UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

THÈSE PRÉSENTÉE À
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES
COMME EXIGENCE PARTIELLE
DU DOCTORAT EN INGÉNIERIE
OFFERT EN EXTENSION
EN VERTU D'UN PROTOCOLE D'ENTENTE
AVEC L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À CHICOUTIMI

PAR
SÉBASTIEN GAMACHE

STRATÉGIES DE MISE EN ŒUVRE DE L'INDUSTRIE 4.0 DANS LES PETITES ET MOYENNES ENTREPRISES MANUFACTURIÈRES QUÉBÉCOISES

MAI 2019

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

DOCTORAT EN INGÉNIERIE (PH. D.)

Programme offert par l'Université du Québec à Chicoutimi (UQAC)

en extension avec

l'Université du Québec à Trois-Rivières (UQTR)

Cette thèse a été dirigée par :

Georges Abdul-Nour, Ph.D, ing.	UQTR
Directeur de recherche, grade	Rattachement institutionnel
Chantal Baril, Ph.D., ing.	UQTR
Codirectrice de recherche, grade	Rattachement institutionnel

Jury d'évaluation de la thèse :

Georges Abdul-Nour, Ph.D, ing.	UQTR
Prénom et nom, grade	Rattachement institutionnel
Chantal Baril, Ph.D, ing.	UQTR
Prénom et nom, grade	Rattachement institutionnel
Denis Lagacé, Ph.D, ing. Président du Jury	UQTR
Prénom et nom, grade	Rattachement institutionnel
Robert Pellerin, Ph.D., ing. Membre externe	Polytechnique de Montréal
Prénom et nom, grade	Rattachement institutionnel
Samir Lamouri, Ph.D., Membre	Arts et Métiers, paris, France
Prénom et nom, grade	Rattachement institutionnel

Thèse soutenue le 13 mai 2019

RÉSUMÉ

Les technologies numériques occupent une place croissante dans l'industrie depuis l'arrivée de l'Internet et l'accès de plus en plus abordable aux technologies, amenant à la quatrième révolution industrielle : Industrie 4.0. On remarque qu'au Québec, les PME manufacturières tardent à entamer leur transformation numérique, notamment dû au manque de ressources et d'expertise dans le numérique, ainsi qu'à la difficulté d'identifier les actions qui offrent les plus grands bénéfices dans leur réalité. La recherche a alors pour objectif de développer une stratégie efficiente pour amener les PME manufacturières québécoises à migrer vers un environnement 4.0. Pour y arriver, il a été nécessaire de démystifier l'Industrie 4.0, comprendre l'état actuel des PME manufacturières quant à la transformation numérique, recenser les facteurs d'influence les plus pertinents pour les PME et analyser l'effet de ces facteurs d'influence sur la performance des entreprises.

La méthodologie de la recherche est la suivante : proposer un modèle d'évaluation de la performance numérique, établir un questionnaire, tester et valider le modèle dans 15 entreprises, finaliser le questionnaire, exécuter les expériences finales dans 21 entreprises, analyser les résultats à l'aide de tests d'hypothèse et développer une stratégie efficiente d'implantation de l'Industrie 4.0. La variable dépendante utilisée est la performance numérique, indicateur adapté de la performance organisationnelle.

L'analyse des résultats a confirmé les trois hypothèses, selon que certaines pratiques d'affaires, certains processus d'affaires et outils numériques tendent à avoir un effet significatif sur la performance numérique des entreprises. L'impact associé à chacune de ces variables a permis de les prioriser pour le passage au 4.0 selon 4 niveaux : essentiels, prioritaires, non prioritaires et cas particuliers. La comparaison de la stratégie avec les résultats récoltés dans deux entreprises a finalement permis de valider la robustesse de la stratégie proposée.

Mots-clés : Industrie 4.0, PME, transformation numérique, performance numérique, questionnaire, tests d'hypothèse, partitionnement de données, expérience terrain.

ABSTRACT

Digital technologies have become increasingly important in the industry since the advent of the Internet and the increasingly affordable access to technology, leading to the fourth industrial revolution: Industry 4.0. We notice that in Quebec, manufacturing SMEs are slow to start their digital transformation, particularly due to the lack of resources and expertise in the digital sector, as well as the difficulty of identifying the actions that offer the greatest benefits in their real-life environment. This research aims at developing an efficient strategy to help the manufacturing SMEs in Quebec to transform to a 4.0 environment. To achieve this, it was necessary to demystify Industry 4.0, to understand the current state of the manufacturing SMEs in terms of digital transformation, to identify the most relevant influencing factors for SMEs and to analyze the effect of these factors on the business performance.

The research methodology is as follows: Propose a numerical performance evaluation model, establish a questionnaire, test and validate the model in 15 companies, finalize the questionnaire, perform the final experiments in 21 companies, analyze the results with hypothesis tests and develop an efficient strategy for implementing Industry 4.0. The dependent variable used is the digital performance, an indicator adapted from the notion of organizational performance.

The analysis of the results confirmed the three hypotheses, according to which certain business practices, certain business processes and digital tools tend to have a significant effect on the digital performance of the companies. The importance of the impact associated with each of these variables made it possible to prioritize them for the transition to 4.0 into 4 levels: essential, priority, non-priority and special cases. The comparison of the strategy with the results collected in two companies finally validated the robustness of the proposed strategy.

Keywords: Industry 4.0, SMEs, digital transformation, digital performance, questionnaire, hypothesis testing, data clustering, field experiments

REMERCIEMENTS

Il n'existe pas suffisamment de mots dans le dictionnaire de la langue française pour remercier adéquatement toutes les personnes qui m'ont accompagné lors de ce long voyage.

Il me serait tout d'abord impensable de passer à côté de mon directeur de recherche, ami, collègue, patron, mentor, Georges Abdul-Nour, pour tout ce qu'il a fait et pour tout ce qu'il est. Je me compte extrêmement chanceux et honoré d'avoir eu le bonheur de côtoyer un homme aussi professionnel, intelligent, dévoué et disponible. Pour avoir lu, relu et encore relu, pour m'avoir accompagné dans les beaux moments comme dans les plus difficiles, pour m'avoir sans cesse encouragé à me dépasser, merci du fond du cœur.

Je tiens également à remercier Chantal Baril, ma codirectrice de recherche, pour sa présence entrecoupée d'histoires de vie qui nous l'ont enfin ramenée plus forte et plus motivée que jamais. Pour ta rigueur, ta curiosité, ton courage surtout et ton implication sincère, je te remercie profondément.

À Sébastien Houle, directeur général de Productique Québec et à toute cette belle grande famille, je tiens à vous exprimer ma gratitude pour la belle opportunité d'avoir pu travailler avec vous sur tous ces projets autant stimulants que formateurs. Merci pour le temps, pour la confiance, pour les échanges et pour l'amitié sincère que nous avons partagés.

Merci également au MÉSI, maintenant nommé MÉI, pour m'avoir donné la chance d'être sur le projet de développement de l'Audit Industrie 4.0 et pour la mission à Hanovre.

Je tiens aussi à remercier les 36 entreprises (15 pilotes + 21 finales) qui ont accepté de répondre aux questionnaires et participer aux entrevues. Sans vous, je n'aurais jamais réussi à faire un travail d'une aussi belle qualité.

Merci aux membres du jury qui prennent le temps de lire cette thèse, l'analysent et y apportent leur expertise ainsi que leurs meilleurs conseils.

Je remercie également monsieur Louis Raymond et madame Claudia Pelletier, professeurs de gestion et systèmes d'information à l'UQTR et madame Diane Riopel, professeure de mathématique et génie industriel à l'École Polytechnique de Montréal, pour vos très généreux conseils.

Merci aussi à Mitacs pour la bourse de recherche en entreprise qui m'a permis de mener à bien mon projet et mes expériences.

Enfin, mes remerciements les plus sincères à ma tendre moitié Émilie, pour son écoute tout au long de ma thèse, ainsi qu'à trois hommes d'exception qui ont eu un rôle majeur dans mes réflexions et mon travail : papa, Hugo et Tommy. Merci du fond du cœur. Pour finir, merci à mes amis et à ma famille pour le support, l'écoute et l'amour dont vous me faites part jour après jour.

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES FIGURES

LISTE DES ABRÉVIATIONS

Abréviation	Signification intégrale	Traduction
AGV	*Automated Guided Vehicle*	Véhicule autoguidé
API	*Application Programming Interface*	Interfaces de programmation applicatives
APS	*Advanced Planning and Scheduling*	Système avancé de planification et d'ordonnancement de la production
AQL	*Acceptance Quality Limit*	Niveau de qualité acceptable
B2B	*Business-to-Business*	Relation entreprise-entreprise
B2C	*Business-to-Customer*	Relation entreprise-client final
BI	*Business Intelligence*	Intelligence d'affaires
CAO	Conception Assistée par Ordinateur	
CCTT	Centre Collégial de Transfert de Technologies	
CEFRIO	Centre Facilitant la Recherche et l'Innovation dans les Organisations	
CFAO	Conception et Fabrication Assisté par Ordinateur	
CNC	*Computer Numerical Control*	Machine-outil à commande numérique
CPS	*Cyber-Physical Systems*	Systèmes cyber-physiques
CRIM	Centre de Recherche Informatique de Montréal	
CRIQ	Centre de Recherche Industrielle du Québec	
CRM	*Customer Relationship Management*	Système de gestion de la relation client
DMS	*Daily Management System*	Système de gestion quotidienne
ERP	*Enterprise Resource Planning*	Progiciel de gestion intégré
FAO	Fabrication Assistée par Ordinateur	
FIPEC	Fournisseur - Intrant - Processus - Extrant - Client	
FMS	*Flexible Manufacturing System*	Systèmes de production flexibles
IA	Intelligence Artificielle	

Abréviation	Signification intégrale	Traduction
INRPME	Institut National de Recherche sur le Petites et Moyennes Entreprises	
IoS	*Internet of Services*	Internet des services
IoT	*Internet of Things*	Internet des objets
KPI	*Key Performance Indicator*	Indicateur clé de performance
M2M	*Machine-to-Machine*	Communication intermachine
MDM	*Master Data Management*	Gestion des données référentielles
MES	*Manufacturing Execution System*	Système d'exécution de la production
MÉSI	Ministère de l'Économie, des Sciences et de l'Innovation	
OCDE	Organisation de Coopération et de Développement Économiques	
PLM	*Product Lifecycle Management*	Gestion du cycle de vie des produits
PME	Petite et Moyenne Entreprise	
PMEM	Petite et Moyenne Entreprise Manufacturière	
RBV	*Resource-Based View*	Approche fondée sur les ressources
RFID	*Radio Frequency IDentification*	Identification par radiofréquence
RH	Ressources humaines	
STIQ	Sous-Traitance Industrielle du Québec	
TI	Technologie de l'Information	
TIC	Technologie de l'Information et des Communications	
UQTR	Université du Québec à Trois-Rivières	
VPN	*Virtual Private Network*	Réseaux privés virtuels
WMS	*Warehouse Management System*	Système de gestion d'entrepôt

INTRODUCTION

Avec la chute des barrières internationales, le manque de main-d'œuvre et l'arrivée des technologies numériques dans l'environnement manufacturier, les entreprises de toutes tailles doivent faire preuve d'ingéniosité pour demeurer concurrentielles. Pour se distinguer, les entreprises doivent miser sur la notion de valeur perçue par le client, autrement appelée, la valeur ajoutée. Les technologies numériques, l'Internet en entreprise et l'utilisation des données massives sont des moyens qui permettent aux entreprises de générer de la valeur autrement.

En 2011, à la foire annuelle d'Hanovre, l'Institut des Fraunhofer dévoilait une nouvelle politique gouvernementale allemande pour améliorer les pratiques industrielles à la grandeur du pays : l'Industrie 4.0.

Le terme « 4.0 » représente la quatrième révolution industrielle. L'exploitation du premier métier à tisser en 1784 a transformé le milieu industriel en intégrant l'énergie mécanique via la force de l'eau et de la vapeur. C'était la première révolution industrielle. La deuxième révolution industrielle a débuté en 1870 avec l'arrivée de l'électricité, la standardisation et l'interchangeabilité, qui a mené à la création de lignes de production à la chaîne et à la fabrication de masse. En 1969, l'arrivée de l'informatique et de l'électronique dans les usines a mené aux automates programmables et à l'automatisation des opérations de production, initiant alors le début de la troisième révolution industrielle. Depuis le début des années 2000, avec l'arrivée de l'Internet, de nouvelles technologies numériques se développent et intègrent le milieu industriel. Le coût des technologies chute d'année en année, rendant ces nouvelles solutions de plus en plus accessibles aux entreprises. C'est le commencement de la quatrième ère industrielle.

L'Industrie 4.0 est associée à l'interconnectivité, notamment grâce aux capteurs, aux réseaux sociaux, à l'Internet et aux logiciels informatiques qui génèrent, traitent et

délivrent de l'information à valeur ajoutée en temps réel. Elle favorise l'intégration et la connectivité entre les machines, les personnes et les organisations. Pour ces raisons, les notions de l'Industrie 4.0 sont de plus en plus utilisées dans les grandes industries allemandes. D'autres pays comme la Chine, la France et les États-Unis mettent également des efforts importants dans la transformation numérique de leur industrie dans l'objectif de gagner un avantage compétitif mondial. Pour survivre à cette compétition, les entreprises québécoises doivent alors adhérer à l'Industrie 4.0 ainsi qu'à la transformation industrielle qui l'accompagne.

Gamache et al. (2017) ont constaté qu'au Québec, les Petites et Moyennes Entreprises Manufacturières (PMEM) tardent à entamer leur transformation numérique. Le manque de ressources, le coût des nouvelles technologies, ainsi que le manque d'expertise dans le domaine du numérique, semblent limiter les actions que peuvent prendre les PMEM au niveau de la transformation numérique de leur entreprise. En 2011, lorsque les Fraunhofer ont annoncé la politique gouvernementale de l'Industrie 4.0, cette révolution se voulait être une aide spécialement adaptée pour les entreprises manufacturières de grandes tailles. Or au Québec, tout comme en France par exemple, plus de 95 % du tissu industriel est composé d'entreprises de petites et moyennes tailles. Du coup, les entreprises n'ont souvent pas les moyens financiers ni les ressources humaines suffisantes, pour passer au travers des mêmes étapes que les grandes entreprises pour se numériser. Il convient de se demander quels outils numériques, pratiques d'affaires et modes de gestion offrent une stratégie efficiente pour le passage des PME à l'Industrie 4.0.

Ce projet de recherche dresse un portrait de l'état actuel des entreprises québécoises et identifie les moyens qui ont pour potentiel de faciliter et accélérer la transformation numérique des PME manufacturières. Un questionnaire développé en se basant sur une revue de littérature exhaustive, a permis de mesurer le niveau de performance numérique de 21 entreprises québécoises, tant au niveau opérationnel que managérial. Par la suite, un plan numérique a également été élaboré afin de présenter les moyens de mise en

œuvre et d'amélioration de la performance numérique des entreprises, adaptés à leur réalité. Enfin, une analyse statistique a permis d'identifier les facteurs d'influence les plus significatifs pour faciliter le passage à l'Industrie 4.0 des PME québécoises.

Dans les pages suivantes, la révolution Industrie 4.0, la PME manufacturière, la méthode d'implantation du 4.0 et la mesure de performance choisie dans ce travail seront présentés. Aussi, les notions de valeur, de pratiques d'affaires et processus d'affaires, de technologies 4.0, de compétences numériques, de performance numérique et de transformation numérique, seront abordées. La Figure 0.1 montre les différentes notions examinées dans cette thèse.

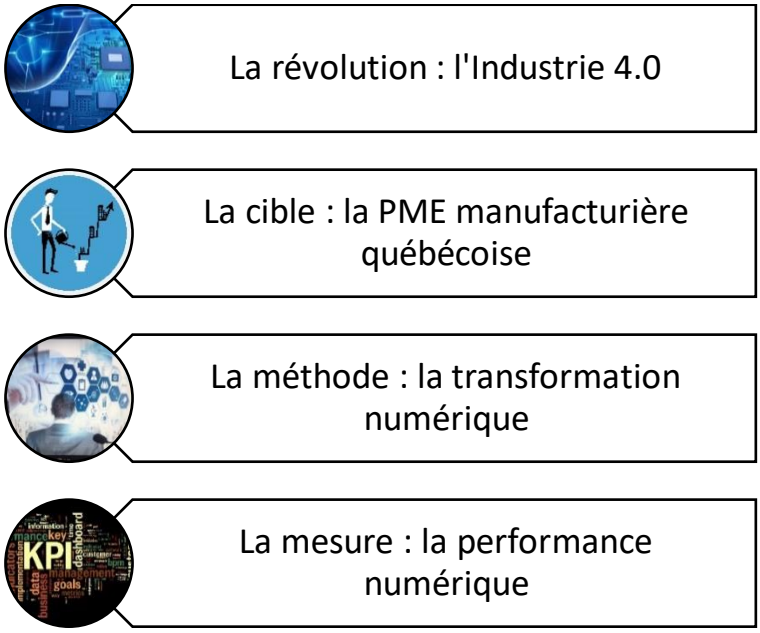


Figure 0.1 : La révolution, la cible, la méthode et la mesure

Le chapitre 1 de cette thèse couvrira la problématique, les questions de recherche ainsi que le but de l'étude. Ensuite, une recension des écrits sur l'Industrie 4.0 dans la PMEM québécoise sera effectuée au chapitre 2. Ce chapitre sera décomposé en trois sections afin de couvrir (1) le potentiel de l'Industrie 4.0, (2) la PME et (3) la transformation numérique. Le chapitre 3 présentera le développement de la méthode utilisée pour la poursuite de la recherche. Le chapitre 4 sera dédié à un projet pilote dans 15 entreprises

afin de tester le modèle proposé. Ensuite, le chapitre 5 présentera les résultats des expériences finales dans 21 nouvelles entreprises et l'analyse des résultats. Le chapitre 6 présentera les résultats des tests d'hypothèse et une analyse par partitionnement de données pour terminer avec le chapitre 7 qui exposera la stratégie proposée pour le passage des PME à l'Industrie 4.0. Les informations les plus marquantes du travail exécuté seront présentées dans la conclusion.

CHAPITRE 1

PROBLÉMATIQUE DE RECHERCHE ET OBJECTIFS

Ce chapitre couvre la problématique, les questions et les objectifs de la recherche.

1.1 Problématique

Dans tous les secteurs d'activités industrielles, académiques et commerciales, les technologies numériques occupent une place croissante et sont en continuel développement. Les technologies de l'information et des communications (TIC) ont déjà fait leurs preuves au niveau des gains qu'elles peuvent apporter à une organisation. En conséquence, elles sont de plus en plus intégrées aux pratiques d'affaires. Dans un contexte de mondialisation et d'omniprésence du numérique, les petites et moyennes entreprises manufacturières (PMEM) deviennent vulnérables aux géants de l'industrie, ainsi qu'aux *start-ups*, qui peuvent rapidement prendre le contrôle du marché. Les exigences de la personnalisation de masse, le manque de main-d'œuvre et la concurrence mondiale amènent les industries québécoises à devoir améliorer leur offre de produits et services, leur efficacité et leur agilité. Pour y arriver, plusieurs outils existent dont par exemple, les technologies numériques qui permettent de se distinguer à plusieurs niveaux.

