employés dans toutes les étapes du processus de migration vers l'Industrie 4.0 et surtout prendre le temps de les écouter pour avoir leurs avis. Dans un deuxième temps le répondant 1 (groupe A) et le répondant 8 (groupe A) précisent qu'il est aussi important de bien clarifier les rôles afin que chacun sache exactement quoi faire et à quel moment précis il doit le faire. En outre, le répondant 15 (groupe G) déclare avec son expérience que « ... *c'est plus compliqué de faire changer rapidement des habitudes de travail à un employé qui fait le même travail depuis 30 ans et qui à une certaine habitude et expérience. Or, un nouvel employé qui arrive pour lui c'est merveilleux. En l'espace d'une journée de formation, il a déjà appris beaucoup de choses contrairement à un vieil employé avec qui cela peut prendre un à deux mois de formation pour obtenir le même rendement ...* ».

6.6.2 LES IMPACTS BÉNÉFIQUES POUR LES ENTREPRISES

Nous avons constaté que l'optimisation de la prise de décision, la collaboration, l'interaction homme-homme et homme-machine, l'exécution des tâches en temps réel et tournées vers l'avenir ainsi que la circulation descendante et ascendante de l'information auraient des **impacts bénéfiques pour les entreprises** dans un environnement de travail 4.0. Ses différents impacts sont identifiés à la fois par les entreprises ayant ou non adopté l'Industrie 4.0. D'après le répondant 8 (groupe D) dans son entreprise « ... *du jour au lendemain les gens qui travaillaient en silo, qui avaient leur chasse gardée, qui étaient du genre quasiment moi je sais que je fais du bon travail et j'obtiens les meilleurs résultats, tout cela n'était basé que sur des présomptions. Mais du jour au lendemain des changements ont été faits et grâce à la collecte de l'information. Tout le travail était ainsi basé sur de l'information vraie. Du coup on avait l'information voulue et on cherchait les moyens pour atteindre les résultats, car on travaille avec des faits réels ...* ». Le travail qui est désormais réalisé est un travail coopératif. D'ailleurs, pour le répondant 3 (groupe A) l'amélioration des conditions de travail des employés les aide à gravir les échelons et assure aussi une fluidité de l'information à tous les niveaux hiérarchiques de l'entreprise. Il est donc très important selon le répondant 11 (groupe B) d'être capable « ... *de fournir au personnel un environnement de travail qui est intéressant, qui est dynamique et qui sent qu'on est tourné vers l'avenir pas vers l'arrière ...* ». Raison pour laquelle il est important d'inclure le personnel concerné à toutes les étapes du processus de transition vers l'Industrie 4.0. En outre, pour le répondant 8 (groupe D), le répondant 13 (groupe E) et les répondants 5 et 10 (groupe F) dans un environnement de travail 4.0, on constate une forte interaction homme-homme et homme-machine. Le répondant 15 (groupe G) nous explique qu'il a observé dans son entreprise une très bonne transition depuis l'implantation des petites technologies jusqu'à l'implantation du 4.0. Cela s'explique par un excellent rapport de travail homme-machine et de rapport de travail homme-homme puisque tous les employés étaient impliqués dès le début du processus. Le répondant 13 (groupe E) et le répondant 5 (groupe F) reconnaissent que « ... *les machines font une grande partie du travail, ce qui allège les employés de certaines tâches pour se consacrer à d'autres qu'ils ne pouvaient faire simultanément auparavant ...* ». Toutefois, on constate que l'intervention de l'humain est toujours indispensable, car on doit par exemple programmer la machine, valider certaines informations que la machine lui propose pour réduire au maximum les erreurs qui auraient pu subvenir si c'était exécuté uniquement par l'homme. L'on constate que la machine assiste l'homme dans ses tâches et aussi que l'homme assiste la machine également pour une meilleure prise de décision.

6.6.3 LES EXIGENCES POUR LES EMPLOYÉS

Dans un environnement de travail 4.0, on observe chez les employés une **transformation des profils et plus de compétences**. Ces deux points sont des **exigences qu'on tend à demander pour les employés** voulant travailler dans un environnement 4.0. Ces exigences ont été identifiées en majorité tant par des entreprises ayant adopté l'Industrie 4.0 que par des entreprises n'ayant pas adopté l'Industrie 4.0. Selon le répondant 1 (groupe A), le répondant 2 (groupe A), le répondant 14 (groupe A) et le répondant 10 (groupe F), on observe une réaffectation des postes et des tâches plutôt qu'une perte d'emploi à moins qu'on ne soit vraiment pas bon comme employé. Par exemple pour le répondant 10 (groupe F) avec l'Industrie 4.0, « ... *l'entreprise a été capable de centraliser l'information en un seul lieu, ce qui fait il y a plus de personnes dans les bureaux parce que c'est vraiment dans les bureaux que cela se passe. C'est donc le cœur de l'intelligence de l'entreprise ...* ». Pour le répondant 2 (groupe A), les conditions de travail des employés aussi s'améliorent. Après le travail manuel pénible dans le passé, le travail devient plus simple à l'ère de l'Industrie 4.0. On assiste à une meilleure qualification au sein de l'entreprise et aussi une réaffectation du monde vers d'autres tâches à cause du manque de main d'œuvre. De plus le répondant 6 (groupe F) déclare que de nouvelles compétences sont développées par les employés. Dans son entreprise par exemple « ... *des employés qui travaillaient en planification, on finit par comprendre qu'il était plus intéressant pour eux de travailler avec SAP que de travailler avec Excel pour passer les commandes, vérifier le niveau des stocks à une date précise, etc. Ce qu'ils ne faisaient pas auparavant ...* ». Cela sert donc à travailler plus vite et être plus rentable, car c'est ce dont une entreprise a besoin.

6.6.4 LES EXIGENCES POUR LES CADRES

Travailler dans un environnement 4.0 exige des cadres de nouvelles façons de faire au quotidien. Il faut entre autres des **changements dans la planification, avoir plus de temps et réaliser plus de tests**. Ces deux points représentent des **tendances exigées pour les cadres** voulant travailler dans un environnement 4.0. Ils ont été identifiés par le répondant 6 (groupe F), car l'entreprise est à un stade avancé dans le processus d'adoption de l'Industrie 4.0 contrairement aux autres. Selon lui « ... *implanter le 4.0 c'est énormément long, c'est beaucoup, beaucoup de temps parce qu'il faut faire des tests avant de présenter le produit aux clients. Donc si cela ne marche pas du premier coup, c'est problématique ...* ». De plus en tant que cadre supérieur de l'entreprise, il a dû apporter des changements dans la planification, consacrer du temps pour concevoir les capsules de formation que les employés utilisent.

6.7 RÉSULTATS EN LIEN AVEC LA GOUVERNANCE REQUISE POUR RÉUSSIR ET ADOPTER L'IMPLANTATION DE L'INDUSTRIE 4.0 OU DE L'UNE DE SES COMPOSANTES DANS UNE ENTREPRISE

Le tableau 17 ci-dessous résume les principaux résultats en matière de gouvernance. Au vue des données extraites des entrevues et des informations de ce tableau, nous observons que les entreprises ayant adopté ou non l'Industrie 4.0 préconisent de développer des **stratégies**, d'avoir une **planification et une mise en œuvre** adéquate afin d'évoluer dans un environnement 4.0. Ces entreprises élaborent des **modèles d'affaires et de marchés** propres à leur réalité dans le but d'être plus compétitif et concurrentiel. Cependant, pour y arriver, il faut un **leadership** fort et une **culture d'entreprise** qui tolère le droit à l'erreur et qui donne plus d'autonomie à ses employés dans l'exécution des tâches.

6.7.1 LE LEADERSHIP

Nous remarquons que la question de **leadership** a été évoquée par la majorité chez des entreprises. Ils reconnaissent tous à l'unanimité que pour assurer et apporter des changements majeurs dans une entreprise, il faut d'abord et avant tout une volonté des dirigeants. Par exemple le répondant 2 (groupe A) nous a signifié qu'au départ les choix doivent venir de la direction pour l'implantation de l'Industrie 4.0. Mais dans les entreprises syndiquées, cela doit venir autant de la direction que des employés. Aussi, le répondant 3 (groupe A) a déclaré qu'il faut une volonté des dirigeants, car « ... *cela sera plus dynamique et les employés seront plus fiers de travailler pour une entreprise qui se développe dans son secteur et dans la région aussi. Cela nécessite alors une façon de gérer, une vision et il faut qu'on trouve un avantage à prendre ce virage. Si cet avantage est trouvé alors il ne reste plus qu'à trouver la façon de communiquer pour que tout le monde embarque, adhère à l'idée. En revanche, si le patron veut tirer un bout et les employés l'autre bout, cela ne fonctionnera pas ...* ». De plus, pour le répondant 5 (groupe F) c'est aussi une perception de génération. Selon lui « ... *l'ancienne génération est habituée à une certaine routine et estime que tout va bien. Or, la nouvelle génération est plus dynamique, elle est capable de déceler les problèmes que l'entreprise s'améliore, progresse et s'automatise par exemple ...* ». Afin de réussir cette transition, il faut une implication conjointe des employés et des cadres dans le processus, car cela permet entre autres de prendre leurs avis, de partager les tâches et les responsabilités.

D'après le répondant 1 (groupe A), il faut penser à déléguer, car cela rend le travail plus flexible. Il précise que « ... *par le passé dans l'entreprise le leadership était très paternel, tandis qu'actuellement avec la nouvelle génération chacun est responsable de ses actes, mais le supérieur les accompagne. Il leur sert de coach, et chacun des employés a le choix de choisir ce dans quoi il se sent plus à l'aise ...* ». Il estime avoir de la chance d'avoir une équipe tellement diversifiée. Pour le répondant 4 (groupe A), l'entreprise « ... *n'a pas vraiment le choix que le changement, les nouvelles idées viennent d'abord de la direction. Mais par la suite il faut trouver les moyens pour que les employés embarquent dans le bateau. Néanmoins, cela serait encore plus intéressant si les idées venaient des employés ensuite que l'information remonte aux oreilles des dirigeants ...* ». Il est donc important pour le répondant 12 (groupe A) et le répondant 10 (groupe F) de nécessairement prendre l'avis du personnel du plancher et il faut les impliquer à chaque étape du processus en discutant et en tenant compte de leur avis, car ce sont eux qui vivent mieux les réalités sur le terrain que les cadres. Il est donc important qu'un dialogue ouvert existe entre les parties. Par conséquent, comme le reconnaît le répondant 15 (groupe G) il faut un leadership très participatif qui implique beaucoup l'équipe de travail, pas seulement l'équipe de direction, mais même les employés d'usine. D'ailleurs le répondant 1 (groupe A) précise qu'il faut développer des compétences additionnelles et des méthodes de gestion aussi. Pour lui, « ... *un dirigeant doit*

avoir une compréhension de ses systèmes, doit avoir vu beaucoup d'exemples et doit avoir des exemples concrets, car cela offre une meilleure vision au niveau de la production, grâce à l'appui des collaborateurs ... ».