Depuis 2011, il est question de l'Industrie 4.0, de l'industrie du futur, de l'usine intelligente, de la Smart Factory, etc. Tous ces termes concernent la quatrième révolution industrielle et indiquent un changement radical dans les façons de faire. De plus en plus en Allemagne, les industries telles que Siemens, Bosch et Volkswagen adoptent la révolution Industrie 4.0. Elles intègrent et investissent de plus en plus dans les technologies numériques, la connectivité, la robotisation et l'intelligence des systèmes (Kohler et Weisz, 2016).

Au Québec, on n'entend parler de l'Industrie 4.0 que depuis peu. En 2016 ainsi qu'en 2018, le gouvernement québécois organisait deux « missions de développement » avec la chambre de commerce et d'industrie de Montréal avec pour objectif, d'amener les industriels à comprendre davantage la « nouvelle révolution industrielle » et l'intégrer le plus tôt possible chez les manufacturiers québécois. Au même titre, les académiques et les organisations à la fine pointe du développement prennent connaissance de l'importance de cette révolution pour l'ensemble de l'industrie. *Dans les usines québécoises, on remarque néanmoins peu d'adhésion à cette dite révolution.*

1.2 Questions de recherche

Il est possible de remarquer que tout autour du globe, d'autres termes que « Industrie 4.0 » existent et s'y apparentent. L'industrie du futur (en France), la Smart Factory (aux États-Unis) et le Made in China 2025 (en Chine) n'en sont que quelques exemples. Après avoir eu la chance de travailler et d'échanger avec des institutions expertes dans le domaine des PME au Québec (INRPME, CEFRIO, CRIQ, STIQ, Productique Québec), il a été possible de constater qu'il y a bel et bien un retard chez les PME québécoises à mettre en branle des démarches formelles de passage à l'Industrie 4.0. Il est donc louable de se demander :

Pour quelles raisons les entreprises québécoises tardent-elles à introduire l'Industrie 4.0 dans leurs pratiques? Où est-ce qu'elles en sont par rapport au 4.0 ? Comment les aider à atteindre le niveau de l'Industrie 4.0 ?

Des technologies supportant le 4.0 comme l'Internet des Objets (IoT) et des Services (IoS), les Systèmes Cyber-Physiques (CPS), le Big Data et l'Analytique et l'infonuagique sont de plus en plus répandues dans les pratiques industrielles. Face à tous ces noms, choix, pratiques d'affaires et options technologiques, les entrepreneurs de la petite et moyenne entreprise se retrouvent souvent déroutés, entre autres en raison du manque de ressources, de connaissances techniques et théoriques, de financement et de proximité avec les chercheurs, gouvernement et développeurs de technologies

numériques. Pour ces raisons, on constate que peu d'efforts sont mis au niveau de leur transformation numérique (MESI, 2017).

Comment les PME manufacturières québécoises peuvent-elles évoluer vers un environnement « 4.0 » de façon efficiente ?

Pour répondre à ces questions, il devient nécessaire de définir l'Industrie 4.0, sa provenance, les termes, les technologies et les concepts associés. Il est également pertinent de déterminer une méthode pour mesurer l'état de progression des entreprises vers le numérique afin de les aider à les situer et à cibler les actions à poser pour améliorer la performance numérique et manufacturière des entreprises et favoriser l'atteinte de leurs objectifs d'affaires dans un environnement désormais numérique.

1.3 Objectifs de la recherche

L'objectif principal de cette recherche est *de développer une stratégie efficiente pour amener les PME manufacturières québécoises à migrer vers un environnement 4.0.* Pour y arriver, il est suggéré d'atteindre les quatre sous-objectifs suivants :

1. démystifier l'Industrie 4.0;
2. comprendre l'état actuel des PME manufacturières quant au numérique;
3. recenser les facteurs d'influence les plus pertinents en fonction des enjeux et objectifs propres aux PMEM dans un contexte de transformation numérique;
4. analyser l'effet de ces facteurs d'influence sur la performance numérique des PMEM.

CHAPITRE 2

REVUE DE LA LITTÉRATURE

2.1 Stratégie de la revue de la littérature

Une exploration de la littérature a été effectuée afin de faire le point sur l'état des connaissances actuelles concernant l'Industrie 4.0 et les principaux facteurs d'influence sur la petite et moyenne entreprise manufacturière. Les moteurs de recherche SCOPUS, ScienceDirect, Business Source Complete, Springer, Cairn et Google ont permis de cibler différents documents tels que des livres, articles scientifiques, rapports de recherche, sites internet, conférences et vidéos portant sur l'Industrie 4.0, la transformation numérique, la numérisation, l'agilité, l'économie, l'automatisation, le management et le leadership pour couvrir le sujet dans sa globalité. Des ouvrages datant des années 1970 jusqu'à 2018, ont permis d'observer la chronologie et l'évolution de l'économie globale et des industries dans le temps. La structure de la revue de la littérature présentée à la Figure 2.1 a permis de guider et d'organiser les idées principales issues de la revue de la littérature. Plus spécifiquement, la revue de la littérature est divisée en trois parties, soit (1) l'Industrie 4.0, (2) la PME manufacturière et (3) la transformation numérique.

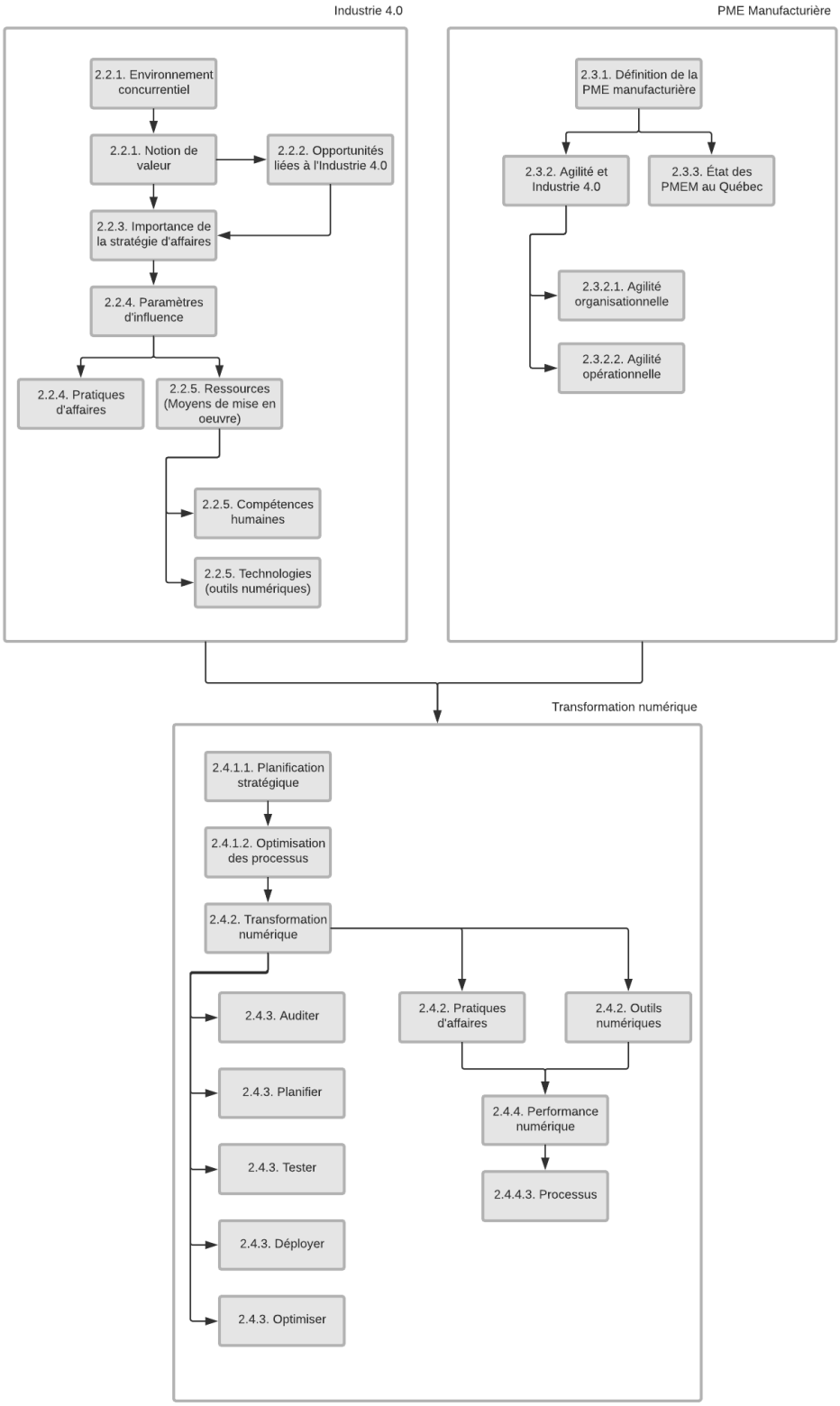


Figure 2.1 : Structure de la revue de la littérature

2.2 Partie 1. La révolution : Industrie 4.0

L'Industrie 4.0 n'est pas une mode ou une tendance à proprement parler. Elle provient d'une chaîne d'évènements qui a amené à chercher de nouvelles solutions pour répondre à la pénurie de main-d'œuvre vécue dans les pays occidentaux depuis quelques années, la mondialisation des industries et l'effervescence du commerce électronique. Au Canada et au Québec par exemple, le taux de chômage moyen se situait respectivement à 6 % et 5,5 % en août 2018, occasionnant régulièrement le refus de contrats, des retards de livraison et un niveau élevé d'heures supplémentaires (ISQ, 2018). Cette évolution de l'environnement concurrentiel, vécue dans plusieurs pays entre autres, par l'accessibilité et la prise de conscience du potentiel des technologies, a été l'un des premiers éléments qui a poussé au développement de la notion d'Industrie 4.0 (Blanchet, 2016).

2.2.1 Environnement concurrentiel et notion de valeur

Michael Porter (1979) a développé le modèle des cinq forces pour l'analyse de sa position concurrentielle. L'auteur démontre la structure concurrentielle des entreprises en fonction des cinq axes stratégiques suivants :

1. le pouvoir de négociation des clients avec l'entreprise;
2. le pouvoir de négociation des fournisseurs avec l'entreprise;
3. la menace des produits ou services de substitution;
4. la menace d'entrants potentiels sur le marché;
5. l'intensité de la rivalité entre les concurrents.

Selon l'auteur, une entreprise doit étudier son environnement en considérant ces cinq caractéristiques pour limiter les menaces potentielles et développer un avantage concurrentiel.

Porter (1979) définit l'avantage concurrentiel comme le coût engagé pour produire un bien ou un service, additionné de la valeur de différenciation. Il défend qu'une entreprise puisse alors développer un avantage concurrentiel en diminuant ses coûts de production, en augmentant la valeur de différenciation ou les deux. Il définit la valeur de

différenciation comme les attributs uniques, tangibles et intangibles, associés à un produit ou un service et qui affectent de façon importante la valeur perçue par le client. La valeur perçue par le client représente quant à elle, le prix que celui-ci est prêt à payer pour un produit.

Avec l'arrivée massive des technologies numériques dans le milieu manufacturier, les clients sont plus informés, les fournisseurs ont accès à un plus grand bassin de clients, les produits sont de plus en plus substitués par des alternatives numériques et mobiles (CD, films, consoles de jeux, applications…), les *start-ups* ont accès à plus de ressources, grâce notamment aux *crowdfunding, crowdsourcing* et incubateurs et la rivalité entre les entreprises devient de plus en plus forte à l'intérieur et à l'extérieur d'un même secteur d'activités (Weinman, 2015).

Il est possible de remarquer que le modèle de Porter se concentre spécifiquement sur l'impact de l'environnement d'une entreprise dans le développement de son avantage concurrentiel. Barney (1991) fut l'un des premiers à traiter la valeur basée sur les ressources (*Resource-Based Value* – RBV). Contrairement à Porter (1979), Barney (1991) présente les moyens internes que possède une entreprise pour générer un avantage concurrentiel. Ce cadre de gestion se base sur le fait que toutes les entreprises possèdent un combiné de ressources hétérogènes, qui ont un potentiel de génération de valeur unique. Dans la théorie de la RBV, les quatre critères suivants doivent être respectés :

- les ressources doivent posséder une valeur – comme répondre à un besoin, réduire les coûts, augmenter les revenus, éliminer une menace, etc.;
- les ressources doivent être rares – donc disponibles en peu d'exemplaires, difficile à s'en approprier;
- les ressources doivent être difficiles à imiter – ou trop chers pour que l'imitation ne soit rentable et réponde au même besoin;
- les ressources ne doivent pas être facilement remplaçables – pour atteindre un résultat similaire.

Selon Barney (1991), une entreprise qui évalue l'utilisation de ses ressources et développe une stratégie appropriée pour répondre à ces critères, se différencie de la concurrence. Le CEFRIO (2016), Avasant (2016) et Weinman (2015) démontrent que dans un environnement hautement numérique, le facteur de différenciation devient un enjeu crucial et peut se développer en misant sur (1) le produit et le service, (2) le processus et (3) la relation. Ces auteurs affirment d'ailleurs que les nouvelles technologies, inhérentes à l'Industrie 4.0, permettent désormais aux entreprises de collecter et analyser leurs données, de revoir ses modèles d'affaires, ses produits, ses services et ses processus et d'améliorer l'implication et sa relation avec ses clients.

Enfin, Kohler et Weisz (2016) démontrent que l'intégration des nouvelles technologies, encouragée par l'Industrie 4.0, crée un environnement fortement compétitif. Et pour demeurer compétitives, les entreprises doivent trouver une manière de se distinguer et développer un avantage concurrentiel.

2.2.2 Le potentiel de l'Industrie 4.0

Blanchet (2016) définit l'Industrie 4.0 comme *une politique industrielle développée par le gouvernement allemand ayant pour objectif de gagner et maintenir un avantage compétitif mondial au niveau des entreprises manufacturières*. L'investissement des entreprises dans les technologies de l'information, la coordination des chaînes d'approvisionnement, l'automatisation via les systèmes cyber-physiques, les systèmes embarqués et la robotique, amènent l'Industrie 4.0 à être considérée comme une solution d'avenir. Son objectif est de répondre à un changement des consommateurs qui exigent des produits personnalisés, ce qui force l'industrie à changer ses paradigmes et ses pratiques et à aller vers la production de masse personnalisée. Hermann et al. (2015) ont examiné 51 publications et ont fait ressortir les termes les plus fréquemment associés à l'Industrie 4.0. Le Tableau 2.1 représente les principales technologies de la quatrième révolution industrielle selon ces auteurs.

Tableau 2.1 : Les technologies de l'Industrie 4.0 (Herman et al., 2015)

Terme recherché (Groupe)	**Nombre de publications où le terme recherché apparaît**
Systèmes Cyber-physiques, CPS	46
Internet des Objets, IoT	36
Smart Factory, Usine intelligente	24
Internet des Services, IoS	19
Produit intelligent	10
M2M, Machine-to-Machine	8
Big Data	7
Cloud	5

Dans leur revue de la littérature, les auteurs affirment que les principes clés reliés à l'Industrie 4.0 sont l'interopérabilité, la virtualisation, la décentralisation, la capabilité en temps réel, l'orientation service et la modularité. Selon Hermann et al. (2015), l'atteinte de ces principes est possible grâce à l'implantation de ces différentes technologies.

L'interopérabilité représente « la capacité que possède un produit ou un système à fonctionner avec d'autres produits ou avec des systèmes existants ou futurs sans restriction d'accès ou de mise en œuvre » (AFUL, 2017). Cela signifie qu'un humain ou une machine peut effectuer plusieurs opérations. Il s'agit également de développer un langage informatique commun qui permet de faciliter la communication entre les différents systèmes informatiques (machines, logiciels, etc.).

La virtualisation est définie par la capacité à créer une image virtuelle du plancher et du processus de production, créée par la simulation du processus ou par des capteurs intelligents intégrés au processus de production. L'objectif est de garder le processus de production interrelié et le plus transparent possible via un système appelé Système Cyber-Physique (CPS) (Sangmahachai, 2015).

La décentralisation représente la politique de contrôle décentralisée. C'est la capacité de permettre aux employés et aux machines de prendre des décisions rapidement (notamment grâce aux Technologies de l'Information et des Communications (TIC)). L'objectif est de décentraliser la prise de décision en laissant un certain contrôle aux

machines et par la résolution rapide et exacte de situations problématiques (Sangmahachai, 2015).

Le système en temps réel représente la capacité à « contrôler (ou piloter) un processus physique à une vitesse adaptée à l'évolution du procédé contrôlé » (Liu, J., 2000). Les systèmes en temps réel se différencient par la prise en compte et le respect de contraintes temporelles ainsi que de l'exactitude du résultat. Autrement dit, le système doit délivrer des résultats exacts dans des délais imposés par l'évolution en temps réel.

L'orientation service représente le fait de remodeler son modèle d'affaires en fonction des données disponibles. Il s'agit de repenser la façon de faire des affaires avec le client en n'offrant non plus seulement un produit, mais une solution complète et intégrée via un amalgame de services et fonctionnalités, rendu désormais possible grâce aux capteurs intégrés dans les objets.

Enfin, la modularité est l'habilité de séparer un tout en petits ensembles. C'est un principe unique des systèmes de production ***agiles***. Le produit ou le processus de production peut être séparé pour mieux gérer la complexité d'un système. L'habilité de séparer signifie également que le plancher est capable de modifier les processus pour rencontrer plus rapidement les divers besoins des clients (Sangmahachai, 2015).

Bien que l'étude d'Hermann et al. (2015) regroupe les idées principales qui tournent autour de l'Industrie 4.0, il est important de rappeler que la plupart des articles portant sur l'Industrie 4.0 ont été rédigés en considérant la grande entreprise et non la PME. D'ailleurs, comme Mœuf (2018) le présente, les systèmes cyber-physiques, la communication intermachine et la robotique collaborative sont peu utilisés dans les petites et moyennes entreprises en raison du coût en infrastructure élevé.

Porter et Heppelmann (2014) démontrent que les nouvelles technologies numériques, intelligentes et connectées, sont la clé pour avancer vers un environnement 4.0. Les auteurs définissent l'intelligence des produits par leur capacité à collecter et analyser des données. La connectivité est quant à elle, la capacité à transférer les données d'un objet à

un autre pour faciliter le transfert d'information, la prise de décision et l'analyse plus avancée des données collectées. Les différents niveaux de numérisation sont, selon Porter et Heppelmann (2014) (1) la surveillance (*monitoring*), (2) le contrôle, (3) l'optimisation et (4) l'automatisation.

La surveillance est définie par l'utilisation de capteurs et sources de données externes et connectés qui permettent une surveillance complète des conditions de production, de l'environnement externe et des opérations et usages du produit. La capacité de surveillance permet également de programmer des alertes et notifications dans des situations anormales. Le contrôle correspond à l'intégration d'un logiciel à l'intérieur du produit intelligent et connecté, ou dans le nuage, qui permet le contrôle des fonctions du produit et la personnalisation de l'expérience utilisateur. L'optimisation représente la capacité à utiliser les outils de surveillance et de contrôle à l'aide d'algorithmes pour analyser les données et optimiser les opérations et utilisations liées au produit afin d'améliorer la performance et permettre des diagnostics prédictifs, des services et des réparations. Enfin, l'automatisation combine les capacités de surveillance, de contrôle et d'optimisation pour permettre des opérations autonomes dans le produit, une auto-coordination des opérations avec d'autres produits ou systèmes, une amélioration et une personnalisation du produit de façon autonome et un autodiagnostic.

En fonction de ce qui est recherché par une solution numérique, il est possible que seul un niveau de surveillance ne soit requis. Dans une autre application, une solution numérique pourra complètement automatiser une tâche. Le CEFRIO (2016) a d'ailleurs repris l'article de Porter et Heppelmann (2014) pour l'adapter à la réalité québécoise. Comme il le présente dans son rapport, une compréhension profonde de sa stratégie d'affaires et de la valeur offerte à ses clients permettra aux entreprises de déterminer quelles technologies et quel niveau de capacité seront nécessaires pour l'atteinte de ces objectifs d'affaires. L'établissement d'une stratégie d'affaires claire devient alors un prérequis, voire la première étape, pour entamer le passage à l'Industrie 4.0 (CEFRIO, 2016).

2.2.3 Stratégie d'affaires

Largement appuyés par la littérature, Miles et Snow (1978) présentent trois types de stratégie d'affaires principales, soit les stratégies prospective, analytique ou défensive.

L'idée est reprise par Raymond et Croteau (2009) qui affirment qu'une entreprise est de type prospectif lorsque sa stratégie consiste à introduire de nouveaux produits et services, revoir ses modèles d'affaires et constamment rechercher de nouveaux marchés. Cette stratégie requiert une gestion de risques et une gestion de changement importantes en raison du haut degré d'innovation et du taux d'échec associé à des innovations constantes (Miles et Snow, 1978). Ce type d'entreprise doit également miser sur la flexibilité et l'agilité de ses systèmes pour absorber les changements et maintenir un niveau de rentabilité satisfaisant.

Une entreprise de type analytique préfère aller vers des produits ou des services déjà éprouvés, mais en optant pour l'optimisation de ses processus pour offrir des produits de meilleure qualité à meilleurs coûts (Raymond et Croteau, 2009). Ce type d'entreprise préfère minimiser les risques tout en maximisant les opportunités d'affaires. Elle doit alors développer une infrastructure efficace et flexible pour offrir une meilleure efficience et rentabilité que les prospecteurs et pour répondre rapidement aux changements de l'environnement (Miles et Snow, 1978).

Une entreprise de type défensif est davantage orientée vers le coût, le contrôle de ses processus et la conservation de sa position sur le marché (Raymond et Croteau, 2009). Elle se concentre dans un marché niche et tente de développer une place stable par des coûts compétitifs et une qualité inégalée, mais évite d'aller vers des marchés non maîtrisés (Miles et Snow, 1978).

Finalement, le profil « réacteur » est parfois utilisé dans la typologie, mais représente surtout l'absence de stratégie particulière (Raymond et Croteau, 2009).

Au regard de cette typologie, la stratégie définit la direction d'une entreprise. La mise en œuvre de la stratégie doit ensuite passer par l'acquisition, le développement et le

déploiement de pratiques d'affaires, d'outils numériques et de compétences humaines afin d'amener à l'atteinte de ses objectifs d'affaires (Zellner, 2011).

2.2.4 Pratiques d'affaires liées à l'Industrie 4.0

Dans la littérature, plusieurs pratiques d'affaires sont citées comme méthode pour le déploiement de la transformation numérique. Le choix de ces méthodes dépend notamment de l'orientation stratégique, des enjeux, du contexte interne et externe et des ressources disponibles tant humaines que technologiques, dans les entreprises. Pour orienter les priorités, les investissements et les vecteurs de valeur dans une entreprise de plus en plus numérique, plusieurs auteurs ont développé des modèles théoriques qui ont pour objectif de faciliter la prise de décision et l'atteinte des objectifs d'affaires via différentes pratiques liées à l'Industrie 4.0. Les idées principales recueillies sont présentées au Tableau 2.2.

Tableau 2.2 : Pratiques d'affaires liées à l'Industrie 4.0

Pratiques d'affaires liées à l'Industrie 4.0	Avasant (2016)	Blanchet (2016)	Boston Consulting Group (2018)	CGI (2016)	Cigref (2015)	Gimélec (2014)	HUB Institute (2017)	Impuls (2016)	Kasetsart, Sangmahachai (2015)	Kohli (2008)	Lueth (2015)	McKinsey Digital (2015)	MESI (2016)	Mœuf, A. (2018)	Pelletier, C. (2018)	PLM Portal (2017)	Porter (2014)	Weinman (2015)	**Total**
Acquisition et développement des compétences	x	x	x		x		x	x		x			x			x			**9**
Cybersécurité			x	x		x	x	x	x					x		x	x		**9**
Vision et Stratégie	x		x	x	x		x	x		x					x	x			**9**
Agilité et innovation	x		x		x		x	x					x			x		x	**8**
Maîtrise des technologies	x	x	x	x	x		x									x	x		**8**
Utilisation opérationnelle des données	x		x	x	x		x	x				x			x				**8**
Utilisation stratégique des données	x		x	x	x		x	x				x			x				**8**
Automatisation des processus		x	x		x			x			x		x			x			**7**
Ouverture à l'externe	x			x	x	x	x							x	x				**7**
e-Commerce	x		x			x	x						x			x			**6**
Organisation du travail (Lean)		x	x		x	x									x	x			**6**
Orientation service et Fidélisation	x		x				x	x						x		x			**6**
Personnalisation			x			x	x		x		x			x					**6**
Cocréation et Innovation ouverte					x	x	x					x						x	**5**
Investissement et ressources disponibles			x	x	x			x		x									**5**
Nouveaux modèles d'affaires			x	x			x								x	x			**5**
Écosystème et architecture numérique			x				x	x								x			**4**
Gestion des données (collecte, qualité et livraison)								x				x				x			**3**
Communication interne					x		x	x											**3**
Gestion du changement							x												**1**
Engagement et exemplarité							x												**1**
Veille technologique				x															**1**

L'étude du Tableau 2.2 montre que certaines pratiques d'affaires telles que l'acquisition et le développement des compétences, la cybersécurité, la définition de sa vision et stratégie, l'agilité et l'innovation, la maîtrise des technologies et l'utilisation des données sont au cœur de l'Industrie 4.0, car ils apparaissent très souvent dans la littérature. D'autres pratiques d'affaires comme la gestion du changement, l'engagement et l'exemplarité de la direction et la veille technologique sont moins abordés, mais sont tout de même reliés à la transition au numérique. Deux modèles ressortent du Tableau 2.2 par leur pertinence. Il s'agit du modèle d'Impuls et celui du HUB Institute.

La Fondation de la Fédération de l'Ingénierie Allemande Impuls a conduit en 2016 une étude en collaboration avec plusieurs experts tels que l'Institut de Cologne sur la Recherche Économique et l'Institut du Management Industriel de l'Université Aachen sur le *readiness* numérique des entreprises allemandes. L'étude présente six volets d'évaluation, à savoir : (1) la stratégie et l'organisation, (2) l'usine intelligente, (3) les opérations intelligentes, (4) les produits intelligents, (5) les services par l'analyse des données et (6) les employés. La Figure 2.2 montre le modèle de *readiness* numérique d'Impuls (2016).

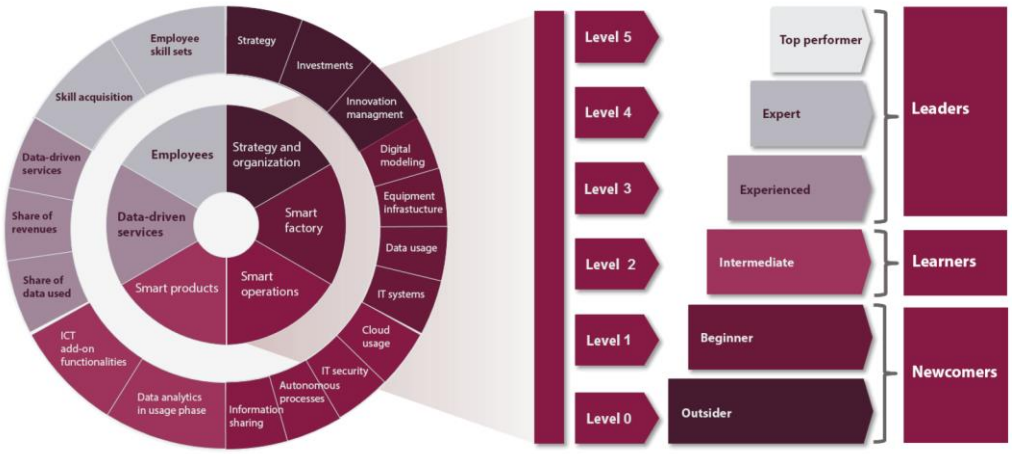


Figure 2.2 : Modèle de *readiness* numérique d'Impuls (2016)

Le modèle d'Impuls soulève de nombreuses pratiques d'affaires à évaluer pour mettre en œuvre une transformation numérique. Parmi les plus pertinentes, il y a : l'infrastructure

des équipements; l'utilisation des données; la sécurité des TI; l'autonomie des processus; le partage d'information; l'analyse des données en temps réel; les services offerts par l'analyse des données; l'acquisition et le développement des compétences des employés; la stratégie numérique de l'entreprise; et la gestion de l'innovation.

Le modèle du HUB Institute (Ducrey et Vivier, 2017) a également pour but d'aider les entreprises à exécuter leur transformation numérique. Selon les auteurs, six dimensions principales doivent être adressées lors de cette démarche, notamment (1) le leadership, (2) la culture et organisation, (3) la gestion des technologies, (4) la gestion des données, (5) le système de mesure (processus décisionnel) et (6) l'expérience client. Le leadership concerne la direction de l'entreprise, sa connaissance du marché et de l'évolution de l'environnement. La culture et l'organisation représentent les moyens mis en œuvre pour favoriser l'innovation, l'amélioration continue, l'acceptation du changement, l'acquisition de compétences, etc. La gestion des technologies aborde les notions de maturité numérique, de cybersécurité et l'utilisation de technologies numériques pour l'atteinte des objectifs d'affaires. La gestion des données représente la captation, l'entreposage, le traitement et la qualité des données utilisées dans l'entreprise. Le système de mesure représente la façon d'utiliser les données pour faciliter le processus décisionnel. Enfin, l'expérience client représente les méthodes utilisées pour personnaliser et améliorer l'offre et les relations avec le client.

En résumé, ces éléments représentent les avenues qui, selon les auteurs, sont les plus prometteuses pour les entreprises qui désirent aller vers un environnement 4.0. L'étude des éléments de leur modèle permettra en ce sens d'identifier ceux qui sont les plus pertinents dans un contexte de PME.

2.2.5 Moyens de mise en œuvre du 4.0

La concrétisation d'une stratégie d'affaires passe d'abord par le déploiement de ressources, tant humaines que financières, technologiques et matérielles. Barney (2001) a défini les ressources d'une entreprise comme étant « tous les actifs, les capacités, les processus organisationnels, les attributs, les informations et les connaissances, contrôlés

par une entreprise, qui permettent de concevoir et implanter des stratégies qui améliorent son efficacité et son efficience ». Tout d'abord, examinons les notions de ressources humaines – compétences, connaissances, habiletés, attitudes – qui facilitent la mise en œuvre de sa stratégie organisationnelle et numérique.

Le CEFRIO (2016) affirme que la capacité d'une organisation repose à la fois sur l'usage de ses actifs en place et des compétences de ses employés. En ce sens, Caldeira et Ward (2003) défendent que les compétences sont composées de connaissances, d'habiletés et d'attitudes qui favorisent l'exécution d'une tâche. L'individu possède différentes habiletés techniques, connaissances et savoir-être qui lui sont propres. Les connaissances des individus représentent l'ensemble des savoirs qui permettent de comprendre une situation ou un phénomène. Elles sont composées d'informations, de principes, de théories, et de pratiques connues grâce à l'expérience et l'éducation (CEFRIO, 2016). Les habiletés représentent le savoir-faire, c'est-à-dire les capacités à mettre en application les connaissances pour l'exécution d'une tâche ou la résolution de problèmes. L'attitude, ou le savoir-être, met en lumière les façons de penser et les motivations individuelles qui sont à la base des comportements des individus. Mis dans un contexte organisationnel, ces attributs deviennent des compétences puisqu'elles permettent l'exécution d'un objectif organisationnel ou d'une tâche précise. Ensemble, plusieurs compétences offrent des capacités à une organisation puisqu'elles lui permettent de générer et livrer un produit ou un service sur le marché. La Figure 2.3 présente la relation entre les capacités d'une organisation et les compétences, les connaissances et les caractéristiques personnelles des individus selon Caldeira et Ward (2003).

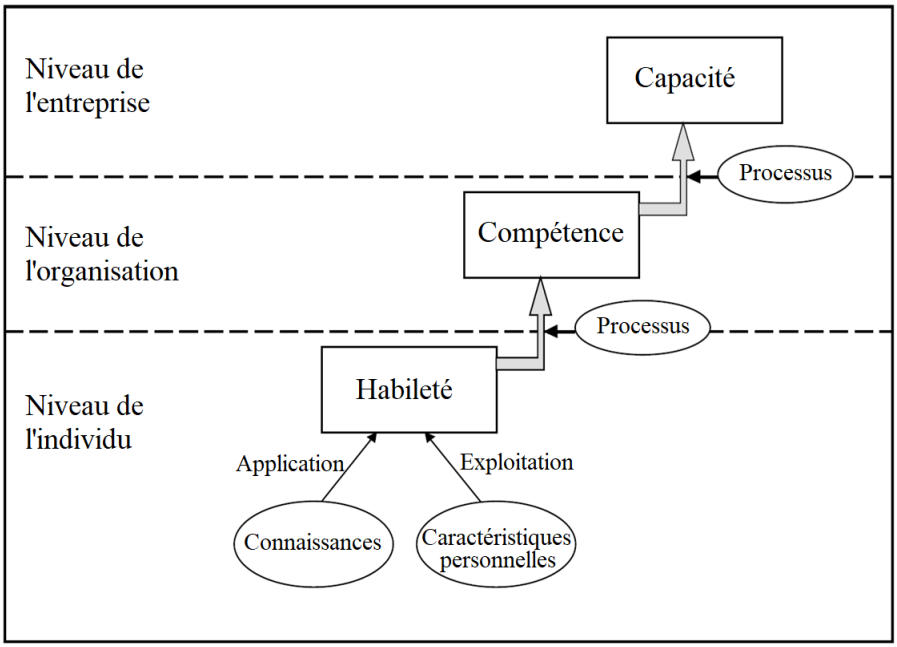


Figure 2.3 : Relations entre les capacités, compétences, habiletés et connaissances

Dans un environnement hautement numérique, les compétences prennent davantage d'importance. Le CEFRIO (2016) définit les compétences numériques comme l'habileté des individus à utiliser les technologies numériques pour :

- analyser, sélectionner et évaluer de manière critique l'information numérique;
- résoudre des problèmes;
- développer une base de connaissances collaboratives tout en s'engageant dans les pratiques organisationnelles.

Dans ce même rapport, les auteurs affirment que les compétences doivent être développées sur trois plans, à savoir le plan technique, collaboratif et cognitif. Les compétences techniques représentent l'habileté des individus à utiliser efficacement les technologies. Les compétences collaboratives sont la capacité d'un individu à collaborer avec les technologies, utiliser celles-ci pour établir des canaux de communication efficaces et résoudre différents problèmes. Enfin, les compétences cognitives

représentent la capacité d'un individu à traiter et analyser des informations en tenant compte de la pertinence et de la fiabilité de l'information traitée.

Dans le contexte d'Industrie 4.0, les travailleurs adoptent davantage le rôle de décideurs stratégiques ou solutionneurs de problèmes (Weyer et al., 2015). Les employés sont amenés à comprendre les systèmes toujours plus sophistiqués et à supporter les clients via le service à la clientèle sur le terrain, les diagnostics de maintenance, l'assistance à l'utilisateur et la formation (Hao et Helo, 2015). Selon Weyer et al. (2015), les ressources humaines dans une entreprise 4.0 deviennent des travailleurs en support technologique dans un environnement dynamique et stimulant. Avec un rôle plus axé sur le cahier des charges, les spécifications et le contrôle et la surveillance des stratégies de production, les travailleurs ont dans ce contexte, la possibilité de réaliser « leur plein potentiel et adopter le rôle de décideurs stratégiques et flexibles ». Grâce à cette nouvelle main-d'œuvre, la complexité technique croissante peut être maîtrisée (Weyer et al., 2015).

Considérant l'avancement rapide des technologies, le développement des compétences des individus devient de plus en plus critique pour les organisations. Maintenant, analysons les outils numériques de l'Industrie 4.0 qui facilitent la mise en place d'une stratégie organisationnelle et numérique.

Avec l'omniprésence de l'Internet et le développement rapide de toutes sortes de technologies, il devient pertinent pour les entreprises de bien identifier et sélectionner celles qui sont les plus pertinentes pour leur réalité. Comme le mentionne le CEFRIO (2017), l'investissement dans des technologies pertinentes devient nécessaire pour l'exécution efficace de sa stratégie d'affaires. La revue de la littérature a permis de faire ressortir les groupes de technologies numériques reliées à l'Industrie 4.0.

Il a d'ailleurs été constaté dans la littérature, qu'il existe un débat concernant la relation directe de certains groupes technologiques avec la quatrième révolution industrielle. C'est le cas par exemple, pour l'impression additive, l'intelligence artificielle, les

logiciels de conception et les logiciels de pilotage (ERP, MES, WMS, etc.). Bien que ce débat ait un intérêt académique, il a été décidé que pour le cadre de l'étude actuel, ces groupes technologiques allaient être intégrés dans la thèse. Cette décision a été prise d'abord en raison du flou concernant leur impact ou non dans l'Industrie 4.0 et car l'objectif de l'étude est de développer une stratégie efficiente de passage au 4.0 dans les PME. Si l'acquisition de ces technologies, faisant partie ou non de l'Industrie 4.0, aident les PME à engager et réussir leur virage au 4.0, alors il devient pertinent de les considérer dans l'étude.

Blanchet (2016) propose une catégorisation de ces différentes technologies via cinq contextes d'utilisation, à savoir : (1) la conception de produit et processus, (2) le pilotage et contrôle, (3) les opérations de fabrication, (4) les services, et (5) l'organisation du travail.

La conception des produits et des processus inclut l'utilisation de logiciels de simulation, de conception et fabrication assistées par ordinateur, de gestion du cycle de vie du produit, etc. Le pilotage et le contrôle représentent l'utilisation de Systèmes Cyber-Physiques, d'Internet des Objets, de logiciels de traçabilité et de gestion de flux tels que des véhicules guidés automatiquement, des outils de Gestion de la Production Assistée par Ordinateur (GPAO), de gestion de chaîne d'approvisionnement et l'utilisation de RFID. Les opérations de fabrication incluent les machines intelligentes et autonomes, les cobots (robots collaboratifs) et la fabrication additive pour améliorer la précision, l'efficacité et la flexibilité. Les services incluent tout ce qui est maintenance prédictive, Big Data, Analytique, télémaintenance et système de gestion de la clientèle (CRM). Enfin, l'organisation du travail inclut la réalité virtuelle et augmentée, ainsi que des pratiques « non technologiques » telles que le *lean manufacturing* et le Juste-À-Temps ainsi que l'acquisition et le développement des compétences numériques. Le Tableau 2.3 montre l'ensemble des moyens technologiques disponibles pour le déploiement de la stratégie numérique d'une entreprise en fonction des différents auteurs, regroupés à l'aide de la catégorisation de Blanchet (2016). Il est à noter que certaines technologies se

retrouvent dans plus d'une catégorie et *ont été dupliquées* pour respecter le regroupement de Blanchet. Une description de chacun de ces outils est ensuite présentée.