6.7.2 LA STRATÉGIE

Des **stratégies** doivent être mises en place par la haute direction pour vivre, travailler dans un environnement 4.0 et ainsi gérer au mieux cette gestion de changement. Un ensemble de ses stratégies ont été identifiées par la majorité des répondants que ce soit tant pour des entreprises n'ayant pas adopté l'Industrie 4.0 que pour des entreprises ayant adopté l'Industrie 4.0. Une infirme partie des répondants a évoqué le point relatif aux ressources humaines disponibles pour la réalisation des projets. Par exemple le répondant 15 (groupe G) déclare que dans son entreprise « ... *durant la période pendant laquelle a duré le projet d'implantation de l'Industrie 4.0, il y avait une équipe entièrement dédiée à la réalisation du projet 4.0 dans l'entreprise et à rien d'autre ...* ». Pour y arriver, il est important d'adopter un bon modèle de gestion. Le répondant 4 (groupe A) dit qu'au niveau de la gestion il faut s'assurer que tout le monde embarque dans le projet. Le répondant 14 (groupe A) suggère de mettre en place une structure pour l'amélioration continue. Cela veut dire de sélectionner les priorités de l'amélioration continue selon le *business case*. Donc, « ... *si le business case est 4.0 et que c'est assez important pour monter dans l'échelle des priorités alors c'est certain que le projet va être lancé. Par la suite on va se monter un mode de gestion de projet qui est optimal pour son implantation ...* ». Le répondant 9 (groupe C) pense qu'il faut déléguer le maximum de tâche, recruter le plus de travailleurs afin de pallier au mieux à la pénurie de main d'œuvre. Concernant les formations dispensées, il suggère de « ... *s'assurer que l'information est bien comprise de tous, ce qui permet d'éviter les incompréhensions, car cela laisse place à des interprétations multiples pour une même affaire. Il faut donc simplifier au maximum l'information, la rendre la plus claire possible puis vérifier sa compréhension sur le terrain ...* ». Le répondant 8 (groupe D) dit que son entreprise « ... *fait un auto-diagnostic de la machine, de comparer les performances actuelles de la machine avec les performances passées et avec les performances attendues grâce à des tableaux de bord, des métriques qu'elle essaye de développer ...* ». Dans le cas de l'entreprise du répondant 10 (groupe F), le modèle de gestion de son entreprise est « ... *un modèle Lean qui permet de rendre les problèmes visibles, puis de trouver les solutions ensemble et non seul dans son coin ...* ». Cependant, le modèle de gestion de son entreprise est directement lié à son modèle d'affaires. Il nous explique que leur « ... *modèle d'affaires est assez simple, car leur mission d'entreprise c'est d'être le plus apprécié de la clientèle et de ses employés. Fais qu'eux autres ils veulent créer une expérience client inégalée. Leur modèle de gestion c'est de s'assurer qu'il respecte les délais, qu'il n'y a pas de réclamation de la part des clients ...* ». Pour l'entreprise du répondant 13 (groupe E), le modèle d'affaires est lié à leur planification

stratégique. Par ailleurs, la majorité des répondants déclarent qu'il est tout aussi important d'avoir un excellent climat de confiance au sein de l'entreprise entre les cadres et les employés tant dans l'élaboration que dans la réalisation des projets. Enfin, il faut développer des stratégies pour être à l'écoute des clients et répondre à leurs besoins. Ainsi, la stratégie adoptée par le répondant 11 (groupe B) en tant que sous-traitant « ... *dans le court terme est de regarder ce que les clients demandent et de chercher à développer et d'offrir des produits autres qui ne rentrent pas en compétition avec les autres clients ...* ». Puis, « ... *la stratégie à long terme est d'optimiser la production pour diminuer les coûts ...* ». Par conséquent, la stratégie générale d'entreprise le 4.0 lui sert à faire de la rétention de personnel, à optimiser sa production, à faciliter les prises de décision, à donner des outils de comparaison aux employés et tirer les leçons des différentes actions menées.

6.7.3 LA PLANIFICATION ET LA MISE EN ŒUVRE

Une **planification et une mise en œuvre** sont aussi importantes pour l'implantation de l'Industrie 4.0 dans une entreprise par la haute direction que ce soit pour des entreprises ayant ou non adopté l'Industrie 4.0. Quelques répondants ont évoqué l'importance de faire des économies sans perturber les processus de production en cours. Le répondant 6 (groupe F) déclare que son entreprise se fait plus d'argent qu'auparavant, car ils vendent plus, mais que l'argent que l'entreprise reçoit maintenant est investi pour des choses importantes et non plus pour des futilités. Pour illustrer son propos, il nous donne l'exemple du fait que « ... *l'entreprise a pu éliminer les fameux fichiers Excel dans la production et utilise entièrement SAP dans la production... Avant l'entreprise avait un bénéfice de 30 000 \$/an et celui-ci a été multiplié par quatre pour un bénéfice maintenant de 120 000 \$/an* ». Ainsi, selon lui, les coûts ont baissé énormément et ça donne l'avantage à l'entreprise d'aller plus rapidement. De plus, il nous dit qu'avant en planification il y avait six employés pour sortir les étiquettes, mais actuellement il n'y en a que deux. C'est donc plus rapide, plus économique et il y a un énorme gain de temps dans les bureaux ainsi qu'une rapidité dans la prise de décision. Il précise également que « ... *grâce aux tableaux de bord, tout le monde connaît les objectifs, tout le monde sait où on est rendu dans le travail ce qui facilite grandement la prise de décision...* ». Cependant, il est tout aussi important pour les entreprises d'estimer les coûts et les avantages des investissements de l'Industrie 4.0. Seuls quatre répondants ont abordé ce point chacun selon le point de vue de son entreprise. Pour le répondant 4 (groupe A), c'est le chiffre d'affaire qui va dicter le moment où l'entreprise va se lancer vers la technologie du 4.0. Pour le moment « ... *l'entreprise veut investir plus dans l'efficacité de sa production que dans l'efficacité de sa gestion bien que l'un va avec l'autre ...* ». Par contre, le répondant 11 (groupe B) déclare que son « ... *plan stratégique est de commencer à créer sa propre ligne pour vendre ses propres vêtements afin de diminuer sa dépendance avec ses clients en tant que sous-traitant. Bien que la transition soit longue et que ses clients penseront que son*

entreprise veut entrer en compétition avec eux, il estime qu'il faut avoir les reins financièrement assez solides pour être capables de vivre cette transition sur plusieurs années ... ». Puis, le répondant 13 (groupe E) qui est un installateur nous demande « ... de supposer que l'on veuille implanter la technologie de l'Industrie 4.0 dans l'entreprise, il faut être capable de convaincre les responsables sur le gain en productivité parce que l'entreprise ce qu'elle cherche à avoir est un gain en production, une réduction des coûts, une minimisation du temps d'arrêt, ce qui revient au final à comment se faire plus d'argent ... ».

Toutefois, pour réussir au mieux la transition vers l'Industrie 4.0, il est important de mettre en place une planification stratégique, donc de se donner un chronogramme clair et précis qui peut être actualisé au gré des situations. Seuls cinq répondants ont abordé leurs mises en œuvre en nous donnant leurs points de vue. Par exemple, le répondant 3 (groupe A) nous a signifié qu'il faut faire de la planification stratégique pour savoir où l'on s'en va surtout à chaque étape de la production. Cela « ... nécessite une façon de gérer, un angle de vision et il faut y trouver un avantage à prendre ce virage de l'Industrie 4.0. Si l'avantage est trouvé, il reste donc à savoir le communiquer pour que tout le monde embarque et adhère à l'idée... ». Cependant, le répondant 13 (groupe E), le répondant 10 (groupe F) et le répondant 15 (groupe G) évoquent la durée de la planification stratégique. Selon les dires du répondant 13 (groupe E), « ...un plan stratégique de trois ans c'est trop, mais un plan stratégique sur un an et demi c'est encore possible parce que la haute gestion a besoin d'avoir les résultats rapidement, mais ça ne se fait pas rapidement dans l'Industrie 4.0. Cela prend du temps à le digérer donc ça c'est un défi pour ceux qui implantent dans les autres industries... ». En outre, le répondant 10 (groupe F) et le répondant 15 (groupe G) vont vers une planification stratégique de 3 ans tout au plus avec possibilité d'apporter des modifications, des ajustements tous les ans. Dans un premier temps, le répondant 10 (groupe F) déclare « ... ne pas croire à des plans quinquennaux, car dans l'industrie tout change tellement vite puis les facteurs économiques ne sont pas toujours stables et il n'y a personne qui peut prévoir ça d'avance. Fais que l'entreprise a décidé de ne pas se faire de gros plans quinquennaux, mais de partir sur un maximum de trois ans et de se donner des défis. Puis ce plan sur trois ans l'entreprise le modifie chaque année, car elle fait une planification annuelle ... ». Il nous explique plus en détail que « ... le comité de direction se réunit dans le mois d'octobre de chaque année pour réviser son plan de l'année dernière afin de vérifier que tout a bien été fait et suivi. Puis le comité de direction vérifie si le plan qui est fait sur trois ans jusqu'en 2021 est toujours en accord avec la vision 2021. Mais des entreprises qui se font des planifications stratégiques sur les 10 prochaines années, il leur souhaite bonne chance parce qu'il y'a tellement des choses qui vont changer ... ». Dans un deuxième temps, le répondant 15 (groupe G) déclare aussi faire une planification stratégique dans son entreprise sur trois ans.

6.7.4 LE MODÈLE D'AFFAIRES ET DE MARCHÉ

Toute gestion de changement dans une entreprise passe par une réorganisation de son **modèle d'affaires et de marché** par la haute direction dans le but de s'assurer une bonne survie économique. Nous constatons qu'une majorité des entreprises estiment qu'il est important de saisir les nouvelles opportunités naissantes, les nouveaux modèles commerciaux et d'affaires au cours des dernières années. Par exemple, le répondant 1 (groupe A) nous a signifié que son « ... *entreprise est dans une belle situation actuellement, car tout ce qu'elle produit est déjà vendu très longtemps à l'avance... Mais même si cela fonctionne bien, l'entreprise voudrait le rendre encore plus flexible pour être capable au cas où un client arrive avec une commande express afin d'être capable de mieux répondre ...* ». L'entreprise travaille actuellement sur son mode d'optimisation au niveau de la production. Ensuite, le répondant 11 (groupe B) nous déclare que son modèle d'affaires est en évolution continue parce que le marché change et le contexte change et que le nouveau modèle d'affaire pour lequel l'entreprise pense actuellement est comment pallier le manque, la pénurie de main d'œuvre. Cependant, les répondants 7 et 9 (groupe C) nous disent qu'en gros les modèles d'affaires de leurs entreprises n'ont pas changé et sont restés les mêmes, mais qu'il y a eu quelques petits changements. Pour le répondant 7 (groupe C), le modèle d'affaire de l'entreprise n'a pas changé, c'est resté le même. Il estime néanmoins que cela peut nécessiter des changements avec l'implantation du 4.0. En effet, l'intégration de nouvelles technologies améliore la productivité en produisant plus et cela peut ouvrir de nouvelles portes de marché. Également, le répondant 9 (groupe C) nous a notifié que son modèle d'affaires n'a pas changé et qu'il est toujours aussi complexe. C'est « ... plus l'ERP qui s'est adapté à son modèle d'affaires que l'inverse. Puis, le répondant 6 (groupe F) est assez content qu'il ait finalement grâce à l'informatique un modèle d'affaire dans son entreprise, car avant il n'y en avait pas du tout. Le répondant 10 (groupe F) nous fait remarquer que « ... *le modèle d'affaire de son entreprise est assez simple parce que la mission de l'entreprise est d'être la plus appréciée de la clientèle et de ses employés. Fait qu'elle veut créer une expérience client inégalée en s'assurant que les produits arrivent dans des délais très courts, qu'ils soient de bonne qualité, qu'ils soient faciles à installer et que le service à la clientèle soit irréprochable et l'un des meilleurs...* ». Comme vient de le souligner le répondant 10 (groupe F), trois autres répondants estiment qu'il est aussi important d'avoir une interaction plus étroite entre les clients et les fabricants. Par exemple, le répondant 3 (groupe A) notifie qu'il faut qu'il ait de la cocréation donc des relations plus étroites entre les clients et l'entreprise. Puis, le répondant 13 (groupe A) nous déclare que son entreprise propose une architecture toute faite à ses clients, mais que parfois elle doit souvent s'adapter à l'architecture informatique de ces derniers qui est complexe et vieillissante. En sommes, selon ses dires, « ... *le modèle d'affaires de l'entreprise n'a pas changé... Ce sont seulement des options supplémentaires qu'elle offre dans sa gamme de produits, mais leur plan d'affaires n'a pas changé par rapport à tout ce qui se faisait. C'est juste que l'entreprise s'est adaptée un peu plus à la*

demande du matériel électronique des clients ... ». Finalement, Le répondant 12 (groupe A), nous notifie que le modèle d'affaire et de marché évolue toujours parce qu'il dépend de comment le marché, les fournisseurs et les clients évoluent.

En ce qui concerne l'amélioration continue et l'efficacité des processus de création de valeurs, seules quatre entreprises en ont fait état. Le répondant 14 (groupe A) déclare qu'il ne pourrait pas nous dire par exemple que son entreprise a adopté la méthode Lean ou la méthode Toyota ou la méthode *Six Sigma* car elle n'a adopté aucune de ses méthodes en tant que telles. Pour le moment « ... *l'entreprise est juste dans le gros bon sens. Elle n'a pas de méthode officielle d'implanter, mais elle connaît chacun des principes et les applique. Elle n'a pas un modèle hyper rigide dans lequel elle se reconnaît parce qu'étant donné qu'elle ne fait pas de la production en série et qu'elle est un peu à part, elle ne se reconnaît pas entièrement dans un modèle ou dans un autre. Il y en a qui parle de just-in-time, il y en a qui parle de quick correspond manufacturing, il y en a qui parle de Lean Six Sigma. L'entreprise emprunte les concepts un peu dans tout, c'est un peu le concept de la théorie des contraintes, c'est un peu le concept de just-in-time, c'est un peu le concept de la méthode Lean Six Sigma, c'est un peu le concept de la méthode Toyota, etc ...* ». Il rajoute que « ... *l'entreprise se fait une recette maison, dans le fond le modèle d'affaires c'est le modèle propre aux réalités de son entreprise. Elle s'en fait un qui est propre à elle. Elle n'adopte pas un modèle qui est soi-disant merveilleux, ça n'existe pas pour elle en tout cas...* ». De plus, le répondant 14 (groupe A) attire notre attention sur le fait que dans le processus l'on peut remarquer qu'il y avait beaucoup d'opérations à non-valeur ajoutée. Son entreprise n'a pas appliqué par exemple tous les principes du *value stream mapping*. Elle a juste pris ce qui l'intéressait puis elle en a conçu sa propre procédure maison.