Tableau 2.3 : Outils numériques de l'Industrie 4.0

	Outils numériques de l'Industrie 4.0	Avasant (2016)	Blanchet (2016)	Boston Consulting Group (2018)	CEFRIO (2017)	CGI (2016)	Gimélec (2016)	HUB Institute (2017)	Impuls (2016)	Sangmahachai (2015)	Lueth (2015)	McKinsey Digital (2015)	Mœuf, A. (2018)	PLM Portal (2017)	Porter (2008)	Productique Québec (2016)	Weinman (2015)	***Total***
Conception de produits et processus	Fabrication additive		x	x			x			x	x	x		x		x		***8***
	Simulation			x	x		x		x			x	x					***6***
	Logiciels de conception (CFAO, PLM, paramétrie, API)				x			x							x	x		***4***
	Crowd	x			x			x									x	***4***
Pilotage et contrôle	Big Data, Analytique et BI	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		x	x	x	x	x	***15***
	Internet des Objets	x	x	x	x	x	x	x		x	x	x	x	x		x	x	***14***
	Infonuagique	x		x	x	x	x	x	x	x	x		x	x	x		x	***13***
	Chaîne d'approvisionnement intelligente			x	x		x			x	x	x		x				***7***
	Systèmes Cyber-physiques	x			x			x		x	x		x					***6***
	Système de gestion de production (WMS, MES, ERP, Traçabilité, Planification)				x			x							x	x		***4***
	Véhicules guidés automatiquement (AGV)		x	x						x	x							***4***
	Mobilité	x									x			x			x	***4***
Opérations de fabrication	Robotique			x	x					x	x			x		x		***6***
	Robots collaboratifs		x				x					x	x			x		***5***
	Communication M2M				x		x						x	x				***4***
	Intelligence artificielle				x			x										***2***
Services	Big Data, Analytique et BI	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		x	x	x	x	x	***15***
	Cybersécurité			x	x	x	x		x	x	x		x	x	x	x		***11***
	Maintenance prédictive		x	x	x		x				x	x				x		***7***
	Mobilité	x									x			x		x	x	***5***
	Systèmes liés à la clientèle (CRM, télémaintenance...)				x			x							x	x		***4***
	Médias sociaux	x			x			x									x	***4***
	Commerce électronique, Internet des Services	x			x					x								***3***
Organisation du travail	Réalité augmentée / virtuelle		x	x	x		x	x			x	x	x					***8***

2.2.5.1 Les outils numériques de l'Industrie 4.0 concernant la conception des produits et des processus

Logiciels de conception (CFAO, PLM, CAO paramétrique, API)

Dans un contexte de personnalisation de masse, de nombreuses entreprises offrent des produits avec différentes options plus ou moins standards. Les systèmes CAO (Conception Assistée par Ordinateur), FAO (Fabrication Assistée par Ordinateur), CFAO et CAO paramétriques, facilitent la conception des produits et la génération des programmes des machines à commande numérique pour la fabrication (Productique Québec, 2016). La paramétrisation des produits permet une fabrication personnalisée puisque les critères de personnalisation sont prédéfinis et limités. Elle a également pour avantage, de réduire le temps de conception de chacun des produits.

Les Interfaces de Programmation Applicatives (« API » en anglais) sont des interfaces de programmation d'applications. Basées sur un principe de langage commun et de location de services d'un logiciel tiers, les API permettent de programmer des applications sur des surfaces informatiques déjà existantes (Ducrey et Vivier, 2017).

Simulation

La simulation fait ici référence à l'intégration des différents outils informatiques et l'utilisation de logiciels spécialisés pour modéliser et simuler les performances d'un système de production (Caggiano et al., 2015; Caggiano et Teti, 2013; Luo et al., 2011; Mœuf, 2018). Cet outil est utilisé dans le but d'analyser les qualités internes d'un produit, mais aussi son cheminement sur le plancher de production et y étudier la performance des lignes de production pour optimiser l'ensemble des processus (Veza et al., 2015). La simulation permet aux opérateurs de tester et d'optimiser le paramétrage des machines pour les produits à venir en production avant qu'ils atteignent le plancher de l'usine (CEFRIO, 2016). Ceci permet alors de diminuer les temps de mise en course des machines et d'augmenter leur disponibilité.

Crowd

Dans un environnement hautement numérique, il devient possible d'externaliser de nombreuses tâches dans un lieu différent du lieu principal d'opération (Avasant, 2016). Les services partagés, le *crowdsourcing*, le *crowdfunding* et l'innovation ouverte sont quelques exemples de ce qui est rendu possible avec les technologies numériques. Grâce à l'Internet, il est désormais possible d'avoir accès à un réseau d'entreprises et d'experts partout autour du globe. Des spécialistes en développement d'applications et maintenance, des fournisseurs de solutions, des services en sécurité, en gestion et hébergement des données, etc. peuvent être utilisés à distance. En faisant appel à l'expertise, à la créativité et à l'innovation des individus externes à l'organisation (« *crowd* »), les entreprises peuvent davantage se concentrer sur leurs processus internes et sur leur maîtrise, développer des offres personnalisées, identifier de nouvelles niches, implanter des stratégies innovatrices et capturer de nouvelles opportunités de marché (Avasant, 2016).

Fabrication additive

La fabrication additive est la technique de fabrication de produits en trois dimensions dans laquelle le relief des différentes pièces est obtenu par un procédé de superposition de couches successives (Productique Québec, 2016). Le procédé consiste à déposer successivement des couches de matière en fonction d'un modèle programmé à l'ordinateur. Cette technique facilite le développement de prototypes et de pièces uniques et aux formes inhabituelles. Les matériaux utilisés pour la fabrication additive peuvent être de type métallique, plastique, textile et biologique.

2.2.5.2 Les outils numériques de l'Industrie 4.0 concernant le pilotage et le contrôle

Système de gestion de production (WMS, MES, ERP, Traçabilité, Planification)

Plusieurs systèmes et logiciels peuvent être utilisés dans les entreprises pour gérer différents éléments de l'organisation. Parmi ces logiciels, certains reviennent plus

souvent que d'autres dans la littérature. On parle notamment des systèmes de gestion d'entrepôt *(« WMS »* en anglais), des systèmes d'exécution de la production (« *MES* »), des progiciels de gestion intégrés (« *ERP* »), des systèmes de traçabilité et des modules de planification et d'ordonnancement de la production.

Les systèmes de gestion d'entrepôt sont des solutions informatiques qui ont pour objectifs de faciliter les étapes de préparation, de suivi et d'exécution des activités logistiques (Productique Québec, 2016). En relation avec un système de traçabilité, le WMS permet d'optimiser les déplacements internes, faciliter la recherche de matériel ainsi que diminuer l'espace nécessaire au stockage des composantes physiques.

Un système d'exécution de la production (MES) est une solution informatique qui permet le pilotage et un suivi en temps réel, *ou du moins à la minute*, du plancher de fabrication (Club MES, 2017). Le MES représente, selon le Club MES (2017), l'outil central utilisé par le superviseur de la production afin de lui fournir une vision en temps réel du plancher de production et de mettre en évidence les impacts des aléas de production sur la planification et l'organisation en général. Plus concrètement, les MES permettent d'assurer la répartition des tâches de production, l'ordonnancement de la production et la gestion de l'assurance qualité.

Les progiciels de gestion intégrés, ou systèmes ERP, sont des solutions composées de plusieurs modules informatiques, intégrés les uns aux autres, qui permettent une gestion des informations intégrées à une seule base de données (Productique Québec, 2016). Parmi ces modules, on retrouve principalement les modules de comptabilité, finances, coûts de fabrication, ingénierie, ressources humaines, facturation, etc. Son objectif est principalement d'optimiser l'utilisation des ressources, assurer l'intégrité des données et améliorer le partage de l'information.

Les systèmes de traçabilité sont des solutions qui permettent un suivi en temps réel du matériel dans une partie ou l'ensemble d'une chaîne de valeur. Ils permettent de vérifier l'historique, les localisations, les transformations et autres informations liées à un

produit via un historique documenté d'identification (Ooreka, 2017). La traçabilité se concrétise notamment par l'utilisation de codes-barres, puces RFID ou autres, afin d'éliminer les transcriptions manuscrites et simplifier la prise d'information. Les systèmes de traçabilité peuvent être indépendants ou intégrés à un système ERP, un WMS ou un MES.

Les modules de planification et d'ordonnancement sont des modules, souvent intégrés au système ERP ou au système MES, qui visent à faciliter la prise de décision quant à la synchronisation des activités d'une organisation (Productique Québec, 2016). Ce type de système tend à optimiser les ressources et le temps en respectant différentes contraintes de production (matière, capacité, délais, coûts, disponibilité, etc.).

Chacun de ces systèmes permet aux entreprises de répondre à certains besoins d'efficacité, de flexibilité et d'intégration, dépendamment du logiciel et des objectifs de l'entreprise qui l'utilise.

Systèmes Cyber-Physiques (CPS)

Les CPS représentent la connectivité entre le monde physique et celui virtuel (Blanchet, 2016; Kohler et Weisz, 2016). Ce sont des mécanismes qui permettent (1) de collecter des données de production via les systèmes embarqués (capteurs, actionneurs, etc.), (2) de connecter et analyser les données dans le nuage et (3) de prendre et contrôler des décisions de façon autonome ou non autonome. Les systèmes cyber-physiques collectent et transforment l'information en actions concrètes (Kohler et Weisz, 2016; J., Bagheri et al., 2015). Les CPS permettent de contrôler les processus en temps réel et de prendre des décisions automatisées. Ils permettent d'automatiser les tâches répétitives (Dworscak et Zaiser, 2014; Yu, Xu et Lu, 2015) afin d'augmenter l'efficacité du travail à effectuer. Enfin, ils assurent la combinaison, la coordination et l'optimisation des processus en temps réel.

Les CPS sont un réseau global comprenant des machines intelligentes, des systèmes d'entreposage et des installations de production capables d'échanger des informations et

de se contrôler l'un l'autre pour déclencher des actions de façon autonome et indépendante (Kagermann et al., 2013; Weyer et al., 2015). Ils sont l'intégration des systèmes informatiques, des réseaux d'entreprises et des processus physiques où les systèmes embarqués et les réseaux informatiques surveillent et contrôlent les processus physiques avec des boucles de rétroactions et où les processus physiques affectent les calculs informatiques et vice-versa (CyberPhysicalSystem, 2012).

Internet des Objets (IoT)

L'Internet des Objets (IoT) représente une infrastructure intelligente des technologies de l'information (TI) qui permet la communication et la coopération en temps réel entre les objets (machines et dispositifs) (Tan et Wang, 2010). L'IoT assure la connexion entre le monde physique et le monde virtuel (Jain et Jain, 2015; Khodkari et Maghrebi, 2016) et utilise les données transmises par les objets et les transforme en information pouvant potentiellement mener à des actions concrètes (Kohler et Weisz, 2016; Vermasen et Friess, 2013). Le réseau IoT permet de connecter les objets entre eux, les surveiller, les rechercher, les gérer, les contrôler en envoyant, en recevant et en échangeant des données et des informations (Barrett, 2015). Ces données sont collectées à l'aide de matériel informatique (hardware), aussi appelé systèmes embarqués. Les données sont ensuite analysées à l'aide de logiciels. Puis, le système agit sur les composantes physiques et virtuelles grâce à la connectivité (Vermasen et Friess, 2013). L'interaction peut soit être d'ordre physique, c'est-à-dire déclencher un mouvement, une tâche ou autres par des machines ou d'ordre virtuel via des applications mobiles ou d'un système d'information central (Lawell, 2015; Mattern et Florkemeier, 2010).

Pour que l'IoT fonctionne, les « objets » doivent répondre à cinq critères (Barrett, 2015) :

1. ils doivent avoir une identité propre via par exemple des codes-barres, des puces RFID et des numéros de série;

2. ils doivent être habilités à communiquer, que ce soit par Wi-Fi, Bluetooth, ou autre;
3. ils doivent posséder des sens via des capteurs (thermomètre, GPS, accéléromètre, baromètre, capteur optique, etc.);
4. ils doivent pouvoir être contrôlés à distance;
5. ils doivent (ou peuvent) être auto-apprenants.

Intelligence d'affaires, Big Data et Analytique

L'intelligence d'affaires représente l'utilisation de tableaux de bord et d'indicateurs de performance pour faciliter la prise de décision en entreprise. Elle est d'une certaine façon l'ancêtre de l'Analytique puisqu'elle ne recherche pas de tendances et autres relations entre les données. Elle se base davantage sur l'utilisation d'indicateurs de performance pour suivre l'état d'avancement d'un processus.

Le terme « Big Data » représente le volume massif de données structurées et non structurées. Ce dernier est tellement grand et étendu que des techniques de gestion de base de données et les logiciels traditionnels ne peuvent le traiter (Gartner, 2011; Hilbert, 2015; Lebigdata.fr, 2016). Le traitement de ces données permet d'effectuer des analyses prédictives et comportementales, de prédire la demande des marchés, d'en réduire les coûts d'entreprise et de gestion des données, d'accélérer la prise de décisions basées sur les faits et d'offrir de nouveaux produits et services par la revue du modèle d'affaires. (Douglas, 2012; Kohler et Weisz, 2016; Lee, J., 2014)

L'interaction de Big Data avec le nuage permet de greffer l'ensemble des données du Big Data à des outils informatiques tels que les progiciels ERP, d'intelligence d'affaires et de gestion de la relation-client (CRM) (Douglas, 2012; Hilbert, 2015; Lee, J., 2014; Nature, 2008). Cette interaction facilite notamment la prise de décisions dans de nombreux contextes. En industrie, l'utilisation des puces RFID, des capteurs, des actionneurs et des réseaux sans fils par exemple, permet de stocker une quantité

importante de données dans le nuage et d'utiliser les outils du Big Data pour des fins d'analyse plus poussées.

Infonuagique (ou Cloud Computing)

LeBigData.fr définit l'infonuagique comme le stockage et l'accès aux données par l'intermédiaire d'Internet plutôt que via un disque dur local. À l'opposé de Big Data, l'infonuagique représente l'infrastructure qui gère et organise les données. Le Big Data représente le contenu, c'est-à-dire, les données elles-mêmes (Tian et Zhao, 2014).

L'infonuagique a pour objectif d'offrir des services informatiques à la demande, à grande échelle et partout dans le monde (Tian et Zhao, 2014; Xu, X., 2011). Il n'a virtuellement aucune limite de capacité de stockage et de puissance de traitement (Khodkari et Maghrebi, 2016). Il permet notamment de réduire les coûts d'informatisation des entreprises et leurs investissements technologiques puisque l'infrastructure jusqu'alors physique est désormais virtualisée (Xu, X., 2011). Cette technologie assure une communication verticale et horizontale via un réseau intelligent – interne et/ou externe – en temps réel (Kohler et Weisz, 2016; Yu, Xu et Lu, 2015).

Véhicules guidés automatiquement (AGV)

Un véhicule à guidage automatique (« *Automated Guided Vehicule* » en anglais) est un robot mobile, capable d'effectuer des tâches de transport de façon totalement autonome (Schulze et al., 2008). Cet outil permet d'augmenter la flexibilité de la manutention dans un environnement en continuel changement. Le véhicule peut être guidé par un fil ou une trace physique sur le sol, par des capteurs laser, par des capteurs optiques et par géoguidage.

Chaîne d'approvisionnement intelligente

La chaîne d'approvisionnement intelligente représente principalement l'intégration des données reliées aux fournisseurs dans le système informatique d'une organisation et vice-versa, dans le but d'assurer une meilleure cohésion, de meilleures capacités et

meilleures données pour une prise de décision plus juste, plus rapide et plus efficace (BCG, 2015). Les données échangées entre les fournisseurs et l'organisation peuvent toucher par exemple la qualité des matières livrées, l'intégration des composantes dans le design du produit, la planification de la production, etc. L'échange de données en temps réel permet une communication plus efficiente entre les humains, machines, pièces et produits, notamment via des portails et interfaces communs et permet également une meilleure réactivité et flexibilité dans des cas de changements prévus et imprévus (BCG, 2015).

Mobilité

La mobilité est le terme utilisé pour représenter l'omniprésence d'appareils électroniques intelligents dans plusieurs sphères de la vie courante. Ces appareils mobiles sont les téléphones intelligents, les tablettes électroniques et les micro-ordinateurs... Ces technologies révolutionnent la manière dont les individus communiquent et collaborent. Selon Avasant (2016), les appareils mobiles permettent une communication permanente, en temps réel et partout dans le monde. Ils permettent de piloter des processus à l'aide d'indices de performance, tableaux et graphiques, garder un contact continu avec toute partie prenante, favoriser les échanges d'information, raccourcir les chaînes de valeur, faciliter la formation, les transactions, etc. Selon le même auteur, cet outil facilite les relations Business-to-Business (B2B) et Business-to-Consumer (B2C) et permet d'exploiter de nouveaux modèles d'affaires et de nouvelles sources de données et de communication.

2.2.5.3 Les outils numériques de l'Industrie 4.0 concernant les opérations de fabrication

Robotique

Les robots en production manufacturière ont historiquement été utilisés pour accomplir des tâches répétitives à moindre valeur ajoutée. Leur coût élevé et le manque d'agilité observés lors de leur utilisation sont de plus en plus atténués par des robots plus

abordables, plus flexibles, autonomes et coopératifs (BCG, 2015). Les robots sont désormais capables d'interagir entre eux et accomplir des tâches complexes grâce à des capteurs, à la vision industrielle, etc.

Robots collaboratifs

Les robots collaboratifs, parfois appelés « cobots » (*collaborative robots*), représentent une branche de la robotique qui a pour particularité de pouvoir interagir avec un environnement variable (Productique Québec, 2016). En contraste aux robots traditionnels, ils n'ont pas de cage de sécurité. Ils ne sont pas programmés à proprement parler. Puisqu'ils possèdent des capacités d'apprentissage, ils sont capables de reproduire rapidement avec précision une opération définie (Mœuf, 2018). Ils viennent en soutien aux opérateurs en exécutant les tâches répétitives et à moindre valeur ajoutée dans un environnement collaboratif.

Communication M2M

La communication M2M représente la communication en temps réel entre deux ou plusieurs machines (« *Machine-to-Machine* »). Elle repose directement sur les protocoles et les technologies standards de communication dans le but de faciliter les échanges d'information entre les machines (CEFRIO, 2016). L'ensemble du système de production peut alors se reconfigurer et réagir rapidement et de façon autonome lors d'une situation anormale (Mœuf, 2018).

Intelligence artificielle

Selon Ducrey et Vivier (2017), l'intelligence artificielle (IA) représente la capacité d'un logiciel à simuler l'intelligence humaine, notamment via l'apprentissage, la gestion de la mémoire et le raisonnement critique. Dans le contexte d'Industrie 4.0, l'intelligence artificielle peut être appliquée à la prise de décision et au pilotage des machines de production (CEFRIO, 2016).

2.2.5.4 Les outils numériques de l'Industrie 4.0 concernant les services

Systèmes liés à la clientèle (CRM, télémaintenance...)

Comme pour la gestion de la production, plusieurs systèmes et logiciels sont disponibles pour améliorer les relations avec les clients. Deux de ces solutions sont les systèmes de gestion de la relation-client (*CRM*) et les solutions de télémaintenance.