6.7.5 LA CULTURE D'ENTREPRISE

La **culture d'entreprise** ne semble pas avoir un impact majeur lors de l'implémentation du 4.0. Néanmoins, quelques entreprises estiment que c'est aussi un facteur pour lequel il faut prêter aussi une attention particulière bien qu'il soit assez négligé par la grande majorité. Trois répondants ont évoqué la question de la culture d'autonomie, du laisser-faire, du droit à l'erreur. Par exemple, le répondant 1 (groupe A) précise qu'« ...*il faut donner plus de marge de manœuvre, il faut tolérer les erreurs, il faut donner plus d'initiative aux employés, car c'est souvent de là que les meilleures idées vont sortir...* ». Il nous explique aussi que « ... *dans le passé ce qui est arrivé est qu'il y a beaucoup de projets où on a laissé faire sans regarder vraiment, sans évaluer vraiment. Par exemple au département recherche et développement, il y a déjà eu quelqu'un qui a travaillé 1 an pour rien. Il faut donc cadrer les employés pour avoir un bon suivi des processus, de bons résultats. Il faut aussi une bonne évaluation préliminaire et de la rigueur bien que l'on puisse se planter dans son évaluation, mais au moins on le fait ...* ». Toujours dans le même ordre d'idée, le répondant 4 (groupe A)

et le répondant 11 (groupe B) reconnaissent aussi qu'il faut donner plus d'autonomie aux employés et donc moins de contrôle, mais un suivi régulier et constant. En effet, le répondant 4 (groupe A) précise que dans son entreprise tous les employés sont multitâches et très autonome. Il précise que « ... *l'entreprise n'est pas une garderie, qu'il n'est pas le gardien, la police. Par contre il souhaite que chaque employé soit sa propre police ... C'est ainsi qu'on obtient des résultats favorables en donnant une bonne latitude, où chacun sait quoi faire tout le temps...* », et rajoute que « ... *cela évite de travailler aux dépend d'un autre ou d'un chef d'unité ou d'un patron étant donné que tout le monde sait quoi faire, que cela avance bien, tout le monde est autonome...* ». Donc, implanter une Industrie 4.0 axée sur les besoins de la gestion ne serait pas un problème et serait bien reçu dans une entreprise comme la sienne.

7. CONCLUSION

Ce rapport traite de l'Industrie 4.0, appelée aussi « quatrième révolution industrielle », « fabrication intelligente », « Internet industriel » ou « industrie intégrée ». L'Industrie 4.0 est actuellement un sujet très discuté qui aurait le potentiel d'affecter des industries entières en transformant la façon dont les marchandises sont conçues, fabriquées, livrées et payées (Hofmann et Rüsç, 2017). Le concept de l'Industrie 4.0 a émergé ces dernières années en raison des progrès technologiques et des développements perturbateurs du secteur industriel mondial. Le terme « Industrie 4.0 » est apparu pour la première fois dans un article publié en novembre 2011 par le gouvernement allemand à la suite d'une initiative concernant la stratégie de la haute technologie pour 2020 (Zhou *et al.*, 2016 et Pereira et Romero, 2017).

En faisant une combinaison de la définition de Pereira et Romero (2017) et de Bédard-Maltais (2017), nous avons pu concevoir notre propre définition de l'Industrie 4.0 qui nous a guidé tout le long de notre recherche. Ainsi, l'Industrie 4.0 est un nouveau paradigme de fabrication qui met fortement l'accent sur la création de produits et de processus intelligents, en ayant recours aux technologies numériques, à l'utilisation de machines intelligentes et à la transformation de systèmes de fabrication classiques en usines intelligentes dans le but de rendre les activités de fabrication plus agiles, plus souples et mieux adaptées aux besoins des clients.

Afin d'approfondir nos connaissances sur l'Industrie 4.0, nous avons donc décidé d'explorer la faisabilité organisationnelle des projets d'implantation de l'Industrie 4.0 dans les PME manufacturières de la région de Chaudière-Appalaches. Le but de cette recherche est de dresser un portrait de la vision que les entreprises manufacturières de Chaudière-Appalaches ayant et n'ayant pas adopté l'Industrie 4.0 se font de l'adoption de l'Industrie 4.0.

Grâce aux entrevues semi-dirigées, nous avons pu collecter l'opinion de gestionnaires ou des employés responsables de la transformation numérique sur nos questions de recherche. Quinze (15) participants ayant tous des profils de postes très différents ont été interrogés.

L'analyse des données recueillies auprès de nos participants nous révèle que :

- Les principaux défis de l'implantation de l'Industrie 4.0 pour les entreprises sont les besoins financiers (besoin en investissement et rentabilité), et les barrières sur le plan des ressources humaines (nouvelles compétences requises et besoin en personnel qualifié). Les entreprises n'ayant pas adopté l'Industrie 4.0 ont, en plus, d'autres défis au niveau 1) stratégique (développement et élaboration de plan stratégique et numérique 4.0; volonté de la part du dirigeant de ne pas se lancer dans l'Industrie 4.0), 2) technique (collecte, analyse, traitement et sécurité des données), 3) matériel et logistique (connectivité des objets, des logiciels, des équipements; absence de matériel et d'infrastructure technologique pour la mise en œuvre de l'Industrie 4.0 et difficulté de fabrication des produits personnalisés et à la pièce pour les clients), et 4) relationnel (améliorer le déséquilibre entre l'offre disponible des entreprises et la demande attendue des clients; identifier et conclure des formes de collaboration, d'alliance stratégique avec leurs fournisseurs ou leurs concurrents pour rester compétitives et trouver des consultants capables de répondre en un temps record aux besoins de l'entreprise).
- Les bénéfices recherchés par les entreprises sont l'accroissement de la productivité des entreprises, l'amélioration de la qualité globale des produits, la capacité à innover et la disponibilité des données extraites. Cependant, la majorité des entreprises n'ayant pas adopté l'Industrie 4.0 trouvent que l'Industrie 4.0 permettrait d'offrir plus de valeur aux emplois (amélioration des conditions de travail et réaffectation des tâches).
- Les principaux freins pour les entreprises sont 1) les enjeux financiers (manque d'accès au financement, mauvais investissement, mauvaise estimation du budget, coûts excessifs, risque financier, rendement du capital investi incertain, risque de marché et de récession), 2) les enjeux humains (manque de main-d'œuvre qualifiée, résistance, réticence au changement chez les employés, avoir la bonne personne à la bonne place, faire affaire et travailler avec des consultants, fournisseurs fiables pour les équipements et les services offerts à l'entreprise, dirigeant représentant une barrière pour son entreprise, manque de compétences chez les cadres et les utilisateurs) et 3) les enjeux technologiques (infrastructure en retard, complexité de la technologie, cybersécurité, et avoir une structure [informatique] trop avancée pour ce dont l'entreprise a besoin). Pour les entreprises qui n'ont pas adopté l'Industrie 4.0, d'autres freins s'ajoutent. Ces freins sont les enjeux stratégiques (absence d'une stratégie claire, absence d'entreprises pouvant servir d'exemple à d'autres entreprises pour leur montrer par où commencer et la non-connaissance de ce qu'on gagne avec

l'implantation du 4.0) et les enjeux de clientèle (non-convergence d'Industrie 4.0 avec le type de besoins et de service à la clientèle, difficulté pour un sous-traitant d'avoir une véritable planification stratégique). En revanche, les enjeux de planification (difficulté à percevoir les avantages réels de ces projets, l'équipe de projet changeante en cours de route et le risque de voir le projet s'échelonner sur plusieurs années durant pour diverses raisons) sont des freins pour les entreprises ayant adopté l'Industrie 4.0, car elles sont à un stade plus avancé dans le processus d'implantation.

- Les prérequis nécessaires pour amorcer le virage de l'implantation de l'Industrie 4.0 pour les entreprises sont 1) les aptitudes techniques (maîtriser ses procédés, disposer de nouvelles compétences requises, avoir un minimum de compétences avant d'arriver au sein de l'entreprise et faire de l'entretien ou de la maintenance préventive et prédictive) et 2) les aptitudes technologiques (sélectionner et déployer correctement son progiciel [ERP ou SAP]). Cependant, la majorité des entreprises n'ayant pas adopté l'Industrie 4.0 estiment qu'il faut avoir aussi des aptitudes managériales (disposer d'une bonne planification, avoir une bonne connaissance de sa structure d'entreprise, avoir une bonne rentabilité, avoir un mode de gestion, de croyance, de persévérance et de mesure des résultats, avoir un *business case*, être conscient de ses enjeux et savoir par où commencer) pour bien aborder le virage de l'Industrie 4.0.
- Les principales compétences que l'ensemble des employés et des cadres des entreprises devraient avoir sont 1) les compétences opérationnelles (connaissance de pointe, compréhension des processus et compétences techniques), 2) les compétences en informatique (aptitudes analytiques, compétences de codage, faire parler les données informatiques) et 3) des compétences managériales (compétences pour former les employés au sein de l'entreprise, compétences d'un bon pédagogue, compétences dans la gestion de changement et compétences pour élaborer une feuille de route ou d'action). Toutefois, il ressort une panoplie de traits et caractéristiques communes (ouverture d'esprit, curiosité et bonne capacité d'écoute) que les employés et les cadres se doivent d'avoir en toutes circonstances qu'elles aient ou non adopté l'Industrie 4.0 afin de s'adapter et de gérer au mieux tous les changements vers l'Industrie 4.0.
- Pour l'ensemble des entreprises interrogées, un l'environnement de travail 4.0 aurait des impacts bénéfiques pour 1) les employés (attraction, rétention, développement de connaissance, amélioration des conditions de travail et clarté de rôle), 2) l'entreprise (optimisation de la prise de décision, collaboration, interaction homme-homme et homme-machine, exécution des tâches en temps réel et tourné vers l'avenir, circulation descendante et ascendante de l'information). De plus, l'environnement de travail 4.0 a des exigences pour les 1) employés (transformation des profils et plus de compétences) et pour les 2) cadres (changements dans la planification).

- Afin d'assurer une bonne gestion de changement (gouvernance), les entreprises interrogées préconisent 1) de développer des stratégies (redéfinir le champ d'activité et souligner l'implication active du leadership de l'entreprise, avoir un modèle d'affaires, une culture d'entreprise en lien avec la planification stratégique et le mode de gestion de l'entreprise, avoir des ressources disponibles pour la réalisation des projets, adoption de modèles de gestion, instaurer un climat de confiance au sein de l'entreprise entre les cadres et les employés dans l'élaboration, la réalisation des projets, être à l'écoute des clients et répondre à leurs besoins), 2) d'avoir une planification et mise œuvre (faire des économies importantes sans perturber les processus de production en cours, d'estimer les coûts et les avantages des investissements de l'Industrie 4.0 et aussi de faire une planification stratégique par exemple tous les trois ans), 3) d'élaborer des modèles d'affaires (améliorer en continu l'efficacité des processus de création de valeurs, avoir une interaction plus étroite entre les clients et les fabricants et saisir les nouvelles opportunités naissantes, les nouveaux modèles commerciaux et d'affaire au cours de ses dernières années), 4) d'avoir un leadership (volonté des dirigeants, avoir un leadership [très participatif, collaboratif, de délégation des tâches] qui implique les employés et les cadres, compétences et méthodes de gestion) et 5) d'avoir une culture d'entreprise (culture d'autonomie, du laisser-faire, du droit à l'erreur et culture d'entreprise non changée).

❖ Les retombées de la recherche

La revue de littérature que nous avons effectuée nous a permis dans un premier temps d'analyser les nombreuses définitions de l'Industrie 4.0 et de faire ressortir les différentes composantes clés de l'Industrie 4.0 à savoir les systèmes cyber-physiques, l'Internet des objets, l'Internet des services, et l'usine intelligente. Dans un second temps, une autre revue de littérature nous a permis de développer un nouveau cadre de référence sur lequel nous avons basé notre étude. Cette recherche vient donc analyser et enrichir la littérature existante. L'analyse de cette littérature récente sera en effet utile pour les chercheurs qui s'intéressent à l'Industrie 4.0.

Par ailleurs, au niveau managérial, nous croyons que les résultats de cette recherche vont aider les chefs d'entreprises, les gestionnaires responsables (ou les employés responsables) de la transformation numérique des PME et des entreprises manufacturières de Chaudière-Appalaches de comprendre davantage quels sont les défis, les opportunités, les freins et les compétences requises pour l'implantation de l'Industrie 4.0. Les résultats apportent également aux chefs d'entreprises un éclairage sur l'importance de la mise en place d'une bonne gestion de changement au sein de leurs entreprises et des formations adéquates leur permettant de saisir toutes les possibilités que peut offrir l'implantation de l'Industrie 4.0.