Un CRM aide à la gestion de la relation du client en centralisant toutes les informations et historiques relatifs à chaque client individuellement. Il permet de conserver les historiques de communication pour retracer le produit, le service, les échanges, etc. qui ont eu lieu avec un client (Productique Québec, 2016). Certains CRM permettent également d'intégrer l'impact des efforts marketing, la satisfaction des clients et le support après-ventes. En bref, un système de gestion de la relation client permet de structurer et encadrer toutes les interactions entre l'organisation et les clients.

La télémaintenance ou maintenance à distance, représente l'ensemble des actions mises en place pour assurer un support à distance directement sur des équipements. L'avantage de ce service est que le temps et les coûts associés au transport des experts sont évités (Fritscher et al., 2018). La télémaintenance peut être accomplie via le contrôle à distance du logiciel de l'équipement, par téléphone, vidéoconférence ou autre.

Dans l'Industrie 4.0, les relations avec les clients ne sont plus transactionnelles, mais se basent sur une relation de partenariat à long terme (Weinman, 2015). Les solutions de service permettent de concrétiser ce principe.

Maintenance prédictive

Les nouvelles technologies et la démocratisation des outils de gestion de la maintenance permettent désormais d'intégrer des capteurs sur des équipements, connectés à l'Internet, dans le but de détecter les situations anormales et d'atteindre un niveau de maintenance prédictive (Productique Québec, 2016). Les capteurs permettent de suivre en temps réel, l'état de santé de l'équipement et de ses composantes pour qu'elles

répondent à leurs objectifs de façon optimale, c'est-à-dire prévoir les bris et optimiser l'utilisation de l'équipement et de chacun de ses éléments critiques.

Par exemple, l'ajout d'un capteur de température sur un moteur, appuyé d'une configuration de différents niveaux d'alerte et l'ajout de l'arrêt du moteur si un seuil est franchi, permettent d'éviter les problèmes, les surchauffages et les bris. Grâce aux capteurs intégrés à l'équipement, il est possible d'acheminer toutes les informations nécessaires à un superviseur pour réagir au bon moment et optimiser les coûts et l'utilisation du moteur.

Cybersécurité

L'Industrie 4.0 prend sa valeur dans la transmission et la valorisation des données et des informations issues des produits, des processus, des systèmes et des individus. Cette grande quantité de données qui circulent entre les systèmes et personnes tout comme l'utilisation quotidienne de l'Internet, accroît l'importance de la cybersécurité. Comme l'affirme Productique Québec (2016), la croissance des objets connectés en production, des appareils mobiles et de l'infonuagique exige qu'une entreprise développe une gestion de la sécurité informatique pour garantir que les données qui sont stockées et qui transitent sur le réseau, ne soient pas vulnérables aux cyber-attaques. Il en est de même pour les fournisseurs de solutions 4.0 qui doivent se connecter à l'Internet. Certains exemples de solutions en cybersécurité sont les réseaux privés virtuels (VPN), les accès limités, les antivirus, et les pare-feu (Productique Québec, 2016).

Internet des Services (IoS)

L'orientation service de l'Industrie 4.0 est exécutée entre autres, par l'Internet des Services. Il est l'outil qui permet de vendre les services via l'Internet. Hermann, Pentek et Otto (2015) décrivent l'IoS comme une combinaison de personnes (clients, vendeurs, etc.), d'infrastructures pour les services, de modèles d'affaires et des services en eux-mêmes.

Les services vendus peuvent notamment être des procédés et des logiciels situés dans le nuage. Par exemple, en utilisant un logiciel situé sur le nuage, une entreprise pourrait collecter, analyser et exploiter les données d'usage de ses produits chez son client afin d'améliorer ses processus et ses produits et éventuellement, offrir à ses clients des services supplémentaires comme la maintenance prédictive, le paiement à l'usage, etc. (Hao et Helo, 2015; Wu et al., 2014). L'Internet des Services consiste donc en la recherche des besoins et des méthodes de ventes et de distribution d'un service par le biais d'Internet, parfois appelé le « business web » (Kagermann et al., 2013; Kohler et Weisz, 2016; Sangmahachai, 2015).

Médias Sociaux

Les médias sociaux prennent une place de plus en plus importante dans les différentes entreprises désireuses de se connecter davantage à ses clients. Les plateformes telles que Facebook, LinkedIn et YouTube, les plateformes pour webinaires, les *posts* wiki, les blogs, les forums et les communautés en ligne offrent un nouveau mode d'interaction et de transaction entre les clients et les entreprises. Il s'agit d'un moyen de se connecter partout en tout temps, avec le client afin d'améliorer la relation avec celui-ci et améliorer sa marque et sa réputation au-delà des moyens de marketing standards (Avasant, 2016). Les médias sociaux permettent de mieux connaître les clients et leur niveau de satisfaction. Ils permettent de partager de l'information et augmenter la collaboration dans toute la chaîne de valeur. Aussi, outre le partage d'information bilatéral des médias sociaux, cet outil sert à étendre son réseau de contacts qui facilite la recherche des talents et des emplois. Ils permettent de gérer et mesurer les réponses-clients et offrir des services sur mesure et adaptés.

Poka est un exemple de service de médias sociaux utilisé en environnement industriel et développé en 2013 par deux entrepreneurs québécois. Cet outil numérique consiste en un réseau social industriel qui permet de partager de nombreuses vidéos de formation et processus, des informations de dernières minutes, des dessins d'ingénierie, etc. dans toute l'entreprise, en temps réel (Poka, 2017). Il réduit le nombre d'intervenants dans la

transmission d'information et s'assure que toutes les personnes concernées ont accès à la même et bonne information au moment voulu. En somme, comme la plupart des médias sociaux d'usage industriel, cette plateforme se base sur le principe d'écoute du client, de construction d'une relation de confiance et de l'offre d'un service de qualité et personnalisé (Weinman, 2015).

Commerce électronique

Le commerce électronique ou e-commerce, représente la possibilité pour les clients de sélectionner, assembler et commander une liste de produits à distance via une plateforme web qui est relié directement au système de gestion de l'organisation ou à son centre de distribution. La plateforme peut être du type *B2B* (*Business-to-Business*) ou *B2C* (*Business-to-Customer*). Elle offre l'avantage d'accéder à un plus grand marché de clients, de faciliter les communications, d'éliminer les entrées de données reliées aux soumissions et permet parfois au client, de faire le suivi de sa commande directement en ligne (Avasant, 2016).

2.2.5.5 Les outils numériques de l'Industrie 4.0 concernant l'organisation du travail

Réalité virtuelle / augmentée

Selon le HUB Institute (2017), la réalité augmentée représente la superposition en temps réel de couches virtuelles, en deux ou en trois dimensions, qui s'ajoutent à la réalité observée. Cette technologie permet d'ajouter des informations visuelles à la réalité par exemple, dans le but de faciliter les tâches de maintenance, d'assemblage, de pilotage d'un équipement, de design de produit, etc.

La réalité virtuelle quant à elle, représente un univers complètement imaginaire en trois dimensions qui n'est pas lié à la réalité observée (HUB Institute, 2017). Elle simule un environnement fictif dans lequel se retrouve un individu, dans le but de visualiser des phénomènes et y interagir. Elle permet notamment de faciliter la formation des employés

pour le pilotage d'équipement ou de simuler un nouvel environnement de travail ou encore, l'utilisation d'une nouvelle machine à acquérir ou à implanter.

La recension des outils numériques réalisée au Tableau 2.3 montre que certains outils sont cités plus souvent que d'autres par les auteurs. En effet, les technologies comme le Big Data, la Cybersécurité, l'Internet des Objets et l'infonuagique sont mentionnés dans plus de 60 % des cas, démontrant l'importance de la donnée dans la notion d'Industrie 4.0. Certaines autres technologies telles que les différents systèmes informatiques (ERP, MES, WMS, traçabilité, planification, CRM…), les véhicules guidés automatiquement, la mobilité, la communication M2M, l'intelligence artificielle, les médias sociaux et l'Internet des Services sont quant à elles, abordées dans moins de 25 % des cas. Également certaines technologies comme les logiciels informatiques, sont davantage associées à la troisième révolution industrielle plutôt qu'à la quatrième, expliquant leur maigre présence dans la littérature associée au 4.0.

La catégorisation de Blanchet (2016) permet de regrouper les outils numériques associés à l'Industrie 4.0 selon le lieu d'impact d'une technologie (conception des produits et processus, pilotage et contrôle, opérations de fabrication, etc.). Elle oriente, en ce sens, le choix d'une solution pour une entreprise dépendamment de son besoin. On note par ailleurs que les auteurs mentionnent plus fréquemment les outils numériques utiles pour le pilotage et le contrôle ainsi que les outils reliés aux nouveaux services offerts aux clients. Pour beaucoup, l'automatisation et les systèmes de production sont la base de l'Industrie 4.0. Ces outils ne semblent toutefois pas faire dominance aux solutions liées à la collecte, traitement et diffusion de la donnée.

2.2.5.6 Interrelations entre les technologies de l'Industrie 4.0

L'utilisation des différentes technologies numériques offre de nombreux avantages surtout lorsqu'elles sont mises en relation. Le modèle de *Kasetsart Energy and Technology Management Center* (Sangmachai, 2015) est présenté à la Figure 2.4 où il

est possible d'y voir l'architecture de l'Industrie 4.0 et les différentes notions qui ont été abordées jusqu'à maintenant.

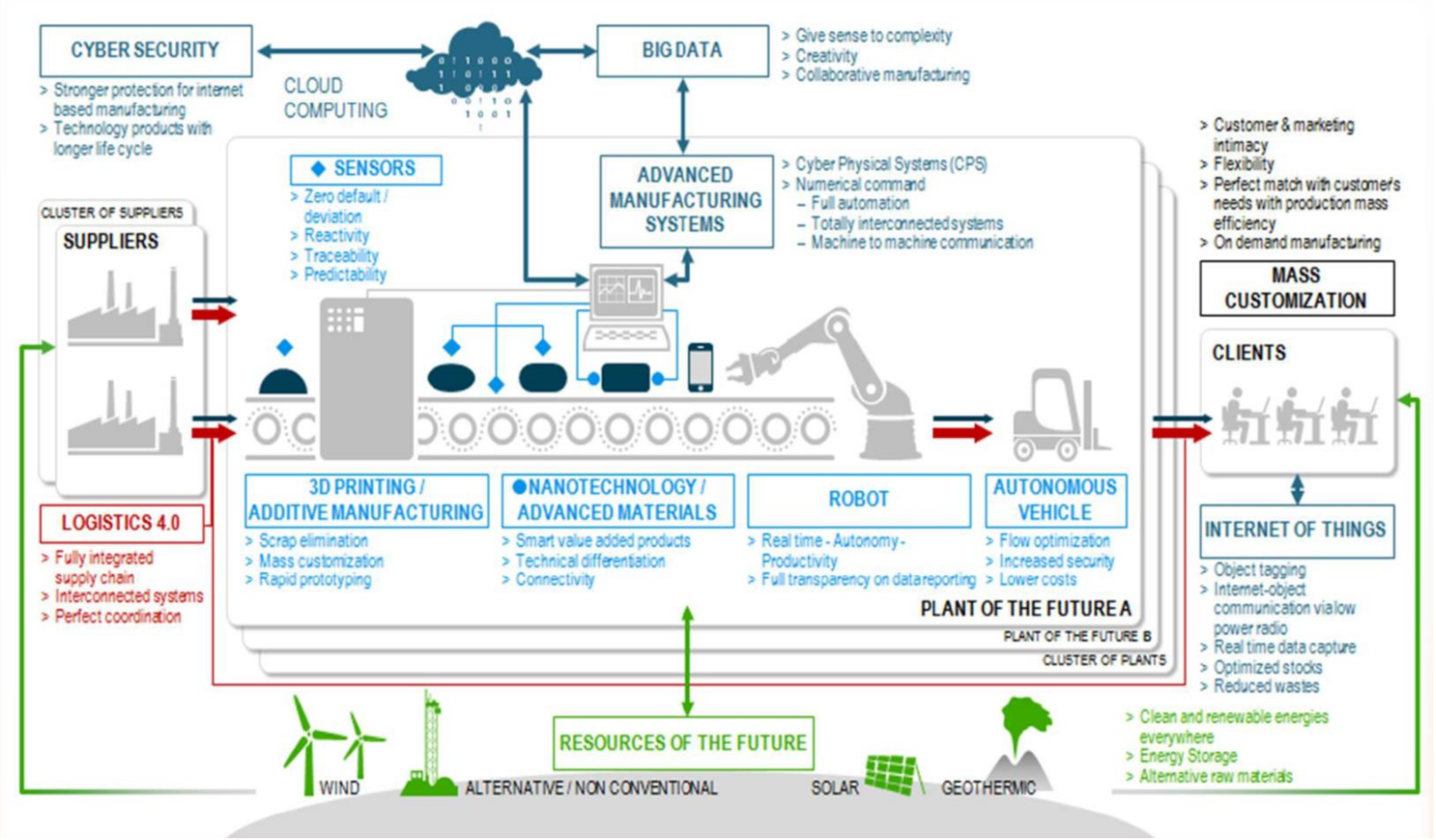


Figure 2.4 : Architecture de l'Industrie 4.0 *(Sangamachai, 2015)*

Les Systèmes Cyber-Physiques, l'infonuagique, l'Internet des Objets et l'Internet des Services sont, selon Hermann et al. (2015), la base des technologies de l'Industrie 4.0. Ces dernières interagissent entre elles pour former un système autonome, complet, proche du client et visant à la fois la productivité, l'optimisation et l'innovation.

L'approche client de l'Industrie 4.0 amène à créer des produits et des services selon un modèle d'affaires orienté expérience client. Par la participation active du client et de la communauté web dans le développement du produit, la conception se voit nourrie par ces sources externes et peut rapidement tester des produits et services avec la virtualisation, la simulation et la fabrication additive. Grâce à la standardisation et à la structure modulaire, inhérentes à l'Industrie 4.0, la conception des produits devient plus rapide, le temps de mise en marché est réduit et la personnalisation de masse devient accessible. Dans ce contexte, les systèmes cyber-physiques peuvent plus aisément contrôler les processus physiques, par exemple en créant une copie virtuelle du monde physique et en prenant des décisions décentralisées, par les bonnes personnes et machines et au bon moment (Hermann, Pentek et Otto, 2015).

En parallèle au processus de conception, des données sont accumulées dans le Big Data par l'utilisation de plusieurs services de la vie courante. Grâce à des outils comme le Data Mining et les nombreuses applications et algorithmes retrouvés dans le nuage, les entreprises tentent de discerner des habitudes, tendances, comportements dans la vie des clients et d'y saisir des opportunités d'affaires et d'amélioration de leurs produits, services, processus.

Une fois les produits envoyés en production, le système cyber-physique collecte les données grâce aux systèmes embarqués (capteurs, RFID, etc.) et les envoie en temps réel dans le nuage via l'Internet des Objets. Les données sont analysées à l'aide de logiciels et applications développés et hébergés dans le nuage. Les résultats d'analyse sont ensuite communiqués via le réseau de l'IoT dans le système cyber-physique soit à des machines pour qu'elles exécutent automatiquement les actions requises, soit à des humains pour des fins d'analyse plus poussées et d'aide à la décision, soit aux deux entités

susmentionnées. Les informations contenues dans le nuage tout comme les résultats des analyses, peuvent être envoyés à des managers, des opérateurs, des fournisseurs, etc. Cette communication et ce partage d'information permanents favorisent l'intégration et la coordination entre les acteurs du système. Cette « intelligence » contribue à l'optimisation de la production via notamment, des réductions de coûts, de pertes de temps et d'énergie. Aussi, les véhicules autonomes, les robots collaboratifs, les machines et tous les objets intelligents communiquent entre eux, prennent les bonnes décisions au bon moment et assurent une efficacité maximale. Toutes les décisions et informations prises sur le terrain sont emmagasinées dans des systèmes MES, ERP, hébergés dans le nuage pour favoriser la coordination et la prise de décisions éclairées, ce qui permet de conserver un historique exhaustif de la production.

Recouvert par une toile de cybersécurité axée sur la résilience, la privatisation de l'information, la prévention des attaques et la détection d'intrusions, tous ces échanges d'information peuvent se faire sans risques. La question de la sécurité et de la propriété intellectuelle et du savoir-faire, demeure encore aujourd'hui une problématique non totalement résolue. Des recherches et des développements plus étendus doivent par ailleurs être faits en ce sens pour éviter les éventuels problèmes.

Pour cette recherche, l'Industrie 4.0 est alors définie comme *l'utilisation des technologies numériques et des données en temps réel pour améliorer la prise de décision, l'efficacité et l'agilité de ses processus administratifs et opérationnels, tout en permettant la personnalisation de masse, tant au niveau des produits que des services offerts à ses clients.*

2.3 Partie 2. <u>La cible</u> : La PME manufacturière

Sommer (2015) affirme que l'Industrie 4.0 n'encourage que les grandes entreprises. Selon l'auteur, cette révolution pourra avoir comme conséquence d'augmenter le fossé entre les PME et les grandes industries. En effet, les PME ont généralement moins de ressources et de connaissances vis-à-vis les dernières tendances technologiques (Bendis,

2004). Le manque de numérisation des procédés et la faible performance pourraient éventuellement affecter les PME par rapport à leurs concurrents internationaux comme Amazon et Google. Sommer (2015) affirme que les PME ne sont pas encore prêtes à faire le saut de la quatrième révolution industrielle. Un sondage auprès de 2000 entreprises démontre que les PME manquent d'information par rapport à cette nouvelle révolution. De plus, elles ne se sentent pas soutenues par le gouvernement, ne savent pas comment et par où commencer et n'ont pas confiance dans la sécurité et la protection des données.

Il existe néanmoins de nombreux avantages issus de l'Industrie 4.0 qui peuvent contribuer au développement économique de la PME manufacturière. Il convient alors de définir ce qu'est une PME, les caractéristiques qui lui sont propres ainsi que l'importance de l'agilité organisationnelle et opérationnelle dans les PME.

2.3.1 Définition et caractéristiques d'une PME

La définition des PME varie dépendamment de l'auteur qui traite du sujet ainsi que du secteur géographique. En ce sens, plusieurs critères, autant quantitatifs que qualitatifs, peuvent être utilisés pour décrire une PME.

Selon l'Organisation de Coopération et de Développement Économique (OCDE), la PME possède entre 10 et 249 employés et génère moins de 50 millions d'euros annuellement. Au Canada, une PME est considérée comme une entreprise dont le nombre d'employés est inférieur à 500 et dont le chiffre d'affaires ne dépasse pas 50M$. Malgré la valeur frontière entre la moyenne et la grande entreprise qui varie entre l'Europe et le Canada, on remarque au Tableau 2.4 que plus de 97 % des PME au Québec emploient moins de 100 employés (Statistique Canada, 2015).

Tableau 2.4 : Nombre d'entreprises avec employés selon la taille de l'entreprise, décembre 2015 (nombre d'employés) (Statistique Canada, 2015)

Nombre d'employés	Pourcentage cumulatif des entreprises avec employés	Nombre d'emplacements avec employés		
		Total	Secteur des biens	Secteur des services
1-4	54,1	632 460	143 481	488 979
5-9	73,5	226 412	47 912	178 500
10-19	86,2	147 823	27 415	120 408
20-49	95,1	103 607	19 547	84 060
50-99	97,9	33 328	7 185	26 143
Petites (1-99)	97,9	1 143 630	245 540	898 090
100-199	99,1	14 284	3 554	10 730
200-499	99,7	7 131	1 788	5 343
500+	100	2 933	569	2 364
Total		1 167 978	251 451	916 527

Dans le secteur de fabrication au Canada en 2015, le Tableau 2.5 montre que 19 602 entreprises sur 50 902 (38,5 %) employaient entre 10 et 99 employés. Les microentreprises (1 et 4 employés) et très petites entreprises (5 et 9 employés) étaient dénombrées à 17 768 (34,9 %) et 10 119 (19,9 %) respectivement dans le même rapport. Les entreprises employant entre 100 et 499 employés étaient du nombre de 3 121 (6,1%) et celles avec plus de 500 employés, de 292 (0,6 %). Dans l'Enquête sur la population active publiée par Statistique Canada (2015), on constate que 49,4 % des emplois dans le domaine de la fabrication se trouvent dans les entreprises de 1 à 99 employés.

Tableau 2.5 : Nombre d'entreprises avec employés dans le secteur de la fabrication selon le nombre d'employés, décembre 2015 (Statistique Canada, 2015)

Nombre d'employés	Entreprises avec employés
Total	50 902
1-4	17 768
5-9	10 119
10-19	8 202
20-49	7 842
50-99	3 558
Petites (1-99)	47 489
100-199	1 987
200-499	1 134
Moyenne (100-499)	3 121
500+	292

Hormis ces critères quantitatifs, Bendis (2004) a décrit la PME comme une entreprise orientée vers les marchés de niche, la recherche d'avantages et de financement gouvernementaux et le développement de partenariats. Selon l'auteur, les entreprises sont continuellement affectées par le développement continu et le coût élevé des nouvelles technologies, par une main-d'œuvre rare et diversifiée, par le besoin d'innovation continue, par la globalisation de l'économie et *par le manque de ressources humaines, matérielles et financières*. La petite taille des entreprises est alors parfois nuisible aux PME, surtout en raison du manque de ressources. Toutefois, leur structure organisationnelle souple, leur vitesse de réponse à l'environnement, la qualité de leur service à la clientèle et leur style de gestion aplati, leur donne accès à une *flexibilité* et une *proximité* élevées avec leurs clients (Man et al., 2002). Selon Man et al. (2002), les PME sont caractérisées par leur compétitivité, leur dynamisme, leur créativité, leur souplesse et l'ambiance de travail familial. Leur succès est favorisé par un financement suffisant, l'accès à l'information et par de bonnes pratiques d'affaires. Un comparatif des forces et faiblesses de PME est présenté au Tableau 2.6. Il permet de mettre en

exergue les différentes caractéristiques des PME dans un environnement numérique et de concurrence mondiale.

Tableau 2.6 : Caractéristiques principales des PME

Faiblesses	**Forces**
Manque de ressources financières (Bendis, 2004)	Flexibilité organisationnelle et opérationnelle (Man et al., 2002)
Difficulté à recruter de la main-d'œuvre (Bendis, 2004)	Proximité avec les clients (Man et al., 2002)
Souvent éloignée des grands centres	Accès à du financement gouvernemental (Bendis, 2004)
Pas ou peu d'accès aux économies d'échelle	Structure organisationnelle souple (Man et al., 2002)
Manque de connaissances techniques et académiques (nouvelles technologies, nouveaux modes de gestion, etc.) (Mœuf, 2018)	Vitesse de réponse à l'environnement (Man et al., 2002)
Centralisation du pouvoir et des décisions (Mœuf, 2018)	Engagement et impact de la direction (Mœuf, 2018)
Manque de stratégie à long terme (Mœuf, 2018)	Créativité et innovation très présentes (Man et al., 2002)
	Polyvalence des employés

Pour résumer, les PME sont considérées ici comme *des entreprises embauchant entre 10 et 99 employés, possédant des connaissances et ressources qui sont limitées et qui doivent faire appel à l'innovation, au travail d'équipe ainsi qu'à l'agilité manufacturière et organisationnelle pour répondre au marché et faire face à la concurrence mondiale*. Pour rappeler les types de stratégies organisationnelles de Miles et Snow (1991), la plupart des entrepreneurs des PMEM québécoises sont de type prospectif ou analytique. Les types défenseurs sont davantage associés à des entreprises de moyennes et grandes tailles en raison de leur niveau d'investissement élevé dans les équipements de production et la standardisation de leurs produits (Raymond et Croteau, 2009). Pour les PMEM, les notions d'agilité organisationnelle et opérationnelle deviennent des concepts pertinents car ils permettent aux entreprises de s'adapter face à un environnement dynamique, imprévisible et turbulent (Nagel et al., 1991). La

prochaine section traite alors de ces notions comme solutions potentielles à la réalité des PME manufacturières.

2.3.2 Agilité organisationnelle et opérationnelle

Dans un environnement de plus en plus numérique et pour développer un avantage concurrentiel, les PME doivent continuellement innover tant au niveau de leurs produits et services que de leurs processus (CEFRIO, 2016). Comme l'a démontré le CIFREG (2015), l'agilité dans l'organisation, mais aussi au niveau des opérations, devient nécessaire aux entreprises pour générer de la valeur et se démarquer de la concurrence. La présente section met en évidence les notions d'agilité étudiées chez plusieurs auteurs.

2.3.2.1 Agilité organisationnelle

Le CIFREG (2015) définit l'agilité comme un synonyme d'adresse et de vivacité. Plus exactement, l'agilité est souvent présentée comme « la capacité d'une entreprise à croître dans un environnement marqué par un changement continu et imprévisible, caractérisé par une demande client axée sur la qualité, la performance, les faibles coûts et les produits et services correspondant aux exigences des consommateurs » (Nagel et Dove, 1991; Goldman, 1994; Barzi, 2011). Le construit d'agilité organisationnelle a évolué au cours des années vers de nombreuses définitions, mais un consensus obtenu entre les années 1990 et 2000 permet d'identifier quatre composantes de l'agilité organisationnelle (Crocitto & Youssef, 2003; Lin et al., 2006; Sharifi et al., 2001; Sharifi & Zhang, 1999). Ces composantes sont la réactivité, la rapidité, la flexibilité et les compétences.

Réactivité – ou la réponse à un changement

Sharifi et al. (2001) définissent la réactivité comme la capacité à identifier et anticiper les changements de l'environnement et à y répondre de manière réactive et proactive. De leur côté, Zaheer et Zaheer (1997) l'ont plutôt définie comme la rapidité de réponse d'une entreprise aux signaux et changements environnementaux. Face à une pression externe, une situation donnée ou un changement dans l'environnement, Oliver (1991) a

identifié cinq comportements types des entrepreneurs, à savoir l'acceptation, le compromis, l'évitement, la défiance et la manipulation. Le choix de l'un de ces comportements face à un changement représente la réactivité de l'entreprise à un moment donné. Selon Oliver (1991), l'acceptation représente l'absence d'action ou de réaction, l'obéissance aveugle ou non à une demande ou l'imitation. Le compromis représente l'apport d'une contrepartie lors d'un choix ou d'un changement. La contrepartie peut être représentée par la recherche de parité ou de l'offre ou du gain d'une compensation. L'évitement évoque la dissimulation, la fuite ou le changement complet d'orientation. La défiance représente une forme de résistance active due à l'ignorance de la situation ou par une réaction opposée à ce qui est attendu. Enfin, la manipulation représente l'action de tourner la situation à son avantage en utilisant la persuasion, l'influence ou le contrôle d'éléments externes causant le changement donné.

En somme, la réactivité représente la manière d'identifier, d'anticiper et de traiter une information issue d'un changement ou d'une situation donnée incluant la réponse choisie pour y faire face.

Rapidité – ou la vitesse de prise de décision

La rapidité issue de l'agilité organisationnelle provient principalement de la définition donnée par Eisenhardt en 1989. L'auteur définit la rapidité comme le délai pour prendre une décision et la mettre en œuvre. Il base ses travaux sur cinq hypothèses. La première hypothèse stipule que le contrôle d'indicateurs de performance en temps réel permet de voir rapidement des défaillances et accélère l'identification du problème et la mise en œuvre des solutions. La deuxième hypothèse met en exergue qu'une prise en compte simultanée de plusieurs alternatives améliore la vitesse et la qualité d'une prise de décision. Ceci s'explique notamment par son opposé qui tend à étudier séquentiellement des informations ou à négliger l'étude de certaines données pertinentes. La troisième hypothèse défend qu'un nombre limité de décideurs accélère la prise de décision, mais seulement si un ou plusieurs membres de l'équipe possède(nt) une expérience élevée dans le domaine. La quatrième hypothèse montre l'importance d'une gestion de conflit

saine et efficace pour améliorer la vitesse et la qualité d'une prise de décision. Enfin, la cinquième hypothèse propose qu'une intégration de plusieurs solutions ensemble dans un plan stratégique, tactique ou opérationnel tend à améliorer la vitesse de décision et de déploiement de chacune de ces solutions.

Trente ans après la publication de l'article d'Eisenhardt, on remarque que l'agilité est encore toute aussi pertinente dans l'industrie. La gestion efficace de l'information et la mise en œuvre des décisions ne peuvent toutefois pas se faire sans un équipement suffisamment flexible pour s'adapter au changement. C'est là qu'intervient la notion de flexibilité.

Flexibilité – ou la capacité de s'adapter aux changements

Huang et Cullen (2001) définissent la flexibilité organisationnelle comme la manière de maintenir l'équilibre entre l'environnement externe et l'organisation ou, à la manière de s'adapter aux variations de la demande interne et externe. Concrètement, il s'agit de se procurer des ressources (main-d'œuvre, équipements, logiciels…) polyvalentes et adaptables aux besoins changeants de l'organisation. Selon Simard et al. (2000), une décentralisation des prises de décisions, une meilleure communication et un contrôle orienté vers l'autonomie des ressources humaines grâce notamment à une gestion par atteinte d'objectifs et de résultats, contribuent à la flexibilité organisationnelle et offrent aux entreprises un environnement permettant l'accroissement des compétences et l'aplatissement des structures organisationnelles. Dans un environnement hautement numérique, la flexibilité d'une organisation lui permet d'externaliser des tâches et compétences non directement rattachées au cœur de l'entreprise, en réorganisant la structure de cette dernière et en faisant appel aux travailleurs externes (sous-traitants et consultants) (Roy et Audet, 2002). Roy et Audet (2002) expliquent que la formation des employés à plusieurs postes de travail, le recours à la sous-traitance ou l'impartition, l'utilisation de comités d'amélioration continue, la rotation des tâches, les méthodes de qualité totale, la réduction ou la décentralisation de la structure décisionnelle, le juste-à-temps et le recours aux employés temporaires et au télétravail ont amené les entreprises

à augmenter significativement leur flexibilité. La Figure 2.5 présente les axes de transformation d'une organisation, proposées par Roy et Audet. Cette figure montre qu'une organisation peut choisir d'améliorer sa flexibilité externe en faisant appel à la sous-traitance ou l'impartition par exemple ou augmenter sa flexibilité interne en utilisant les nouvelles technologies, le télétravail, des employés temporaires ou des outils typiques d'amélioration continue. Le niveau de contrôle de la performance s'impose ensuite en fonction des orientations de l'organisation. Dépendamment de la combinaison Flexibilité-Contrôle, les entreprises se retrouvent donc dans l'une des quatre catégories suivantes : organisation en réseau, organisation virtuelle, organisation allégée ou organisation en équipes (Roy et Audet, 2002). Les auteurs présentent des exemples des quatre catégories, mais défendent que le but de chacune d'entre elles soit d'accroître leur flexibilité pour améliorer l'efficacité et l'efficience des organisations, en fonction de leurs enjeux et objectifs et ce, en s'éloignant du modèle de bureaucratie moderne.

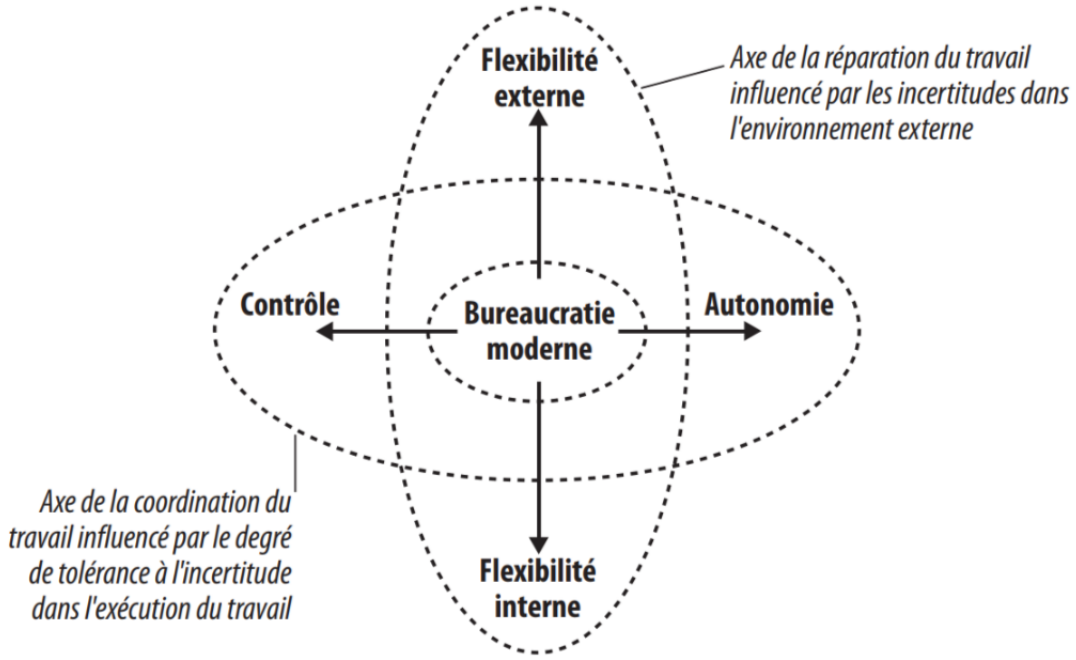


Figure 2.5 : Axes de transformation d'une organisation flexible (Roy et Audet, 2002)

Simplement, on peut résumer la flexibilité comme la capacité à mettre en œuvre les réponses aux changements de l'environnement. Ceci ne peut toutefois se faire sans des employés compétents, polyvalents qui maîtrisent la culture agile, les technologies et les processus. La prochaine section se concentre pour cette raison sur les notions de compétences dans le contexte d'agilité organisationnelle.

Compétences – ou les capacités humaines face au changement

Selon Prahalad et Hamel (1990), le terme « compétence » représente principalement l'apprentissage collectif dans une organisation. Ces derniers mettent l'accent sur les méthodes de coordination des tâches et l'intégration des technologies et des nouvelles tendances dans les pratiques d'affaires. De son côté, Ferrante (2006) définit les compétences comme un ensemble évolutif de capacités qui permettent d'atteindre des objectifs organisationnels de façon efficace et efficiente. Enfin, pour reprendre la définition employée dans la section 2.2.5, les compétences peuvent aussi être définies comme l'ensemble des connaissances, habiletés et attitudes des individus qui favorisent l'exécution d'une tâche (Caldeira et Ward, 2003).

Dans le domaine de l'agilité organisationnelle, il existe deux courants de pensée concernant les compétences des individus, à savoir les compétences centrales (Prahalad et Hamel, 1990) et les compétences dynamiques (Teece et al., 1997). L'étude de Prahalad et Hamel (1990) montre que les compétences centrales sont composées de trois éléments. D'abord, une compétence centrale permet l'accès potentiel à de larges marchés. Ensuite, elle doit apporter une valeur significative pour le client et finalement, elle doit être difficile à imiter par les concurrents. Il serait difficile ici de ne pas faire le lien avec la théorie des ressources de Barney (1991) où une ressource doit être rare, porteuse de valeur, difficile à imiter ou à remplacer.

Les compétences dynamiques, quant à elles, peuvent être définies comme la capacité d'une organisation à intégrer, construire et reconfigurer ses compétences internes et externes pour répondre rapidement aux changements de l'environnement (Nijssen et

Paauwe, 2012). Ainsi, pour être agiles, les firmes doivent à la fois développer des compétences centrales à ses activités, mais doivent aussi anticiper et gérer le changement au niveau des besoins de compétences de ses travailleurs au fil du temps.

La recension des écrits a permis de démontrer les éléments liés à l'agilité organisationnelle, mais aussi que ces composantes sont encore aujourd'hui d'actualité dans les PME. Dans un contexte d'Industrie 4.0, l'agilité organisationnelle n'est toutefois pas suffisante à elle seule et requiert en ce sens, une agilité supplémentaire, soit au niveau des opérations.

2.3.2.2 Agilité opérationnelle

L'agilité opérationnelle est définie par Chelli (2003) comme « la capacité de l'entreprise à se reconfigurer pour s'adapter aux sollicitations toujours nouvelles des parties prenantes (clients, fournisseurs, gouvernements, etc.) dont dépendent son développement, sa rentabilité et son fonctionnement ». Pinel (2006) explique que l'agilité opérationnelle va au-delà de l'adaptation à l'environnement issue du modèle de Porter (1979); le but de ce type d'agilité est d'être davantage proactif tout en maintenant un climat d'*innovation continue* et stratégique et permettant ainsi de se démarquer de la concurrence. Ainsi, en plus des notions de réactivité, de vitesse, de flexibilité et de compétences, les auteurs soulèvent également la notion d'innovation continue.

L'arrivée des technologies dans le milieu manufacturier offre des opportunités nouvelles telles que l'automatisation des tâches à non-valeur ajoutée par des équipements et logiciels agiles. Ces opportunités permettent aux entreprises de s'adapter rapidement aux changements et aux variations de l'environnement (Gimélec, 2014). Les outils présentés dans la section 2.2.5 sont justement des exemples de technologies qui permettent aux industriels de gagner en efficacité, en efficience et en agilité au niveau des opérations.

En élargissant la définition de l'agilité organisationnelle au niveau opérationnel, l'agilité se concrétise par une capacité d'adaptation aux changements, réalisable grâce à l'innovation continue et à une utilisation des technologies flexibles et reconfigurables.

Une prise de décision rapide et efficace et la mise en place d'un système d'information pertinent et en temps réel, contribuent aussi à l'agilité. Comme Abdul-Nour et al. (1999) l'ont toutefois démontré, l'agilité ne s'atteint pas sans un contrôle initial de ses processus et la réduction des gaspillages. Le *lean manufacturing* est souvent la première étape qui permette de mieux contrôler ses processus tant en production qu'hors production et détecter et éliminer les sources de gaspillage (Tortorella et Fettermann, 2018). Le *lean manufacturing* accompagné d'une utilisation efficace des technologies amènent à une flexibilité dans l'organisation et à une meilleure efficience dans l'utilisation des ressources. L'agilité opérationnelle peut ensuite être atteinte pour répondre à la demande de personnalisation de masse, principe clé dans l'Industrie 4.0 (Kohler et Weisz, 2016).

Comme il a été vu dans la section 2.2., l'Industrie 4.0 prend ses racines du besoin des entreprises à gagner en efficacité et en flexibilité pour répondre aux exigences de la personnalisation de masse. L*'agilité organisationnelle et opérationnelle représente alors les bases qui permettent aux petites et moyennes entreprises d'évoluer dans l'environnement issu de l'Industrie 4.0*. Elle permet également de prendre des décisions plus rapidement et plus efficacement. L'agilité opérationnelle permet quant à elle, de s'équiper de machines et systèmes qui s'adaptent facilement et rapidement à la demande des clients.