❖ **Les limites de la recherche**

Bien que les résultats obtenus lors des entrevues soient intéressants, force est de constater comme dans toute recherche que notre étude présente tout de même certaines limites qu'il convient de souligner en vue de mieux saisir la portée de nos résultats à savoir :

- La nature qualitative de la recherche ne permet pas de généraliser les résultats.
- Nous avons dû constater une multitude de sous-groupes sur le terrain autres que les deux groupes que nous avons prévus initialement, ce qui nous a forcé à nous adapter sur le terrain face à chaque participant ;
- La présence de profils des répondants totalement différents dans notre échantillon a eu un impact sur les réponses obtenues et donc des répercussions sur l'analyse des résultats ;
- Nous n'avons pas pu obtenir une saturation des données. Chaque entrevue supplémentaire apportait de nouveaux éléments et nous avons dû arrêter à 15 entrevues étant donnée les ressources limitées du projet ;
- Avec 15 répondants de différents secteurs, la comparaison entre les secteurs d'activités n'était pas possible.
- La recherche a été faite dans une seule région du Québec ;
- La codification des données a été réalisée par un seul chercheur;
- L'absence de la réalisation d'une revue de littérature systématique pouvant faire ressortir de manière exhaustive tous les éléments de la littérature et ainsi avoir une comparaison plus complète avec les résultats des entrevues.

❖ **Les suggestions pour des recherches futures**

Cette étude ouvre la porte à plusieurs recherches futures. L'ensemble des résultats de cette recherche pourraient servir comme point de départ pour la réalisation d'une recherche quantitative dans le but de généraliser les résultats en matière de défis, d'opportunités, de freins, de prérequis, de compétences requises, d'environnement de travail et de gouvernance liés à l'implantation de l'Industrie 4.0. De plus, d'autres chercheurs pourraient approfondir les recherches sur le sujet en effectuant des recherches dans d'autres régions au Québec et au Canada, et/ou en réalisant une comparaison entre les secteurs d'activités et en comparant les PME par rapport aux grandes entreprises. Finalement, en lien avec la comparaison des résultats des entrevues et de la littérature, les recherches futures peuvent se pencher sur la réalisation d'une revue de littérature systématique pour faire ressortir de façon exhaustive tous les éléments de la littérature et ainsi avoir une comparaison plus complète avec les résultats des entrevues.

8. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abramovici, M., & Stark, R. (Eds.). (2013). *Smart Product Engineering: Proceedings of the 23rd CIRP Design Conference, Bochum, Germany, March 11th-13th, 2013*. Springer Science & Business Media.
- AFITEP (Paris). (2010). *Dictionnaire de management de projet : plus de 1400 termes français définis et analysés, avec leur équivalent en anglais, table de correspondance français, anglais, allemand, espagnol, portugais, ukrainien, russe, 15 graphes d'enchaînement des termes, 43 figures*. Éditions AFNOR.
- AFNOR. (2003). *Étude de faisabilité d'un projet*. Edition Saint Denis la Plaine.
- Alekseev, A. N., Evdokimov, S. Y., Tarasova, A. Y., Khachatryan, K. S., & Khachatryan, A. A. (2018). *Financial strategy of development of industry 4.0 in the countries with developing economy*. *Revista ESPACIOS*, 39(12).
- Armstrong, M., & Taylor, S. (2014). *Armstrong's handbook of human resource management practice*. Kogan Page Publishers.
- Andersson, P., & Mattsson, L. G. (2015). *Service innovations enabled by the "internet of things"*. *IMP Journal*, 9 (1), 85-106.
- Atzori, L., Iera, A., & Morabito, G. (2010). *The internet of things: A survey*. *Computer networks*, 54(15), 2787-2805.
- Atzori, L., Iera, A., & Morabito, G. (2017). *Understanding the Internet of Things: definition, potentials, and societal role of a fast-evolving paradigm*. *Ad Hoc Networks*, 56, 122-140.
- Bagheri, B., Yang, S., Kao, H. A., & Lee, J. (2015). *Cyber-physical systems architecture for self-aware machines in industry 4.0 environment*. *IFAC-PapersOnLine*, 48(3), 1622-1627.
- Baheti R, Gill H. (2011). *Cyber-physical systems*. In: *Samad T, Annaswamy AM, editors The impact of control technology: Overview, success stories, and research challenges*. New York: IEEE Control Systems Society, 161–6.
- Bardin, L. (2001). *L'analyse de contenu* (10e éd.). Paris : Presses Universitaires de France, 93-117.
- Barros, A., Oberle, D. (Eds.), *Handbook of Service Description*, Springer, New York.
- Bauer H, Baur C, Camplone G, George K, Ghislanzoni G, Huhn W, et al. (2015). *Industry 4.0 - How to navigate digitization of the manufacturing sector*.
- Bauernhansl, T. (2014). *Die vierte industrielle Revolution*. Der Weg in ein wertschaffendes Produktionsparadigma, in: Bauernhansl, T., M. ten Hompel, and B. Vogel-Heuser, eds., *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik*, Springer, Wiesbaden, pp. 3-35.
- Beaudoin, J., Lefebvre, G., Normand, M., Gouri, V., Skerlj, A., Pellerin, R.... & Danjou, C. (2016). *Prendre part à la révolution manufacturière ? Du rattrapage technologique à l'Industrie 4.0 chez les PME*. Centre francophone d'informatisation des organisations (CEFRIO).
- Becker, M. (2013). *Personalentwicklung - Bildung, Förderung und Organisationsentwicklung in Theorie und Praxis*. 6th ed. Stuttgart: Schäffer-Poeschel.
- Bédard-Maltais, P.-O. (2017). *Industrie 4.0 : la nouvelle révolution industrielle. Les fabricants canadiens sont-ils prêts ?* [s.l.] : Banque de développement du Canada (BDC).
- Beechler, S. et Woodward, I. C. (2009). The global "war for talent". *Journal of International Management*, 15(3), 273-285.

- BMBF. (2014). *Die neue Hightech-Strategie - Innovationen für Deutschland*. Berlin.
- Borgia, E. (2014). *The Internet of Things vision: Key features, applications and open issues*. *Computer Communications*, 54, 1-31.
- Brühl, V. (2015). *Wirtschaft des 21. Jahrhunderts: Herausforderungen in der Hightech-Ökonomie*. Springer-Verlag.
- Burritt, R., & Christ, K. (2016). *Industry 4.0 and environmental accounting: a new revolution?* *Asian Journal of Sustainability and Social Responsibility*, 1(1), 23-38.
- Buttrick, R. (2006). *Gestion de projet : le guide exhaustif du management de projets*. 3e, Pearson Education.
- Cardoso, J., Voigt, K., & Winkler, M. (2008, June). *Service engineering for the internet of services*. In *International Conference on Enterprise Information Systems* (pp. 15-27). Springer, Berlin, Heidelberg.
- CEFRIQ. (2017). *Industrie 4.0 : enquête auprès des entreprises manufacturières du Québec : rapport d'analyse*. Québec. Québec : Ministère de l'Économie, de la Science et de l'Innovation. Repéré à <https://cefrio.qc.ca/media/1033/enquete-2017-industrie40-enquete-entreprises-manufacturieres.pdf>
- CGI. (2017). *Industrie 4.0 : pour une entreprise hautement concurrentielle*. Récupérer à <https://www.cgi.com/fr/white-paper/industry-4-0-pour-une-entreprise-hautement-concurrentielle>
- Chalmers, A. (1982). *What is this thing called science?* Queensland, Australie: University of Minnesota Press.
- CCMM, 2017 : Chambre de commerce du Montréal métropolitain. (24 février 2017). *Pourquoi le virage vers l'industrie 4.0 est-il si important pour nos entreprises manufacturières ?* [Billet de blogue]. Repéré à https://www.ccmm.ca/fr/nouvelles/blog_pourquoi-le-virage-vers-l-industrie-4-0-est-il-si-important-pour-nos-entreprises-manufacturieres/
- Constantine, C. (2014). *Big data: an information security context*. *Network Security*, 2014 (1), 18-19.
- Corriveau, G., Larose, V., Menvielle, W., Nomo, T. S., Gélinas, J., & Cadieux, P. (2012). *Guide pratique pour étudier la faisabilité de projets*. PUQ.
- Davies, A., Fidler, D., & Gorbis, M. (2011). *Future work skills 2020*. *Institute for the Future for University of Phoenix Research Institute*, 540.
- Deloitte. (2015). *Industry 4.0. Challenges and solutions for the digital transformation and use of exponential technologies*. Deloitte 1–30.
- Dombrowski, U., & Wagner, T. (2014). *Mental strain as field of action in the 4th industrial revolution*. *Procedia CIRP*, 17, 100-105.
- Dorst, W. (Ed.). (2015). *Umsetzungsstrategie Industrie 4.0: Ergebnisbericht der Plattform Industrie 4.0*. Bitkom Research GmbH.
- Erol, S., Jäger, A., Hold, P., Ott, K., & Sihm, W. (2016). *Tangible Industry 4.0: a scenario-based approach to learning for the future of production*. *Procedia CiRp*, 54, 13-18.
- Farooq, M., Waseem, M., Mazhar, S., Khairi, A., & Kamal, T. (2015). *A Review on Internet of Things (IoT)*. *International Journal of Computer Applications*, 113 (1), 1-7.
- Fleisch, E. (2010). *What is the internet of things? An economic perspective*. *Economics, Management, and Financial Markets*, 5(2), 125-157.
- Foidl, H., & Felderer, M. (2016). *Research challenges of industry 4.0 for quality management, in Innovations in Enterprise Information Systems Management and Engineering*. In *International Conference on Enterprise Resource Planning Systems* (pp. 121-137). Springer, Cham.

- Fortin, M.-F., Gagnon J. (2016). *Fondements et étapes du processus de recherche. Méthodes quantitatives et qualitatives*. Montréal : Chenelière Éducation. 518 p.
- Francalanza, E., Borg, J., & Constantinescu, C. (2017). *A knowledge-based tool for designing cyber physical production systems*. *Computers in Industry*, 84, 39-58.
- Gall, M. D., Gall, J. P., & Borg, W. R. (2007). *Educational research: An introduction* (8e éd.). Boston, MA : Allyn & Bacon.
- Ganschar, O., Gerlach, S., Hämmerle, M., Krause, T., & Schlund, S. (2013). *Produktionsarbeit der Zukunft-Industrie 4.0* (Vol. 150). D. Spath (Ed.). Stuttgart: Fraunhofer Verlag.
- Ganzarain, J. et Errasti, N. (2016). *Three stage maturity model in SME's towards industry 4.0*. *Journal of Industrial Engineering and Management*, Vol.9 (5), pp.1119-1128
- Gehrke, L., Kühn, A. T., Rule, D., Moore, P., Bellmann, C., Siemes, S., ... & Standley, M. (2015). *A discussion of qualifications and skills in the factory of the future: A German and American perspective*. *VDI The Association of German Engineers, Düsseldorf, Germany*, 15.
- Geissbauer, R., Vedsø, J., & Schrauf, S. (2016). *A strategist's guide to industry 4.0*. *Strategy+ business*, 83, 148-163.
- Gerlitz, L. (2016). *Design management as a domain of smart and sustainable enterprise: business modelling for innovation and smart growth in Industry 4.0*. *Entrepreneurship and Sustainability Issues*, 3(3), 244-268.
- Giusto, D., Iera, A., Morabito, G., & Atzori, L. (Eds.). (2010). *The internet of things: 20th Tyrrhenian workshop on digital communications*. Springer Science & Business Media.
- Glass, R., Meissner, A., Gebauer, C., Stürmer, S., & Metternich, J. (2018). *Identifying the barriers to Industrie 4.0*. *Procedia CIRP*, 72, 985-988.
- Glova, J., Sabol, T., & Vajda, V. (2014). *Business models for the internet of things environment*. *Procedia Economics and Finance*, 15, 1122-1129.
- Gölzer, P., Cato, P., & Amberg, M. (2015, May). *Data Processing Requirements of Industry 4.0-Use Cases for Big Data Applications*. In *ECIS 0*, 1-13.
- Graßmann, H. (2005). *Qualifikation, Kompetenz und Personalentwicklung–Zum Einfluss von Informations-und Kommunikationstechnik auf Bankmitarbeiter*. *German Journal of Human Resource Management*, 19 (4), 372-375.
- Gronau, N., Ullrich, A., & Vladova, G. (2015). *Prozessbezogene und visionäre Weiterbildungskonzepte im Kontext Industrie 4.0. Lehren und Lernen für die moderne Arbeitswelt*. Berlin: GITO mbH Verlag, 125-143.
- Guba, E. G., & Lincoln, Y. S. (1994). *Competing paradigms in qualitative research*. Dans N. Denzin et Y.S. Lincoln (dir.). *Handbook of qualitative research*. Thousand Oaks, CA: Sage Publications.
- Haller, S., Karnouskos, S., & Schroth, C. (2008, September). *The internet of things in an enterprise context*. In *Future Internet Symposium* (pp. 14-28). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Hamlin, B., & Stewart, J. (2011). *What is HRD? A definitional review and synthesis of the HRD domain*. *Journal of European Industrial Training*, 35 (3), 199-220.
- Hébert, P. et al. (2016). *Feuille de route industrie 4.0 : plan d'action en économie numérique*. Québec : Économie, Science et Innovation Québec.