2.3.3 État des PMEM québécoises au niveau du numérique

Via l'étude des résultats de 148 cartographies de chaînes de valeur effectuées dans des PME québécoises, Gamache et al. (2017) ont démontré que la plupart des entreprises manufacturières de petite et moyenne taille n'avait pas totalement adhéré à l'ère de l'Industrie 4.0. Selon les résultats de l'étude, seulement près du tiers des entreprises cartographiées employaient des outils informatiques tels que les ERP ou MES. L'étude soulève également que l'absence de données pertinentes relatives à une gestion en temps réel et le manque d'outils de planification de la production, des aménagements d'usine inadéquats, l'absence de systèmes d'assurance qualité et l'intégration insuffisante des

notions du Juste-À-Temps, démontrent le retard des entreprises quant à leur transformation numérique. Le projet de cartographie avait comme intérêt de mettre en évidence les opportunités d'amélioration des processus des entreprises pour gagner en efficacité, flexibilité et agilité, démontrant l'intention des entrepreneurs à demeurer compétitif. On remarque toutefois un manque de ressources pour le faire.

Dans la même lignée, un rapport du CEFRIO publié en 2017 traite des outils de l'Industrie 4.0 qui sont les plus présents et maîtrisés dans les industries québécoises. Ce rapport montre que les suites bureautiques telles que celle de Microsoft (Word, Excel, Powerpoint, etc.), les sites web informationnels, les logiciels de dessins, les progiciels de gestion et les médias sociaux sont les outils numériques les plus largement utilisés avec des pourcentages respectifs de 71 %, 53 %, 46 %, 34 % et 30 % sur un échantillon de 312 entreprises. Les systèmes de production flexibles (FMS), les systèmes de gestion du cycle de vie des produits (PLM), l'intelligence d'affaires (BI), les systèmes de gestion d'entrepôt (WMS), les robots, les systèmes d'exécution de la production (MES), le Web Analytics, les sites web transactionnels et les systèmes de gestion de la relation client (CRM) sont quant à eux, utilisés dans moins de 18 % des cas. Le CEFRIO explique que l'accès limité à l'Internet haute vitesse et le manque de connaissance du numérique dans les entreprises en région posent un frein au passage au numérique. Les entreprises qui ont intégré quelques outils numériques ont par ailleurs mentionné dans 54 % des cas, avoir ressenti des effets positifs significatifs sur leurs activités quotidiennes au niveau de la conception et de la fabrication des produits.

En France, Mœuf et al. (2018) ont démontré que la plupart des technologies du 4.0 employées dans les entreprises étaient surtout celles avec un coût d'acquisition plus faible telles que l'Internet des Objets, l'Infonuagique et les systèmes de simulation. Les plus gros systèmes tels que les outils du Big Data, les Systèmes Cyber-Physiques, les robots collaboratifs, le M2M et la réalité virtuelle sont jugés trop dispendieux par rapport au retour sur investissement et requièrent trop de changements internes.

En comparaison avec la littérature, il est possible de voir que les PME manufacturières québécoises vivent des défis similaires aux autres PME, notamment au niveau du manque de connaissances et de ressources. Le faible niveau d'exploitation des données des PME québécoises ainsi que le peu d'effort entrepris dans les activités *lean* démontrent que la transformation numérique ne fait que débuter. La littérature montre clairement que le numérique comporte un potentiel de développement important pour les PME, mais cette sensibilisation ne semble pas avoir totalement atteint la PME manufacturière. Le développement de stratégies et l'apport de connaissances au niveau des facteurs d'influence du 4.0 et des outils existants devraient apporter de l'aide aux PME pour poursuivre, voire entamer, leur transformation numérique.

2.4 Partie 3. La méthode : la transformation numérique

La transformation numérique peut être définie par la méthode utilisée pour intégrer les technologies numériques dans ses pratiques d'affaires (HUB Institute, 2017). Selon le CEFRIO (2016), le HUB Institute (2017) et Little (2017), la planification stratégique avec des objectifs clairs, le contrôle de ses processus grâce au *lean manufacturing* et une connaissance du numérique, sont des prérequis à la transformation numérique. Ces éléments seront alors brièvement présentés dans les prochaines lignes. Ensuite, l'étude des mots-clés les plus fréquemment associés à la transformation numérique permettra de présenter les composantes principales de la transformation numérique. La méthode proposée par le HUB Institute pour implanter la transformation numérique sera subséquemment présentée. Puis, les notions de performance organisationnelle et de performance numérique seront abordées, suivies de l'étude des notions de la chaîne de valeur de Porter.

2.4.1 Prérequis à la transformation numérique

2.4.1.1 Planification stratégique

La Banque de Développement du Canada (2018) a défini la planification stratégique comme l'exercice de mise en place d'une saine stratégie d'affaires qui permet de guider

ses décisions et ses actions dans un but de croissance à long terme. Selon la BDC, une planification stratégique doit inclure :

- la préparation et l'évaluation préliminaire de sa situation, de ses attentes, de ses enjeux et la portée de la planification;
- la définition de sa vision actuelle et une analyse de ses forces, de ses faiblesses, de ses opportunités et de ses menaces;
- une revue de sa vision, de sa mission, de ses objectifs d'affaires et les priorités stratégiques;
- l'établissement de plans opérationnels orientés vers des actions concrètes;
- les prévisions financières pour évaluer la rentabilité estimée de la planification stratégique;
- l'élaboration d'un plan d'action pour une période de 12 à 24 mois.

Le HUB Institute (2017) affirme que la planification stratégique est nécessaire pour donner une orientation à l'entreprise, mais aussi pour rendre les décisions et les investissements rentables et efficaces.

2.4.1.2 Optimisation des processus

Tel que présenté par le CIGREF (2015), la personnalisation de masse, proposée par l'Industrie 4.0, est possible grâce à la flexibilité opérationnelle et à un délai de réaction rapide, autrement dit, grâce à l'agilité opérationnelle. Comme l'ont démontré Abdul-Nour et al. (1999), l'agilité manufacturière passe par les outils du *lean manufacturing* le contrôle total de la qualité, l'aménagement cellulaire, la maintenance, la réduction des temps de mise en course, l'élimination des gaspillages, l'amélioration continue, les Kaizen, les Kanbans et les petits lots de production. Les principes de réduction des gaspillages et de l'amélioration continue deviennent donc nécessaires pour les entreprises désirant aller dans la direction du 4.0.

2.4.2 Composantes de la transformation numérique

Par la recherche d'articles scientifiques comportant le mot-clé « Digital transformation », la base de données SCOPUS fournit 591 résultats. Dans ces articles, certains mots-clés reviennent régulièrement. Le Tableau 2.7 présente les principaux mots-clés qui ressortent de cette recherche.

Tableau 2.7 : Mots-clés associés à la transformation numérique

Mot-clé	**n**	**%**	**Mot-clé**	**n**	**%**
Information system	87	14,7 %	Commerce	21	3,6 %
Big Data	58	9,8 %	Innovation	19	3,2 %
Industry 4.0	55	9,3 %	Knowledge management	17	2,9 %
Internet of Things	51	8,6 %	Cloud computing	16	2,7 %
Digital technologies	41	6,9 %	Business models	14	2,4 %
Information management	40	6,8 %	Cyber-Physical Systems	12	2,0 %
Manufacture	40	6,8 %	Supply Chains	12	2,0 %
Digitalization	35	5,9 %	Cybersecurity	7	1,2 %
Artificial intelligence	26	4,4 %	Agile Manufacturing Systems	6	1,0 %
e-learning	26	4,4 %	Strategic Planning	6	1,0 %

Dans le Tableau 2.7, il est possible de distinguer deux types d'éléments, à savoir : (1) des outils numériques et (2) des pratiques d'affaires. Cette distinction a d'ailleurs été faite à la section 2.2 où le Tableau 2.2 présente les pratiques d'affaires liées à l'Industrie 4.0 et où le Tableau 2.3 montre les outils numériques. En comparant les Tableaux 2.2, 2.3 et 2.7, on remarque que les mêmes termes sont utilisés. Il est donc possible de poser comme hypothèse que les pratiques d'affaires et outils numériques associés à l'Industrie 4.0 sont les mêmes que pour la transformation numérique. Ainsi, la Figure 2.6 présente l'importance relative accordée aux outils numériques présentés dans le Tableau 2.3 alors que la Figure 2.7 présente l'importance relative accordée par les auteurs du Tableau 2.2 en rapport aux pratiques d'affaires qui permettent la mise en œuvre de la transformation numérique.

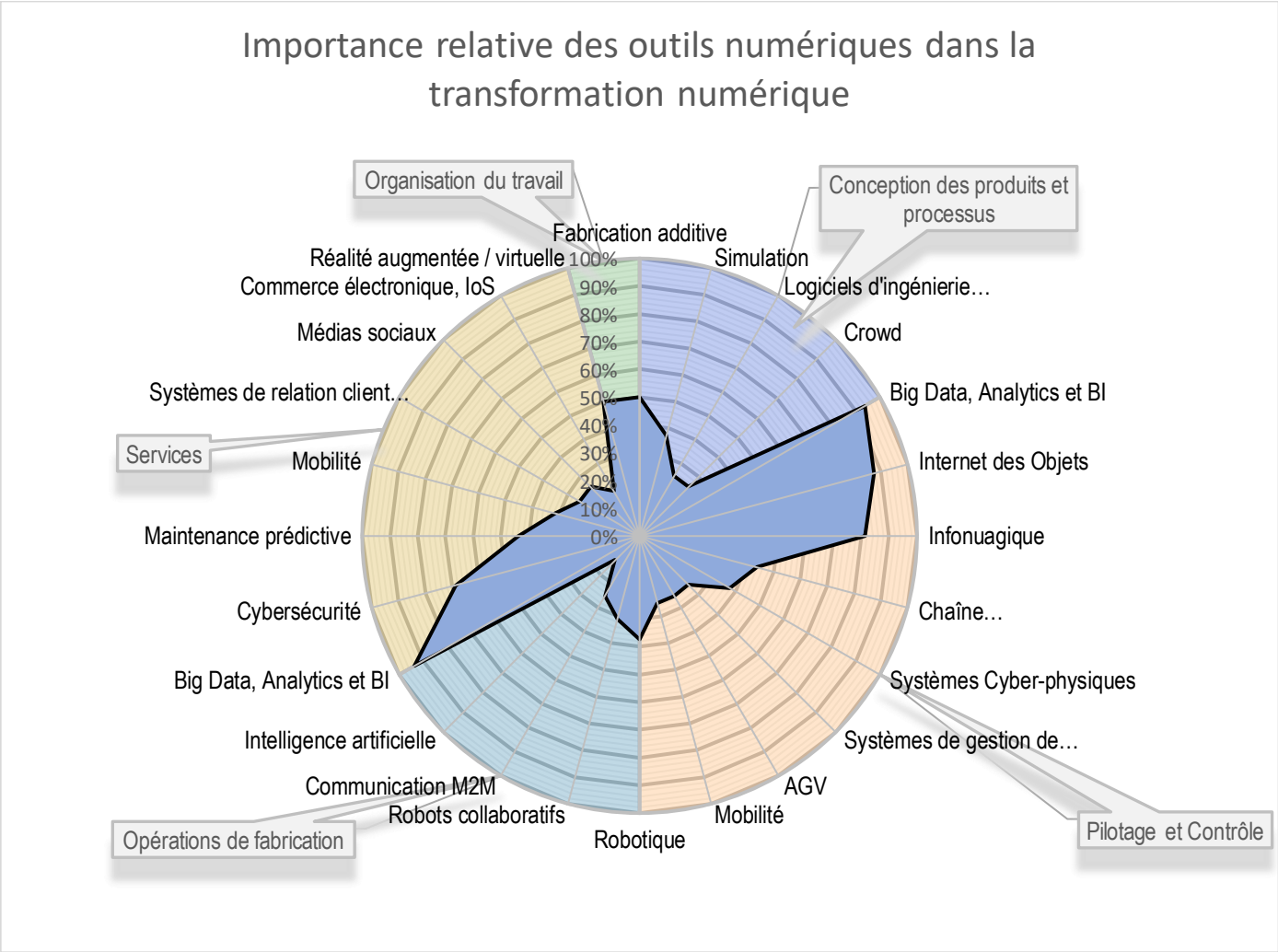


Figure 2.6 : Outils associés à la transformation numérique

La Figure 2.6 met en évidence que les outils comme le Big Data et l'analytique, l'intelligence d'affaires, l'Internet des objets, l'infonuagique et la cybersécurité reviennent dans plus de 80 % des ouvrages consultés (Tableau 2.3). Les logiciels de simulation, les outils de gestion des chaînes d'approvisionnement intelligentes, les systèmes cyber-physiques, l'utilisation de robots, la maintenance prédictive, la réalité virtuelle et augmentée et la fabrication additive sont quant à eux, discutés dans 38 % à 50 % des cas. Les autres outils semblent moins abordés dans la littérature. Le regroupement des outils du 4.0 de Blanchet (2016) repose sur le besoin de se ramener à l'objectif au moment du choix d'une technologie numérique. Une entreprise qui cherche à améliorer le pilotage et le contrôle de son usine optera alors pour les outils numériques faisant partie de ce groupe.

La Figure 2.7 présente l'importance relative des pratiques d'affaires au niveau de la transformation numérique. Cette dernière montre que les pratiques d'affaires les plus importantes dans la littérature tournant autour de la transformation numérique sont la vision et la stratégie, l'acquisition et le développement des compétences, l'agilité et l'innovation, la cybersécurité, la maîtrise des outils numériques et l'utilisation stratégique et opérationnel des données. Ces pratiques sont notamment soulevées dans plus de 44 % des ouvrages consultés. Néanmoins, bien que démontrant une importance moins marquée, les autres pratiques d'affaires qui revenaient dans au moins de 5 % des cas ont également été notées. Ces pratiques sont la cocréation et l'innovation ouverte, la communication interne, le commerce électronique et le marketing numérique, l'écosystème et l'architecture numérique, l'engagement et l'exemplarité, la gestion des données, la gestion du changement, l'investissement et le déploiement de ressources, le développement de nouveaux modèles d'affaires, l'organisation du travail, l'orientation service, l'ouverture à l'externe, la personnalisation et les activités de veille technologique.

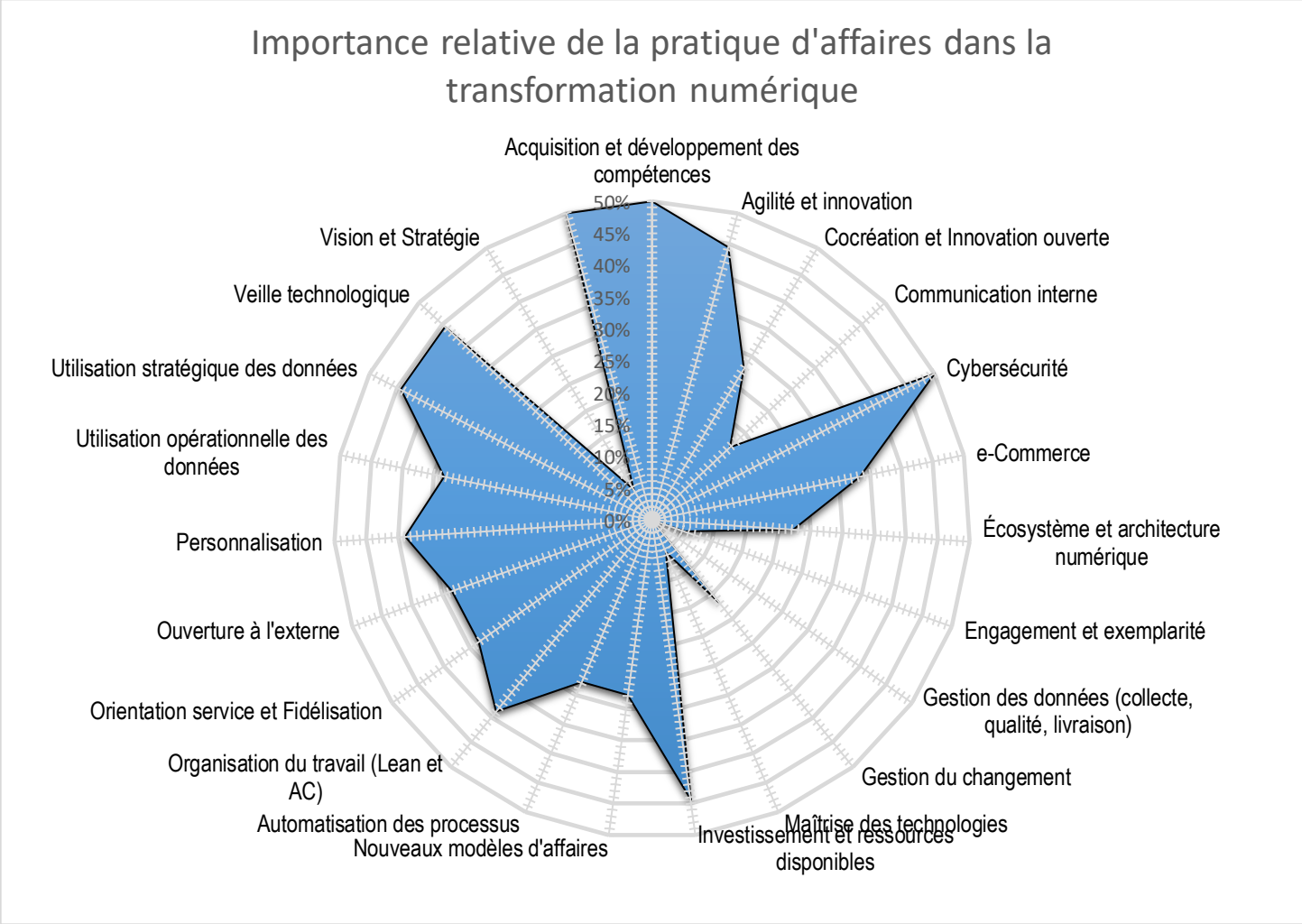


Figure 2.7 : Pratiques d’affaires de la transformation numérique

La division des outils numériques et des pratiques d'affaires est nécessaire pour comprendre la manière qu'une entreprise peut exécuter sa transformation numérique. Cette distinction n'est pas toujours claire dans la littérature, mais est importante dans cette recherche. La transformation numérique est alors définie dans cette recherche comme la *méthode* utilisée par une entreprise pour exécuter son passage à un environnement numérique. Le HUB Institute propose d'ailleurs une méthodologie spécialement conçue pour aider les entreprises à passer à un environnement numérique.