- Hecklau, F., Galeitzke, M., Flachs, S., & Kohl, H. (2016). *Holistic approach for human resource management in Industry 4.0*. *Procedia Cirp*, 54, 1-6.
- Helmrich K. (2015). *Digital Enterprise - Fertigungs- und Prozessindustrie auf dem Weg zu Industrie 4.0*. Handelsblatt Journal - Sonderveröffentlichung zum Thema „Industrie 4.0“.
- Hermann, M., Pentek, T., and Otto, B. (2016). *Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios*. 49th Hawaii International Conference on System Sciences. pp. 3928-3937.
- Hofmann, E., & Rüscher, M. (2017). *Industry 4.0 and the current status as well as future prospects on logistics*. *Computers in industry*, 89, 23-34.
- Hozdić, E. (2015). *Smart factory for industry 4.0: A review*. *International Journal of Modern Manufacturing Technologies*, ISSN 2067-3604, 7(1), 28-35.
- Huber, D., & Kaiser, T. (2015). *Wie das Internet der Dinge neue Geschäftsmodelle ermöglicht*. *HMD Praxis der Wirtschaftsinformatik*, 52 (5), 681-689.
- Industrial Internet Consortium, Fact Sheet*. Repéré à http://www.iiconsortium.org/docs/IIC_FACT_SHEET.pdf, 2013.
- Ivanov, D., Sokolov, B., & Ivanova, M. (2016). *Schedule coordination in cyber-physical supply networks* *Industry 4.0. IFAC-PapersOnLine*, 49 (12), 839-844.
- Jazdi, N. (2014, May). *Cyber physical systems in the context of Industry 4.0*. In *2014 IEEE international conference on automation, quality and testing, robotics* (pp. 1-4). IEEE.
- Jeschke, S., Brecher, C., Meisen, T., Özdemir, D., & Eschert, T. (2017). *Industrial internet of things and cyber manufacturing systems*. In *Industrial Internet of Things* (pp. 3-19). Springer, Cham.
- Joerres J, McAuliffe J, Beba U, Awad AB, Chorh-Chuan T, Condo A, et al. (2016). *The Future of Jobs - Employment, Skills and Workforce Strategy for the Fourth Industrial Revolution*.
- Kagermann H., Lukas W., and Wahlster W., (2011). *“Industrie 4.0: Mit dem Internet der Dinge auf dem Weg zur 4. industriellen Revolution “*, VDI nachrichten 13.
- Kagermann, H., Wahlster, W., & Helbig, J. (2013). *Securing the future of German manufacturing industry. Recommendations for implementing the strategic initiative Industrie 4.0*. Final report of the Industrie 4.0 Working Group. Frankfurt: Acatech-National Academy of Science and Engineering.
- Kagermann, H., Wahlster, W., & Helbig, J. (2013). *Recommendations for Implementing the Strategic Initiative INDUSTRIE 4.0*. Final Report of the Industrie 4.0 Working Group, Retrieved July 10, 2015, from http://www.acatech.de/fileadmin/user_upload/Baumstruktur_nach_Website/Acatech/root/de/Material_fuer_Sonderseiten/Industrie_4.0/Final_report__Industrie_4.0_accessible.pdf.
- Kagermann, H., Helbig, J., Hellinger, A., & Wahlster, W. (2013). *Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0: Securing the future of German manufacturing industry; final report of the Industrie 4.0 Working Group*. Forschungsunion.
- Kagermann, H., Helbig, J., Hellinger, A., & Wahlster, W. (2013). *Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0: Securing the future of German manufacturing industry; final report of the Industrie 4.0 Working Group*. Forschungsunion.
- Kagermann, H. (2015). *Change through digitization—Value creation in the age of Industry 4.0*. In *Management of permanent change* (pp. 23-45). Springer Gabler, Wiesbaden.
- Khan, M., Wu, X., Xu, X., & Dou, W. (2017, May). *Big data challenges and opportunities in the hype of Industry 4.0*. In *2017 IEEE International Conference on Communications (ICC)* (pp. 1-6). IEEE.

- Kelleher, C. et Wagener, T. (2011). *Ten guidelines for effective data visualization in scientific publications*. *Environmental Modeling & Software*, 26, 822-827.
- Kiel, D., Arnold, C., Collisi, M. A. T. T. H. I. A. S., & Voigt, K. I. (2016, May). *The impact of the industrial internet of things on established business models*. In Proceedings of the 25th international association for management of technology (IAMOT) conference (pp. 673-695).
- Kinzel, H. (2017). *Industry 4.0—Where does this leave the Human Factor?* *Journal of Urban Culture Research*, 15, 70-83.
- Koch, V., Kuge, S., Geissbauer, R., & Schrauf, S. (2014). *Industry 4.0: Opportunities and challenges of the industrial internet*. *Strategy & PwC* 13, 1-51.
- Kopetz, H. (2011). *Real-time systems: design principles for distributed embedded applications*. Springer Science & Business Media.
- Kovacs, G., & Kot, S. (2016). *New logistics and production trends as the effect of global economy changes*. *Polish Journal of Management Studies*, 14, 115–126.
- Kyriazis, D., & Varvarigou, T. (2013). *Smart, autonomous and reliable Internet of Things*. *Procedia Computer Science*, 21, 442-448.
- Landherr, M., Schneider, U., & Bauernhansl, T. (2016). *The Application Center Industrie 4.0-Industry-driven manufacturing, research and development*. *Procedia CIRP*, 57, 26-31.
- Lee, E. A. (2008, May). *Cyber physical systems: Design challenges*. In 2008 11th IEEE International Symposium on Object and Component-Oriented Real-Time Distributed Computing (ISORC) (pp. 363-369). IEEE.
- Lee, E. A. (2008, May). *Cyber physical systems: Design challenges*. In 2008 11th IEEE International Symposium on Object and Component-Oriented Real-Time Distributed Computing (ISORC) (pp. 363-369). IEEE.
- Lee, J., Bagheri, B., & Kao, H. A. (2015). *A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems*. University of Cincinnati, University Cooperative Research Center on Intelligent Maintenance Systems. *Manufacturing letters*, 3, 18-23.
- Lee, J., Bagheri, B., & Kao, H. A. (2015). *A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems*. *Manufacturing letters*, 3, 18-23.
- Les Affaires. (2017). *La quatrième révolution industrielle implique un changement de culture*. Repéré à https://www.lesaffaires.com/dossier/usine-40-un-virage-numerique-s-impose/la-quatrieme-revolution-industrielle-implique-un-changement-de-culture/597103?fbclid=IwAR2IU_dHeqYGjNe3hFj_SLEthZRWzeZ8uWH3xQDxKB5YpsBILd6SaL13o1M
- Les Affaires. (2017). *Un virage numérique s'impose*. Repéré à https://www.lesaffaires.com/dossier/usine-40-un-virage-numerique-s-impose/un-virage-numerique-s-impose/597102?fbclid=IwAR2Uaog_eVswepgoDrK1MVpa0fhbbRaay76wzy399a5cm2FgGOKZQDI_T0rQ
- Les Affaires. (2018). *Défis et enjeux de l'usine 4.0*. Repéré à <https://www.lesaffaires.com/dossier/usine-40-un-guide-pour-effectuer-le-virage/defis-et-enjeux-de-l-usine-40/601012>
- Les Affaires. (2019). *Fiez-vous aux entreprises phares*. Repéré à <https://www.lesaffaires.com/dossier/usine-40-comment-soutenir-vos-employes/fiez-vous-aux-entreprises-phares/612458>

- Les Affaires. (2019). *Le Québec doit passer en mode action*. Repéré à <https://www.lesaffaires.com/dossier/transformation-numerique-passer-en-mode-action/le-quebec-doit-passer-en-mode-action/609587?fbclid=IwAR0O3ndJlikAfqqsJ504qLfi2HbaH-Bsvbvomj1SYNbFcfUBoaqNyD2eGCM>
- Les Affaires. (2020). *L'automatisation des entreprises sera une priorité pour IQ*. Repéré à <https://www.lesaffaires.com/secteurs-d-activite/manufacturier/l-automatisation-des-entreprises-sera-une-priorite-pour-iq/615661>
- Li, G., Hou, Y., & Wu, A. (2017). *Fourth Industrial Revolution: technological drivers, impacts and coping methods*. Chinese Geographical Science, 27(4), 626-637.
- Lipson, J. (1991). The use of self in ethnographic research. Dans J.M. Morse (dir.). *Qualitative nursing research: A contemporary dialogue*. Newbury Park, CA: Sage Publications.
- Lodico, M.G., Spaulding, D.T. et Voegtle, K.H (2010). *Methods in educational research: from theory to practice* (2e éd.). San Francisco, CA: Jossey-Bass.
- Lucke, D., Constantinescu, C., & Westkämper, E. (2008). *Smart factory-a step towards the next generation of manufacturing*. In Manufacturing systems and technologies for the new frontier, the 41st CIRP conference on manufacturing systems, Tokyo (pp. 115-118). Springer, London.
- Lucke, D., Constantinescu, C., & Westkämper, E. (2008). *Smart factory-a step towards the next generation of manufacturing*. In *Manufacturing systems and technologies for the new frontier* (pp. 115-118). Springer, London.
- Magruk, A. (2016). *Uncertainty in the sphere of the Industry 4.0–potential areas to research*. *Business, Management and Education*, 14(2), 275-291.
- de Man, J. C., & Strandhagen, J. O. (2017). *An Industry 4.0 research agenda for sustainable business models*. *Procedia Cirp*, 63, 721-726.
- Manyika, J., Chui, M., Bughin, J., Dobbs, R., Bisson, P., & Marrs, A. (2013). *Disruptive technologies: Advances that will transform life, business, and the global economy* (Vol. 180, pp. 17-21). San Francisco, CA: McKinsey Global Institute.
- Maurand-Valet, A. (2010). *Choix Methodologiques En Sciences De Gestion : Pourquoi Tant De Chiffres ?* (No. Hal-00479481). Repéré à <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00479481/document>
- McEwen, M., et Wills, E. M. (2007). *Theoretical basis for nursing* (2e éd.). Philadelphie, PA: Lippincott Williams & Wilkins.
- Meleis, A. (2007). *Theoretical nursing: Development and progress* (4e éd.). Philadelphie, PA: Lippincott Williams & Wilkins.
- Mertens, D. M. (2005). *Research and evaluation in education and psychology: Integrative, diversity with quantitative, and mixed methods* (2e éd.). Thousand Oaks, CA: Sage Publications.
- Ministère de l'Économie et de l'Innovation. (2016a). *Industrie 4.0 : les défis de la quatrième révolution industrielle*. Repéré à <https://www.economie.gouv.qc.ca/bibliotheques/outils/gestion-dune-entreprise/industrie-40/industrie-40-les-defis-de-la-quatrieme-revolution-industrielle/>
- Ministère de l'Économie et de l'Innovation. (2016b). *Industrie 4.0 : origine et définition*. Repéré à <https://www.economie.gouv.qc.ca/bibliotheques/outils/gestion-dune-entreprise/industrie-40/feuille-de-route-industrie-40/1-industrie-40-origine-et-definition/>
- Monostori, L., Kádár, B., Bauernhansl, T., Kondoh, S., Kumara, S., Reinhart, G.,... & Ueda, K. (2016). *Cyber-physical systems in manufacturing*. *Cirp Annals*, 65(2), 621-641.

- Morgan, J. (2014). *The future of work: Attract new talent, build better leaders, and create a competitive organization*. John Wiley & Sons.
- Morse, J.M. (dir.) (1991). *Qualitative nursing research: A contemporary dialogue*. Newbury Park, CA: Sage Publications.
- Müller, J. M., Buliga, O., & Voigt, K. I. (2018). *Fortune favors the prepared: How SMEs approach business model innovations in Industry 4.0. Technological Forecasting and Social Change*, 132, 2-17.
- Nicholas, J. M., & Steyn, H. (2008). *Project management for business, engineering, and technology: Principles and practice*. Elsevier.
- Neugebauer, R., Hippmann, S., Leis, M., & Landherr, M. (2016). *Industrie 4.0-From the Perspective of Applied Research*. *Procedia CIRP*, 100(57), 2-7.
- Neugebauer, R., Hippmann, S., Leis, M., & Landherr, M. (2016). *Industrie 4.0-From the perspective of applied research*, 49th CIRP conference on Manufacturing systems (CIRP-CMS 2016), 2-7.
- Nolin, J., & Olson, N. (2016). *The internet of things and convenience*. *Internet Research*, 26(2), 360-376.
- Normand, F. (2018). *Conférence de Montréal : les obstacles à l'usine intelligente*. Repéré à <https://nouveau.eureka.cc/Link/uqar1/news%c2%b720180613%c2%b7ZW%c2%b7059>
- O'Shaughnessy, W. (1992). *La faisabilité de projet : une démarche vers l'efficience et l'efficacité*. Éditions SMG.
- O'Shaughnessy, W. (2006). *La conception et l'évaluation de projet*. Tome 2. Collection le Management de Projet. Les Éditions SMG.
- Oesterreich, T. D., & Teuteberg, F. (2016). *Understanding the implications of digitisation and automation in the context of Industry 4.0: A triangulation approach and elements of a research agenda for the construction industry*. *Computers in industry*, 83, 121-139.
- Oulad Heddar, Aïda (2011). [Les facteurs de réussite d'une étude de faisabilité : une étude exploratoire](#). Mémoire. Rimouski, Québec, Université du Québec à Rimouski, Unité départementale des sciences de la gestion du campus de Rimouski, 123 p.
- Pan, M., Sikorski, J., Kastner, C. A., Akroyd, J., Mosbach, S., Lau, R., & Kraft, M. (2015). *Applying industry 4.0 to the Jurong Island eco-industrial park*. *Energy Procedia*, 75, 1536-1541.
- Parvin, S., Hussain, F. K., Hussain, O. K., Thein, T., & Park, J. S. (2013). *Multi-cyber framework for availability enhancement of cyber physical systems*. *Computing*, 95 (10-11), 927-948.
- Patton, M.Q. (2002) *Qualitative Research and Evaluation Methods*, 3e Edition, Newbury Park: Sage.
- Pereira, A. C., & Romero, F. (2017). *A review of the meanings and the implications of the Industry 4.0 concept*. *Procedia Manufacturing*, 13, 1206-1214.
- Piccarozzi, M., Aquilani, B., & Gatti, C. (2018). *Industry 4.0 in Management Studies: A Systematic Literature Review*. *Sustainability*, 10(10), 3821.
- Pompa, C. (2015). *Jobs for the Future*. London: Overseas Development Institute.
- Porter, M. E., & Heppelmann, J. E. (2014). *How smart, connected products are transforming competition*. *Harvard business review*, 92(11), 64-88.
- Porter, M. E., & Heppelmann, J. E. (2015). *How smart, connected products are transforming companies*. *Harvard business review*, 93(10), 96-114.

- Posada, J., Toro, C., Barandiaran, I., Oyarzun, D., Stricker, D., de Amicis, R.,... & Vallarino, I. (2015). *Visual computing as a key enabling technology for Industrie 4.0 and industrial internet*. *IEEE computer graphics and applications*, 35 (2), 26-40.
- Prause, G., & Atari, S. (2017). *On sustainable production networks for Industry 4.0*. *Entrepreneurship and Sustainability Issues*, 4 (4), 421-431.
- Preuveneers, D., & Ilie-Zudor, E. (2017). *The intelligent industry of the future: A survey on emerging trends, research challenges and opportunities in Industry 4.0*. *Journal of Ambient Intelligence and Smart Environments*, 9(3), 287-298.
- Proulx, J. (2019). Recherches qualitatives et validités scientifiques. *Recherches qualitatives*, 38(1), 53-70. Repéré à <https://www.erudit.org/en/journals/rechqual/1900-v1-n1-rechqual04566/1059647ar.pdf>
- Qin, J., Liu, Y., & Grosvenor, R. (2016). *A categorical framework of manufacturing for industry 4.0 and beyond*. *Procedia Cirp*, 52, 173-178.
- Qin, J., Liu, Y., & Grosvenor, R. (2016). *A categorical framework of manufacturing for industry 4.0 and beyond*. *Procedia Cirp*, 52, 173-178.
- Rajkumar, R. R., Lee, I., Sha, L., & Stankovic, J. (2010). *In Proceedings of the 47th Design Automation Conference (DAC '10)*. ACM, New York, 731-736.
- Roblek, V., Meško, M., & Krapež, A. (2016). *A complex view of industry 4.0*. *Sage Open*, 6(2), 2 158 244 016 653 987.
- Rüßmann, M., Lorenz, M., Gerbert, P., Waldner, M., Justus, J., Engel, P., & Harnisch, M. (2015). *Industry 4.0: The future of productivity and growth in manufacturing industries*. Boston Consulting Group, 9(1), 54-89.
- Salkin, C., Oner, M., Ustundag, A., & Cevikcan, E. (2018). A conceptual framework for Industry 4.0. In *Industry 4.0: Managing the Digital Transformation* (pp. 3-23). Springer, Cham.
- Sandelowski, M. (2000). *Whatever happened to qualitative description?* *Research in nursing & health*, 23(4), 334-340.
- Sanders, A., Elangeswaran, C., & Wulfsberg, J. P. (2016). Industry 4.0 implies lean manufacturing: Research activities in industry 4.0 function as enablers for lean manufacturing. *Journal of Industrial Engineering and Management (JIEM)*, 9(3), 811-833.
- Saver, C. (2006). *Tables and figures: Adding vitality to your article*. *AORN Journal*, 84(6), 945-950.
- Savoie-Zajc, L. (2009). *L'entrevue semi-dirigée*. Dans B. Gauthier (dir.). *Recherche sociale : de la problématique à la collecte des données* (5e éd.) (p.337-360). Québec, Québec : Presses de l'Université du Québec.
- Shahd M, Hampe K. (2015). *Industrie 4.0 erstmals unter den Top-Themen des Jahres*. <https://www.bitkom.org/Presse/Presseinformation/Industrie-40-erstmals-unter-den-Top-Themen-des-Jahres.html>. Accessed 16 Dec 2015.
- Shariat Zadeh, N., Lundholm, T., Lindberg, L., & Franzén Sivard, G. (2016). *Integration of digital factory with smart factory based on Internet of Things*. In 26th CIRP Design Conference, 2016, KTH Royal Institute of Technology Stockholm, Sweden, 15 June 2016 through 17 June 2016 (Vol. 50, pp. 512-517). Elsevier.
- Sanders, A., Elangeswaran, C., & Wulfsberg, J. P. (2016). *Industry 4.0 implies lean manufacturing: Research activities in industry 4.0 function as enablers for lean manufacturing*. *Journal of Industrial Engineering and Management (JIEM)*, 9(3), 811-833.

- Schlechtendahl, J., Keinert, M., Kretschmer, F., Lechler, A., & Verl, A. (2015). *Making existing production systems Industry 4.0-ready*. *Production Engineering*, 9 (1), 143-148.
- Schmidt, R., Möhring, M., Härting, R. C., Reichstein, C., Neumaier, P., & Jozinović, P. (2015, June). *Industry 4.0-potentials for creating smart products: empirical research results*. In *International Conference on Business Information Systems* (pp. 16-27). Springer, Cham.
- Schneider, P. (2018). *Managerial challenges of Industry 4.0: an empirically backed research agenda for a nascent field*. *Review of Managerial Science*, 12(3), 803-848.
- Schumacher, A., Erol, S., & Sihm, W. (2016). *A maturity model for assessing Industry 4.0 readiness and maturity of manufacturing enterprises*. *Procedia Cirp*, 52, 161-166.
- Schumacher, A., Erol, S., & Sihm, W. (2016). *A maturity model for assessing Industry 4.0 readiness and maturity of manufacturing enterprises*. *Procedia Cirp*, 52, 161-166.
- Stock, T., & Seliger, G. (2016). *Opportunities of sustainable manufacturing in industry 4.0*. *Procedia Cirp*, 40, 536-541.
- Stock-Homburg, R. (2013). *Zukunft der Arbeitswelt 2030 als Herausforderung des Personalmanagements*. In *Handbuch Strategisches Personalmanagement* (pp. 603-629). Springer Gabler, Wiesbaden.
- SPD. (2015). *-Bundestagsfraktion. Industrie 4.0 gestalten – Technische Innovationen, ökonomisches Potenzial, sozialer Fortschritt. Positionen*.
- Störmer, E., Patscha, C., Prendergast, J., Daheim, C., Rhisiart, M., Glover, P., & Beck, H. (2014). *The future of work: jobs and skills in 2030*.
- Sung, T. K. (2018). *Industry 4.0: a Korea perspective*. *Technological Forecasting and Social Change*, 132, 40-45.
- Tan, Y., Goddard, S., & Pérez, L. C. (2008). *A prototype architecture for cyber-physical systems*. *ACM Sigbed Review*, 5(1), 26.
- Ten Hompel, M., Anderl, R., Gausemeier, J., Meinel, C., Schildhauer, T., & Beck, M. (2016). *Kompetenzentwicklungsstudie Industrie 4.0-Erste Ergebnisse und Schlussfolgerungen*.
- Thiéart, R.-A. et al. (2014). *Méthodes de recherche en management-4ème édition*. Dunod. 648 p.
- Thoben, K. D., Wiesner, S., & Wuest, T. (2017). *“Industrie 4.0” and smart manufacturing-a review of research issues and application examples*. *International journal of automation technology*, 11(1), 4-16.
- Valdeza, A. C., Braunera, P., Schaara, A. K., Holzingerb, A., & Zieflea, M. (2015, August). *Reducing complexity with simplicity-usability methods for industry 4.0*. In *Proceedings 19th triennial congress of the IEA* (Vol. 9, p. 14).
- Vaidya, S., Ambad, P., Bhosle, S., (2018). *Industry 4.0 – A Glimpse*. *Procedia Manufacturing* 20, 233–238
- Varghese, A., & Tandur, D. (2014, November). *Wireless requirements and challenges in Industry 4.0*. In *2014 International Conference on Contemporary Computing and Informatics (IC3I)* (pp. 634-638). IEEE.
- Vierra, A., Pollock, J. et Golez, F. (1998). *Reading educational research* (3^e éd.). Upper Saddle, NJ: Pearson/Prentice Hall.
- Von, T. N. (2003). *Struct. Chang. Econ. Dyn.* 14 (4) 365–384.
- von Solga, M., Ryschka, J., & Mattenklott, A. (2011). *Personalentwicklung: Gegenstand, Prozessmodell, Erfolgsfaktoren*. In *Praxishandbuch Personalentwicklung* (pp. 19-34). Gabler.

- Wahlster, W., Grallert, H. J., Wess, S., Friedrich, H., & Widenka, T. (Eds.). (2014). *Towards the internet of services: The THESEUS research program*. Springer.
- Waibel, M. W., Steenkamp, L. P., Moloko, N., & Oosthuizen, G. A. (2017). *Investigating the effects of smart production systems on sustainability elements*. *Procedia Manufacturing*, 8, 731-737.
- Weyer, S., Schmitt, M., Ohmer, M., & Gorecky, D. (2015). Towards Industry 4.0-Standardization as the crucial challenge for highly modular, multi-vendor production systems. *Ifac-Papersonline*, 48(3), 579-584.
- Whysall, Z., Owtram, M., & Brittain, S. (2019). The new talent management challenges of Industry 4.0. *Journal of Management Development*, 38(2), 118-129.
- Witkowski, K. (2017). *Internet of things, big data, industry 4.0—innovative solutions in logistics and supply chains management*. *Procedia Engineering*, 182, 763-769.
- Wolter, M. I., Mönnig, A., Hummel, M., Schneemann, C., Weber, E., Zika, G., ... & Neuber-Pohl, C. (2015). *Industrie 4.0 und die Folgen für Arbeitsmarkt und Wirtschaft*. IAB Forschungsbericht 8/2015. *Institut für Arbeitsmarkt-und Berufsforschung*.
- Xia, F., Yang, L. T., Wang, L., & Vinel, A. (2012). *Internet of things*. *International journal of communication systems*, 25(9), 1101-1102.
- Da Xu, L., He, W., & Li, S. (2014). *Internet of things in industries: A survey*. *IEEE Transactions on industrial informatics*, 10(4), 2233-2243.
- Zezulka, F., Marcon, P., Vesely, I., & Sajdl, O. (2016). *Industry 4.0—An Introduction in the phenomenon*. *IFAC-PapersOnLine*, 49 (25), 8-12.
- Zezulka, F., Marcon, P., Vesely, I., & Sajdl, O. (2016). *Industry 4.0—An Introduction in the phenomenon*. *IFAC-PapersOnLine*, 49 (25), 8-12.
- Zhou, K., Liu, T., & Zhou, L. (2015, August). *Industry 4.0: Towards future industrial opportunities and challenges*. In *2015 12th International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD)* (pp. 2147-2152). IEEE.
- Zhou, K., Liu, T. and Zhou, L. (2016). "Industry 4.0: Towards Future Industrial Opportunities and Challenges," in *International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery*, pp. 2147–2152.
- Zuehlke, D. (2010). SmartFactory—Towards a factory-of-things. *Annual reviews in control*, 34(1), 129-138.

ANNEXE 1 : DEFINITIONS DU SYSTEME CYBER-PHYSIQUE (TRADUCTION LIBRE)

Auteurs	Définition
Lee, 2008	Les systèmes cyber-physiques sont des intégrations de calcul avec des processus physiques. Les ordinateurs et les réseaux intégrés surveillent et contrôlent les processus physiques, généralement avec des boucles de rétroaction dans lesquelles les processus physiques affectent les calculs et inversement (p. 1).
Rajkumar <i>et al.</i> , 2010	Les systèmes cyber-physiques (CPS) sont des systèmes physiques et techniques, dont les opérations peuvent être surveillées, coordonnées, contrôlées et intégrées par un système informatique et de communication. CPS implique l'interaction avec le monde physique et est composé d'un ensemble d'agents en réseau.
Kagermann <i>et al.</i> , 2013	Les systèmes cyber-physiques sont des mécanismes capables d'échanger des informations de manière autonome, de déclencher des actions et de se contrôler mutuellement.
Bauernhansl, 2014	Le CPS se caractérise par un développement en trois phases. La première génération de CPS comprend des technologies d'identification telles que les étiquettes d'identification par radiofréquence (RFID), qui permettent une identification unique. Le stockage et l'analyse doivent être fournis sous forme de service centralisé. La deuxième génération de CPS est équipée de capteurs et d'actionneurs offrant une gamme de fonctions limitée. Les CPS de la troisième génération peuvent stocker et analyser des données, sont équipés de multiples capteurs et actionneurs et sont compatibles avec les réseaux.
Lee, 2014	Le CPS dans le contexte de la fabrication, signifie que les informations relatives à l'atelier physique et à l'espace de calcul virtuel sont hautement synchronisées.
Lee <i>et al.</i> , 2015	Les systèmes cyber-physiques sont des technologies de transformation pour la gestion de systèmes interconnectés entre ses actifs physiques et ses capacités de calcul (page 18).
Bagheri <i>et al.</i> , 2015	Le terme CPS a été défini comme les systèmes dans lesquels les systèmes naturels et créés par l'homme (espace physique) sont étroitement intégrés aux systèmes de calcul, de communication et de contrôle (cyber espace).
Shafiq <i>et al.</i> , 2015	Le CPS est une convergence des mondes physique et numérique en établissant des réseaux mondiaux d'entreprise intégrant leurs machines, leurs systèmes d'entreposage et leurs installations de production (p. 1149).
Hermann <i>et al.</i> , 2016	Le CPS surveille les processus physiques, crée une copie virtuelle du monde physique et prend des décisions décentralisées.
Monostori <i>et al.</i> , 2016	Les CPS sont des systèmes d'entités informatiques collaborants étroitement en relation avec le monde physique environnant et ses processus en cours, fournissant et utilisant simultanément des services d'accès et de traitement de données disponibles sur Internet (p. 621).

Francalanza, 2017	Les CPS, qui sont spécifiquement des systèmes de production cyber-physiques (CPPS) appliqués à la production, joueront un rôle important, car ces systèmes consistent en la connexion entre tous les niveaux de production entre des éléments autonomes et coopératifs (par exemple, les machines intelligentes) et des sous-systèmes (par exemple, des usines intelligentes).
-------------------	--

ANNEXE 2 : DEFINITIONS DE L'INTERNET DES OBJETS (IDO) (TRADUCTION LIBRE)

Auteurs	Définition
Haller <i>et al.</i> , 2008	L'Internet des objets est un monde où les objets physiques sont intégrés de manière transparente dans le réseau d'information et où les objets physiques peuvent devenir des participants actifs dans les processus métier. Les services sont disponibles pour interagir avec ces objets intelligents sur Internet, interroger leur état et toutes les informations qui leur sont associés, en tenant compte des questions de sécurité et de confidentialité.
Guisto <i>et al.</i> , 2010	L'IdO permet à des « objets », tels que RFID, capteurs, actionneurs, téléphones mobiles, qui, grâce à des schémas d'adressage uniques (...) interagissent les uns avec les autres et coopèrent avec leurs composants « intelligents » voisins pour atteindre des objectifs communs buts.
Fleisch, 2010	L'IdO en tant que monde où pratiquement toutes les choses (physiques) peuvent se transformer en « choses intelligentes » en proposant de petits ordinateurs connectés à Internet.
Atzori <i>et al.</i> , 2010	L'Internet des objets « est un nouveau paradigme qui gagne rapidement du terrain dans le scénario des télécommunications sans fil modernes. L'idée de base de ce concept est la présence omniprésente autour de nous d'une variété d'objets ou d'objets, tels que des étiquettes d'identification par radiofréquence (RFID), des capteurs, des actionneurs, des téléphones portables, etc., qui permettent interagir et coopérer avec leurs voisins pour atteindre des objectifs communs » (p. 2787).
Xia <i>et al.</i> , 2012	L'IdO se réfère à un monde inter-réseaux dans lequel divers objets sont intégrés à des capteurs électroniques, des actionneurs ou d'autres appareils numériques afin qu'ils puissent être mis en réseau et connectés pour la collecte et l'échange de données.
Chase, 2013	L'IdO crée une structure de réseau intelligente et invisible qui peut être détectée, contrôlée et programmée. Les produits compatibles IdO utilisent une technologie intégrée qui leur permet de communiquer, directement ou indirectement, entre eux ou avec Internet (p. 1).
Kagermann <i>et al.</i> , 2013	L'Internet des objets est une manifestation qui permet aux (robots et machines) et aux (téléphones intelligents, ordinateurs portables et tablettes) d'interagir et de coopérer en partageant des informations afin d'atteindre des objectifs communs.
Xu <i>et al.</i> , 2014	L'IdO est maintenant considéré comme une convergence plus large de technologies de pointe telles que les normes sans fil omniprésentes, l'analyse de données et l'apprentissage automatique.
Borgia, 2014	L'objet intelligent est à la base d'une vision de l'IdO, car ce nouveau paradigme consiste à doter les objets du quotidien d'intelligence, leur permettant non seulement de collecter des informations, mais interagir avec

	leur environnement, mais aussi être interconnectés avec d'autres objets, échanger des données et déclencher des actions à travers Internet.
Porter et Heppelmann, 2014	L'Internet des objets désigne les produits connectés et intelligents offrant des opportunités en croissance exponentielle pour de nouvelles fonctionnalités, une fiabilité bien supérieure, une utilisation beaucoup plus élevée des produits et des fonctionnalités qui transcendent les frontières des produits traditionnels (p. 4).
Hozdić, 2015	L'Internet des objets désigne un réseau mondial d'objets adressés, interconnectés et uniformes, qui communiquent via des protocoles standard.
Shariatzadeh <i>et al.</i> , 2016	L'IdO peut être défini comme la connexion Internet entre des objets physiques quotidiens dans l'atelier, des personnes, des systèmes et des systèmes informatiques, créant ainsi un environnement de fabrication intelligent souvent appelé usine intelligente.
Nolin et Olson, 2016	L'IdO « semble envisager une société dans laquelle tous les membres ont accès à un environnement Internet à part entière, peuplé de technologies intelligentes auto-configurables, auto-gérées, partout et à tout moment » (p. 361).
Neugebauer <i>et al.</i> , 2016 ;	L'Internet des objets (IdO) devrait également être appelé Internet de tout (IoE), composé d'Internet de service (IoS), d'Internet des services de fabrication (IoM), d'Internet des personnes (IoP), d'un système embarqué et de l'Intégration de l'information et de la communication technologie (IICT).
Kiel <i>et al.</i> , 2016	L'Internet des objets industriel, fait référence à l'intégration des technologies de l'Internet des objets création de valeur permettant aux fabricants d'exploiter des chaînes de valeur entièrement numérisées, connectées, intelligentes et décentralisées. (p. 2)
Hermann <i>et al.</i> , 2016	L'Internet des objets peut être défini comme un réseau dans lequel les CPS coopèrent les uns avec les autres via des schémas d'adressage uniques. (p. 9)
Atzori <i>et al.</i> , 2017	L'IdO est « un cadre conceptuel qui tire parti de la disponibilité de dispositifs et de solutions d'interconnexion hétérogènes, ainsi que d'objets physiques augmentés fournissant une base d'informations partagée à l'échelle mondiale, afin de soutenir la conception d'applications impliquant au même niveau virtuel objets ». (p. 137)

ANNEXE 3 : DEFINITIONS L'INTERNET DES SERVICES (IOS) (TRADUCTION LIBRE)

Auteurs	Définition
Cardoso <i>et al.</i> , 2008 ; Schmidt <i>et al.</i> , 2015	L'IOS peut être décrit comme un nouveau modèle commercial qui modifiera profondément la manière dont les services sont fournis, permettant une création de valeur plus élevée résultant de la relation entre tous les acteurs de la chaîne de valeur, tels que l'organisation, les clients, les intermédiaires, les agrégateurs et les fournisseurs.
Terzidis <i>et al.</i> , 2012	L'IOS utilise Internet pour de nouveaux modes de création de valeur dans le secteur des services.
Barros et Oberle, 2012	L'Internet des services est une transaction commerciale dans laquelle une partie accorde un accès temporaire aux ressources d'une autre partie afin d'exercer une fonction prescrite et un avantage associé. Les ressources peuvent être la main-d'œuvre et les compétences humaines, les systèmes techniques, les informations, les consommables, la terre et autres (p. 6).
Wahlster <i>et al.</i> , 2014	L'IOS émerge, en se basant sur l'idée que les services sont facilement accessibles via les technologies Web, permettant aux entreprises et aux utilisateurs privés de combiner, créer et proposer un nouveau type de services à valeur ajoutée.
Plass, 2015	L'IOS est le développement de la mise en réseau et de la communication au sein de l'IdO, qui produit ensuite de grandes quantités de données connues sous le nom de données volumineuses (<i>big data</i>) et est accessible via le <i>cloud</i> .

ANNEXE 4 : DEFINITIONS DE L'USINE INTELLIGENTE (TRADUCTION LIBRE)

Auteurs	Définition
Lucke, 2008	L'usine intelligente est définie comme une usine qui aide les personnes et les machines à exécuter leurs tâches en fonction du contexte.
Nasser, 2009	L'usine intelligente signifie réseau intelligent, mobilité, flexibilité des opérations industrielles et leur interopérabilité, intégration avec les clients et les fournisseurs et adoption de modèles commerciaux innovants.
Kagermann <i>et al.</i> , 2013	L'usine intelligente favorise une communication des systèmes cyber-physiques via l'Internet des objets et l'Internet des services car il repose sur l'idée d'un système de production décentralisé, dans lequel « les êtres humains, les machines et les ressources communiquent entre eux aussi naturellement que dans un réseau social » (p. 19).
Weyer <i>et al.</i> , 2015 ;	Les usines intelligentes visent à relever et à surmonter les défis actuels des cycles de vie des produits plus courts aux produits hautement personnalisés et à la forte concurrence mondiale » (p. 579).
Qin <i>et al.</i> , 2016	L'usine intelligent consiste en une nouvelle intercommunication en temps réel intégratif entre chaque ressource de fabrication (capteurs, actionneurs, convoyeurs, machines, robots, etc.)
Pereira et Romero, 2017	Les usines intelligentes sont organisées en une structure modulaire, dont les processus sont contrôlés et surveillés par CPS.
Preuveneers <i>et al.</i> , 2017	Les usines intelligentes constituent des révolutions technologiques qui transformeront les processus de production et de logistique en environnements d'usine intelligents qui augmenteront la productivité et l'efficacité. (p. 2)

ANNEXE 5 : GUIDE D'ENTREVUE POUR LES ENTREPRISES AYANT ADOPTÉ L'INDUSTRIE 4.0

Introduction

Tout d'abord, je vous remercie M. ou Mme.....

Dans cette entrevue, nous allons aborder **6 sections** pour une durée approximative de 60 à 90 minutes. Avant de commencer, je souhaite savoir si vous avez des questions.

Si vous voulez bien, nous allons commencer par la première section que nous avons nommée, section d'identification.

Section 1 « Identification » (5 minutes)

1. Pourriez-vous me décrire brièvement votre entreprise (ex. : secteur d'activités, nombre d'employés, produits/services vendus) ?

Maintenant, nous allons passer à la section deux relative à l'implantation de l'Industrie 4.0.

Section 2 « Composantes de l'Industrie 4.0 et raisons de son implantation » (5 minutes)

2. Au cours des dernières années, on parle beaucoup de nouvelles technologies spécifiquement, l'Industrie 4.0 ou de ses composantes : l'usine intelligente, les systèmes cyber-physiques, l'Internet des objets ou des objets connectés, et l'Internet des services ou les services basés sur l'Internet les objets. Quels types de composantes avez-vous implantés et pourquoi ?
3. Selon vous, quelles sont les raisons qui peuvent expliquer l'implantation de l'Industrie 4.0 ou de l'une ses composantes dans une entreprise comme la vôtre ?
4. Selon vous, quel était le rôle des programmes gouvernementaux dans l'adoption de l'Industrie 4.0 dans votre entreprise ? Pourquoi ?

Maintenant, nous allons passer à la troisième section que nous avons nommée opportunités, défis, leviers, barrières, risques de l'Industrie 4.0.

Section 3 « Opportunités, défis, leviers, barrières, risques de l'Industrie 4.0 » (10 minutes)

5. Pour une entreprise dans votre secteur, quels sont les défis et les barrières de l'implantation de l'Industrie 4.0 ou l'une de ses composantes ? Pourquoi ?
6. Pour une entreprise dans votre secteur, quels sont les opportunités et les bénéfices de l'implantation de l'Industrie 4.0 ou l'une de ses composantes ? Pourquoi ?

7. Pour une entreprise dans votre secteur, quels sont les risques suite à l'implantation de l'Industrie 4.0 ou l'une de ses composantes ? Pourquoi ?
8. Selon vous quels sont les prérequis nécessaires pour la réussite de l'implantation de l'Industrie 4.0 ou de l'une de ses composantes ?

Maintenant, nous allons passer à la quatrième section que nous avons nommée développement des compétences.

Section 4 « Développement des compétences » (10 minutes)

Dans cette section, nous allons aborder la relation entre l'implantation de l'Industrie 4.0 et le développement de compétence. La compétence englobe la compétence technique, la compétence méthodologique, la compétence sociale et la compétence personnelle.

9. Selon vous, quelles sont les compétences individuelles que les employés et les cadres supérieurs doivent avoir pour l'implantation de l'Industrie 4.0 ou de l'une de ses composantes dans une entreprise comme la vôtre ?
10. Selon vous, quels sont les effets positifs de l'implantation de l'Industrie 4.0 ou de l'une de ses composantes sur les compétences individuelles des employés et des cadres supérieurs dans une entreprise comme la vôtre ?
11. Selon vous, quels sont les effets négatifs de l'implantation de l'Industrie 4.0 ou de l'une de ses composantes sur les compétences individuelles des employés et des cadres supérieurs dans une entreprise comme la vôtre ?

Maintenant, nous allons passer à la cinquième section que nous avons nommée environnement de travail.

Section 5 « Environnement de travail » (10 minutes)

Dans cette section, nous allons aborder la relation entre l'implantation de l'Industrie 4.0 et l'environnement de travail. L'environnement de travail désigne le milieu de travail dans lequel évoluent les employés et les cadres, le rapport de travail homme-machine et le rapport de travail homme-homme.

12. Selon vous, quel environnement de travail doit-on avoir pour l'implantation de l'Industrie 4.0 ou de l'une de ses composantes dans une entreprise comme la vôtre ?
13. Selon vous, quels sont les effets positifs de l'implantation de l'Industrie 4.0 ou de l'une de ses composantes sur l'environnement de travail dans une entreprise comme la vôtre ?
14. Selon vous, quels sont les effets négatifs de l'implantation de l'Industrie 4.0 ou de l'une de ses composantes sur l'environnement de travail dans une entreprise comme la vôtre ?

Maintenant, nous allons passer à la sixième section que nous avons nommée gouvernance.

Section 6 « Gouvernance » (10 minutes)

Dans cette section, nous allons aborder la relation entre l'implantation de l'Industrie 4.0 et la gouvernance. La gouvernance fait référence à l'aspect organisationnel, l'aspect managérial, la planification, la stratégie, l'analyse, la mise en œuvre, le changement, le leadership, les ressources humaines et la culture.

15. Pour adopter et réussir l'implantation de l'Industrie 4.0 ou de l'une de ses composantes dans une entreprise comme la vôtre, quelle planification stratégique la haute direction doit-elle avoir ? Dans votre cas, votre planification stratégique était-elle adéquate ou avez-vous eu à faire des changements ? Dites-nous-en un peu plus ?
16. Pour adopter et réussir l'implantation de l'Industrie 4.0 ou de l'une de ses composantes dans une entreprise comme la vôtre, quel mode de gestion la haute direction doit-elle avoir ? Dans votre cas, votre mode de gestion était-il adéquat ou avez-vous eu à faire des changements ? Dites-nous-en un peu plus ?
17. Pour adopter et réussir l'implantation de l'Industrie 4.0 ou de l'une de ses composantes dans une entreprise comme la vôtre, quelle culture d'entreprise la haute direction doit-elle avoir ? Dans votre cas, votre culture d'entreprise était-elle adéquate ou avez-vous eu à faire des changements ? Dites-nous-en un peu plus ?
18. Pour adopter et réussir l'implantation de l'Industrie 4.0 ou de l'une de ses composantes dans une entreprise comme la vôtre, quel style de leadership la haute direction doit-elle avoir ? Dans votre cas, votre style de leadership était-il adéquat ou avez-vous eu à faire des changements ? Dites-nous-en un peu plus ?
19. Pour adopter et réussir l'implantation de l'Industrie 4.0 ou de l'une de ses composantes dans une entreprise comme la vôtre, quel modèle d'affaires la haute direction doit-elle avoir ? Dans votre cas, votre modèle d'affaires était-il adéquat ou avez-vous eu à faire des changements ? Dites-nous-en un peu plus ?

Conclusion et remerciements (5 minutes)

Nous sommes rendus à la fin de cette discussion, avant de conclure, je souhaite savoir s'il y a quelque chose qui a été oublié. Est-ce que vous souhaitez apporter une précision ou ajouter autre chose ?

En mon nom et au nom de l'équipe de recherche, nous souhaitons vivement vous remercier pour la qualité de votre participation. Une fois les analyses complétées, les résultats vous seront présentés.

ANNEXE 6 : GUIDE D'ENTREVUE POUR LES ENTREPRISES N'AYANT PAS ADOPTÉ L'INDUSTRIE 4.0

Introduction

Tout d'abord, je vous remercie M. ou Mme.....

Dans cette entrevue, nous allons aborder **6 sections** pour une durée approximative de 60 à 90 minutes. Avant de commencer, je souhaite savoir si vous avez des questions.

Si vous voulez bien, nous allons commencer par la première section que nous avons nommée, section d'identification.

Section 1 « Identification » (5 minutes)

1. Pourriez-vous me décrire brièvement votre entreprise (ex. : secteur d'activités, nombre d'employés, produits/services vendus) ?

Maintenant, nous allons passer à la section deux relative à l'implantation de l'Industrie 4.0.

Section 2 « Composantes de l'Industrie 4.0 et raisons de son implantation » (5 minutes)

2. Avez-vous implanté des changements technologiques durant les dernières années ? Si oui, lesquels et pourquoi ? Sinon pourquoi ?
3. Au cours des dernières années, on parle beaucoup de nouvelles technologies spécifiquement, l'Industrie 4.0 ou de ses composantes : l'usine intelligente, les systèmes cyber-physiques, l'Internet des objets ou des objets connectés, et l'Internet des services ou les services basés sur l'Internet les objets. Avez-vous pensé à implanter l'une de ces technologies ? Si oui, lesquelles et pourquoi ? Sinon pourquoi ?
4. Selon vous, quelles raisons peuvent expliquer la non-implantation de l'Industrie 4.0 ou l'une de ses composantes dans une entreprise comme la vôtre ?
5. Selon vous, quel est le rôle des programmes gouvernementaux dans l'adoption de l'Industrie 4.0 ou l'une de ses composantes pour les entreprises ? Pourquoi ?

Maintenant, nous allons passer à la troisième section que nous avons nommée opportunités, défis, leviers, barrières, risques de l'Industrie 4.0

Section 3 « Opportunités, défis, leviers, barrières, risques de l'Industrie 4.0 » (10 minutes)

6. Pour une entreprise dans votre secteur, quels pourraient être les défis et les barrières de l'implantation de l'Industrie 4.0 ou de l'une de ses composantes ? Pourquoi ?
7. Pour une entreprise dans votre secteur, quels pourraient être les opportunités et les bénéfices de l'implantation de l'Industrie 4.0 ou l'une de ses composantes ? Pourquoi ?
8. Pour une entreprise dans votre secteur, quels pourraient être les risques probables suite à l'implantation de l'Industrie 4.0 ou l'une de ses composantes ? Pourquoi ?
9. Selon vous, quels pourraient être les prérequis nécessaires pour la réussite de l'implantation de l'Industrie 4.0 ou de l'une de ses composantes ?

Maintenant, nous allons passer à la quatrième section que nous avons nommée développement des compétences.

Section 4 « Développement des compétences » (10 minutes)

Dans cette section, nous allons aborder la relation entre l'implantation de l'Industrie 4.0 et le développement de compétence. La compétence englobe la compétence technique, la compétence méthodologique, la compétence sociale et la compétence personnelle.

10. Selon vous, quelles pourraient être les compétences individuelles que les employés et les cadres supérieurs devraient avoir pour l'implantation de l'Industrie 4.0 ou de l'une de ses composantes dans une entreprise comme la vôtre ?
11. Selon vous, quels pourraient être les effets positifs de l'implantation de l'Industrie 4.0 ou de l'une de ses composantes sur les compétences individuelles des employés et des cadres supérieurs dans une entreprise comme la vôtre ?
12. Selon vous, quels pourraient être les effets négatifs de l'implantation de l'Industrie 4.0 ou de l'une de ses composantes sur les compétences individuelles des employés et des cadres supérieurs dans une entreprise comme la vôtre ?

Maintenant, nous allons passer à la cinquième section que nous avons nommée environnement de travail.

Section 5 « Environnement de travail » (10 minutes)

Dans cette section, nous allons aborder la relation entre l'implantation de l'Industrie 4.0 et l'environnement de travail. L'environnement de travail désigne le milieu de travail dans lequel évoluent les employés et les cadres, le rapport de travail homme-machine, le rapport de travail homme-homme.

13. Selon vous, quel environnement de travail devrait-on avoir pour l'implantation de l'Industrie 4.0 ou de l'une de ses composantes dans une entreprise comme la vôtre ?

14. Selon vous, quels pourraient être les effets positifs de l'Industrie 4.0 ou de l'une de ses composantes sur l'environnement de travail dans une entreprise comme la vôtre ?
15. Selon vous, quels pourraient être les effets négatifs de l'implantation de l'Industrie 4.0 ou de l'une de ses composantes sur l'environnement de travail dans une entreprise comme la vôtre ?

Maintenant, nous allons passer à la sixième section que nous avons nommée gouvernance.

Section 6 « Gouvernance » (10 minutes)

Dans cette section, nous allons aborder la relation entre l'implantation de l'Industrie 4.0 et la gouvernance. La gouvernance fait référence à l'aspect organisationnel, l'aspect managérial, la planification, la stratégie, l'analyse, la mise en œuvre, le changement, le leadership, les ressources humaines et la culture.

16. Pour adopter et réussir l'implantation de l'Industrie 4.0 ou de l'une de ses composantes dans une entreprise comme la vôtre, quelle planification stratégique la haute direction devrait-elle avoir ? Dans votre cas, pensez-vous que votre planification stratégique serait adéquate ? Dites-nous-en un peu plus ?
17. Pour adopter et réussir l'implantation de l'Industrie 4.0 ou de l'une de ses composantes dans une entreprise comme la vôtre, quel mode de gestion la haute direction devrait-elle avoir ? Dans votre cas, pensez-vous que votre mode de gestion serait adéquat ? Dites-nous-en un peu plus ?
18. Pour adopter et réussir l'implantation de l'Industrie 4.0 ou de l'une de ses composantes dans une entreprise comme la vôtre, quelle culture d'entreprise la haute direction devrait-elle avoir ? Dans votre cas, pensez-vous que votre culture d'entreprise serait adéquate ? Dites-nous-en un peu plus ?
19. Pour adopter et réussir l'implantation de l'Industrie 4.0 ou de l'une de ses composantes dans une entreprise comme la vôtre, quel style de leadership la haute direction devrait-elle avoir ? Dans votre cas, pensez-vous que votre style de leadership serait adéquat ? Dites-nous-en un peu plus ?
20. Pour adopter et réussir l'implantation de l'Industrie 4.0 ou de l'une de ses composantes dans une entreprise comme la vôtre, quel modèle d'affaires la haute direction devrait-elle avoir ? Dans votre cas, pensez-vous que votre modèle d'affaires serait adéquat ? Dites-nous-en un peu plus ?

Conclusion et remerciements (5 minutes)

Nous sommes rendus à la fin de cette discussion, avant de conclure, je souhaite savoir s'il y a quelque chose qui a été oublié. Est-ce que vous souhaitez apporter une précision ou ajouter autre chose ?

En mon nom et au nom de l'équipe de recherche, nous souhaitons vivement vous remercier pour la qualité de votre participation. Une fois les analyses complétées, les résultats vous seront présentés.