2.4.3 Méthode du HUB Institute

Le HUB Institute (2017) présente une approche en cinq étapes qui permet de faciliter le succès de la transformation numérique d'une entreprise. Les étapes sont les suivantes :

1. **auditer** : l'audit représente selon les auteurs, l'étape de prise de connaissance de son état actuel. Cette étape permet de mesurer l'état d'une entreprise en fonction de ses capacités organisationnelles et opérationnelles, de la maîtrise de ses processus administratifs, productifs et informatifs et de ses ressources technologiques et humaines afin de faire ressortir les forces et les opportunités d'amélioration. Cette étape permet alors d'établir les priorités de l'entreprise en fonction de ses enjeux, du contexte interne et externe et des préséances pour ainsi, passer à la seconde étape de la transformation numérique à savoir, la planification;
2. **planifier** : l'étape de la planification évoque le développement d'un plan détaillé des différents projets d'amélioration, priorisés en fonction de leur niveau d'urgence, de la disponibilité des ressources matérielles, humaines, financières et temporelles et de la préséance respective des projets. Plusieurs projets peuvent être faits en parallèle. Le plan numérique permet toutefois de comprendre la direction de l'entreprise et les différentes étapes pour atteindre cette vision;
3. **tester** : au lieu de mettre en place des projets d'envergure de longue durée, le HUB Institute se base sur les notions de l'agilité et de petits projets rapidement viables. Cette méthode de tests permet de voir rapidement les failles d'un projet ainsi que les gains apportés et permet d'apporter les corrections dès le départ plutôt qu'à la toute

fin du projet. Les auteurs prennent pour hypothèse qu'il est plus facile de gérer plusieurs petits projets les uns à la suite des autres plutôt qu'un gros projet majeur. Le principe des tests peut par exemple se concrétiser par le déploiement de la solution dans un département déjà bien contrôlé. Les corrections nécessaires sont alors apportées à ce moment sans trop de conséquences éparpillées dans l'ensemble de l'organisation. Le but est de valider et rendre faisable une solution idéale, initialement prévue dans le plan numérique, et d'éviter les longues pertes de temps issues du cumul des problématiques rencontrées;

4. **déployer** : le déploiement représente l'implantation des projets à l'ensemble de l'organisation une fois le projet validé à l'étape précédente. À cette étape, il faut déterminer les tâches et actions concrètes à accomplir, les moyens humains et financiers, les objectifs, les délais et les responsabilités de chaque intervenant. Les canaux de communication dans le projet sont également définis à cette étape ainsi qu'un plan de mise en œuvre détaillé. Ce dernier doit également inclure des plans de contingence dans les cas de problématiques ou de situations non prévues au début des projets. Le but de cette étape est d'assurer le bon déroulement de l'implantation des projets;
5. **optimiser** : l'optimisation revient à dire « contrôle ». Le HUB Institute affirme que le déploiement des projets ne représente pas la fin de la transformation numérique. Cette dernière est en effet basée sur les notions d'amélioration continue. Des ajustements et nouvelles priorités sont inéluctables à la suite d'implantation de projets. L'optimisation inclut la mesure de la performance, le contrôle des situations problématiques et le retour à l'étape de diagnostic.

À la lumière de ces informations, la prise de connaissance de son état actuel semble prioritaire pour mener à bien les projets de transformation numérique. Or, plusieurs modèles ont été retrouvés dans la littérature tels que celui d'Impuls, (2016) ou de McKinsey (2015), mais aucun de ces modèles ne semblent montrer l'importance relative de chaque pratique d'affaires et de chaque outil sur le passage au numérique des entreprises. Il devient alors pertinent de développer un modèle qui aura pour objectif de

mesurer l'impact relatif de chaque pratique d'affaires sur le passage au numérique des entreprises. En ce sens, le terme « transformation numérique » évoque un passage d'un état à un autre. Il devient alors nécessaire d'évaluer le changement en utilisant un indicateur pertinent qui permet de monitorer l'impact des décisions d'affaires et d'orienter les actions à entreprendre pour améliorer ce dit indicateur.

2.4.4 Performance numérique

2.4.4.1 La performance organisationnelle

Zaied et al. (2015) abordent les sujets de performance organisationnelle et d'innovation managériale pour améliorer la compétitivité des entreprises. Les auteurs reprennent la définition de Jacquet (2011) qui stipule que la performance organisationnelle est composée de plusieurs critères variant en fonction de leurs potentiels d'action et de l'objectif à atteindre. Ils définissent l'innovation managériale comme « l'utilisation [d'un ensemble] de nouvelles stratégies, de pratiques managériales, de procédures et de structures organisationnelles […] dans le but d'améliorer l'efficience et l'efficacité des procédés organisationnels ». Selon les auteurs, l'innovation managériale couvre les pratiques d'affaires, la gestion des connaissances et les relations avec les organisations externes. Ils établissent notamment un lien entre la performance organisationnelle et l'innovation managériale en démontrant que la performance organisationnelle résulte d'un avantage concurrentiel généré par les activités d'innovation. En d'autres mots, la performance organisationnelle est composée d'un *amalgame de critères* tel que des pratiques d'affaires, des stratégies, des processus, des méthodes de gestion de connaissances et l'établissement de relations internes et externes dans le but d'atteindre un objectif déterminé.

2.4.4.2 Composantes de la performance numérique

Basé sur la notion de performance organisationnelle de Zaied et al. (2015) et sur l'objectif de cette recherche, le terme « performance numérique » remplacera la notion de performance organisationnelle et sera définie par la mesure permettant d'évaluer

l'avancement de l'exécution d'une transformation numérique selon les *pratiques d'affaires associés à l'Industrie 4.0*. La décomposition de la performance numérique permet ainsi d'orienter de façon plus spécifique les priorités, les investissements et les vecteurs de valeur dans une entreprise en fonction de l'orientation stratégique, des enjeux, du contexte interne et externe et des ressources disponibles, tant humaines que technologiques. En se basant sur les pratiques d'affaires présentées à la Figure 2.7 et les dimensions du HUB Institute (2017) (p. 25), un modèle d'évaluation de la performance numérique est proposé à la Figure 2.8. La performance numérique, dans le contexte de cette recherche, est composée de 6 dimensions, soit : le leadership, la culture et l'organisation, la technologie, la gestion de la donnée, le système de mesure et l'expérience client. Chacune de ces dimensions est elle-même décomposée en une multitude de critères, nommés ici « pratiques d'affaires », qui ont été soulevés par la littérature autour du thème de la transformation numérique. Les composantes de ce modèle sont brièvement définies à la suite de la Figure 2.8.

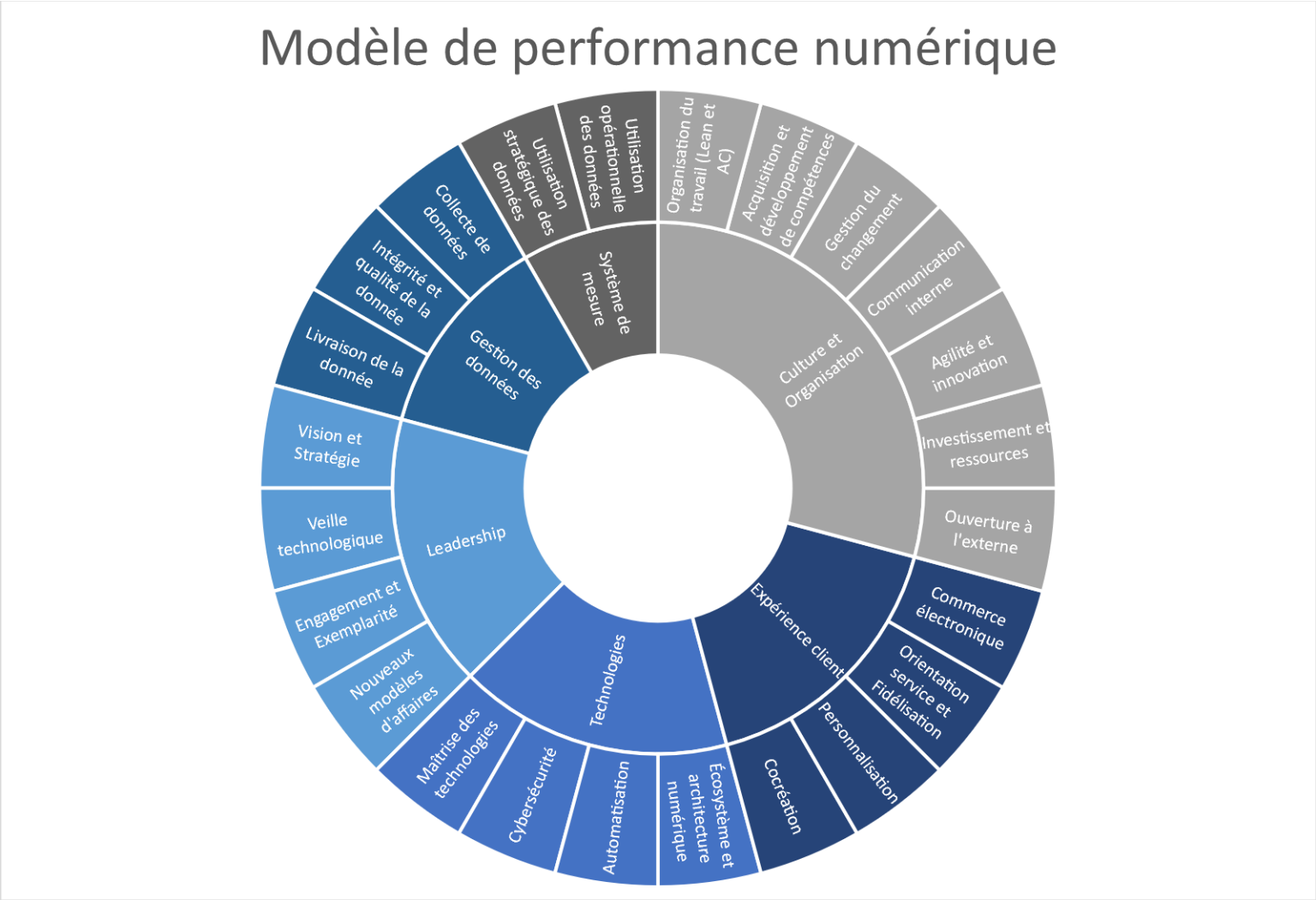


Figure 2.8 : Modèle de performance numérique

Leadership

Dans le modèle de performance numérique présenté dans cette recherche, le leadership est défini par le processus employé par une personne pour guider, orienter et influencer un groupe de personnes dans l'objectif d'atteindre une vision commune. Dans le modèle proposé, le leadership comprend quatre pratiques d'affaires, soit (1) la vision et la stratégie, (2) la veille technologique, (3) l'engagement et l'exemplarité et (4) les nouveaux modèles d'affaires.

Vision et Stratégie

La vision d'une entreprise représente une description d'un état futur et désirable de l'organisation et/ou de son environnement.

La stratégie numérique représente ici l'amélioration des produits et processus via l'utilisation des technologies numériques et l'opportunité de développer un tout nouveau modèle d'affaires. Une bonne stratégie numérique doit alors incorporer une vision à long terme, une revue du modèle d'affaires et un plan numérique pour l'atteinte de ses objectifs d'affaires.

Veille technologique

La veille technologique est l'ensemble des techniques visant à organiser de façon systématique la collecte d'informations technologiques, l'analyse, la diffusion et l'exploitation de ces informations pour la croissance et le développement de l'entreprise. Il s'agit de l'observation et de l'analyse des recherches ayant trait aux acquis scientifiques et techniques, aux produits, aux procédés de fabrication, aux matériaux et aux impacts économiques présents et futurs qu'ils engendrent.

Engagement et exemplarité

L'engagement organisationnel est défini par la force avec laquelle l'individu s'identifie à une organisation. Cet engagement est caractérisé par trois éléments : (1) une croyance forte et une totale acceptation des buts et des valeurs de l'organisation ; (2) une volonté avérée d'exercer un effort considérable pour le compte de l'organisation. ; (3) un désir ferme de continuer à faire partie des effectifs de l'organisation. L'exemplarité représente la mise en action de l'engagement.

Nouveaux modèles d'affaires

Un modèle d'affaires décrit les principes selon lesquels une organisation crée, délivre et capture de la valeur. Les nouvelles technologies numériques permettent d'améliorer son offre de produits ou services et la relation avec le client.

Culture et Organisation

La culture organisationnelle est une manière spécifique de l'entreprise à répondre aux problèmes. Elle caractérise l'entreprise et la distingue des autres dans ses valeurs, sa manière d'aborder les problèmes et sa façon de réagir aux situations courantes. Dans le modèle, la culture et l'organisation comprend sept pratiques d'affaires, soit (1) la gestion du changement, (2) l'agilité et l'innovation, (3) l'investissement et les ressources disponibles, (4) l'acquisition et le développement des compétences, (5) l'ouverture à l'externe, (6) l'organisation du travail – ou le lean et l'amélioration continue, et (7) la communication interne.

Gestion du changement

La gestion du changement désigne l'ensemble de la démarche qui va de la perception d'un problème d'organisation à la définition d'un cadre d'actions qui permet l'élaboration, le choix et la mise en place d'une solution dans des conditions optimales de réussite.

Agilité et Innovation

L’agilité est la capacité d’une organisation à créer de la valeur et à ravir son client, tout en favorisant et en s’adaptant - à temps - aux changements de son environnement.

L'innovation représente la mise en œuvre d'un produit, que ce soit un bien ou un service, d'un processus nouveau ou sensiblement amélioré, d'une nouvelle méthode de commercialisation ou d'une nouvelle méthode organisationnelle dans les pratiques de l'entreprise, l'organisation du lieu de travail ou les relations extérieures.

Investissement et ressources disponibles

L'investissement dans les technologies numériques comporte la démarche de détermination d'un budget, d'identification des problématiques et des solutions possibles, de choix de solutions technologiques, mode d'implantation, suivi et de la gestion des risques.

Acquisition et développement de compétences

La gestion des talents constitue l’ensemble des pratiques liées à l’acquisition, au développement et à la promotion des talents d’une organisation telles que la sélection et le recrutement, la gestion de la performance, la formation et le développement, la gestion de la relève, la gestion de la carrière et la rémunération, dans le but de favoriser la conservation des talents d’une organisation.

Ouverture à l’externe

Le travail collaboratif désigne la coopération entre plusieurs acteurs ou organisations afin d'atteindre un but commun. Coopérer repose principalement sur le partage de valeurs, de projets, de connaissances, de ressources et d'outils. Il repose également sur la volonté et la capacité à coopérer.

Lean et Amélioration continue

Le *lean* est une méthode de management qui vise l'amélioration des performances de l'entreprise par le développement de tous les employés. La méthode permet de rechercher les conditions idéales de fonctionnement en faisant travailler ensemble personnel, équipements et sites de manière à ajouter de la valeur avec le moins de gaspillage possible.

Communication interne

La communication interne est un ensemble de principes, d'actions et de pratiques visant à donner du sens pour favoriser l'appropriation, donner une âme pour favoriser la cohésion et inciter chacun à mieux communiquer pour favoriser le travail en commun.

Système de mesure

Le terme « Mesure » représente ici l'action répétée d'utiliser les données et les ressources liées aux technologies pour évaluer la performance d'une organisation. Il s'agit en d'autres mots, du système décisionnel de l'organisation. Dans le modèle, le système de mesure comprend deux pratiques d'affaires, soit (1) l'utilisation opérationnelle des données et (2) l'utilisation stratégique des données.

Utilisation opérationnelle des données

L'utilisation opérationnelle des données représente la capacité de bien utiliser les données dans les décisions liées aux opérations quotidiennes.

Utilisation stratégique des données

L'utilisation stratégique des données représente la capacité de bien utiliser les données dans les décisions liées à la gestion et au long terme.

Gestion des technologies

Les technologies représentent la collection de techniques, compétences, méthodes et procédés utilisés dans la production de biens ou de services ou dans l'accomplissement des objectifs. Ils font principalement référence aux outils présentés à la Figure 2.6, mais aussi aux techniques mises en œuvre pour connecter ces outils, les intégrer, les maîtriser et les amener à générer de la valeur. Dans le modèle de la Figure 2.8, la gestion des technologies comprend quatre pratiques d'affaires, soit (1) l'écosystème et l'architecture numérique, (2) la maîtrise des technologies, (3) la cybersécurité et (4) l'automatisation.

Écosystème et Architecture numérique

Les écosystèmes numériques sont composés de multiples entités indépendantes telles que des machines, logiciels et applications. Cela signifie le développement de normes et de standards de langage et de connexion qui permettent l'intégration, la connectivité et le partage des données entre les équipements, les machines, les systèmes de la chaîne de valeur.

Maîtrise des technologies

La maîtrise des technologies représente l'implication, l'engagement, les connaissances et les compétences des différents utilisateurs des technologies numériques. Ceci passe notamment par l'accès à des instructions de travail adéquates à jour et un soutien technique spécialisé.

Cybersécurité

La sécurité des TI se situe à plusieurs niveaux. La sécurité peut autant affecter les données de stockage interne et des services nuage que les communications inter et intra entreprise. La cybersécurité inclut alors le développement, la planification et l'implantation de procédures de sécurité pour éviter les brèches, les fuites d'information et les risques de piratage.

Automatisation

Un processus autonome signifie qu'une pièce d'équipement peut se guider, à l'aide de capteurs et actionneurs, de façon autonome pendant la production, en temps réel et en fonction des conditions du moment. Les prises de décision sont faites à l'aide d'algorithmes qui évaluent des mesures de performance et d'état de la production, amenant les pièces d'équipements à prendre action pour répondre aux objectifs fixés par les algorithmes.

Gestion des données

La gestion des données est l'ensemble des activités de l'entreprise visant à acquérir, contrôler, protéger, livrer et améliorer la qualité des données et de l'actif informationnel de l'entreprise. Cette dernière peut être décomposée en trois éléments, à savoir : la collecte, l'intégrité (et qualité) et la livraison de la donnée. Dans le modèle, la gestion des données est décomposée en trois pratiques d'affaires, soit (1) la collecte des données, (2) l'intégrité et la qualité des données et (3) la livraison des données.

Collecte des données

L'acquisition des données signifie l'analyse, le design, l'implantation, le déploiement et le maintien des systèmes de données ainsi que les mécanismes de captation et de transfert de données dans un système d'exploitation.

Intégrité et qualité des données

La qualité des données signifie que la donnée fournie aux employés permet des analyses et prises de décision fondées sur des informations valides. L'intégrité des données est représentée par l'ensemble des activités qui permettent de conserver le contexte, la cohérence, la standardisation et le partage de l'information exacte, à jour et pertinente.

Livraison des données

La livraison des données est représentée par l'état de la donnée au moment de l'utilisation. Les données fournies aux employés doivent être utilisables directement, sans manipulation additionnelle.

Expérience client

L'expérience client représente les efforts fournis pour offrir davantage qu'un produit à son client, tant au niveau de la conception, du service associé et de la communication tout au long du cycle de vie du produit. Dans le modèle, l'expérience client comprend quatre pratiques d'affaires, soit (1) la personnalisation, (2) l'orientation service et la fidélisation, (3) la cocréation et l'innovation ouverte et (4) le commerce électronique et l'usage des médias sociaux (SMAC).

Personnalisation

L'utilisation des données et des technologies de l'information permet de développer de nouveaux modèles d'affaires et de créer de la nouvelle valeur pour le client. La participation active des clients dans le processus de développement de produits permet aussi de répondre à leurs besoins et exigences spécifiques. La personnalisation signifie le fait d'offrir au client une approche individuelle qui répond à des besoins spécifiques.

Orientation service et Fidélisation

Le marketing d'engagement est un processus visant à impliquer le consommateur dans le processus de création d'un nouveau produit ou service. Deux possibilités s'ouvrent à l'entreprise dans ce processus :

- le consommateur est directement consulté pour participer à la création de ce nouveau produit;
- le consommateur fait librement des commentaires positifs ou négatifs sur une plateforme d'information à propos de la marque ou du produit. Ces informations

sont alors récupérées par l'entreprise qui en tient compte lors de la création d'un nouveau produit.

Cocréation et innovation ouverte

La cocréation et l'innovation ouverte représentent l'utilisation de partenaires ou de foules via par exemple, le *crowdsourcing* et l'innovation ouverte pour développer de nouveaux produits et processus qui répondent aux attentes réelles des clients.

Commerce électronique (et SMAC)

Le commerce électronique ou e-Commerce, représente la vente de ligne et l'utilisation de plateformes et médias sociaux (*SMAC* ou « *Social Mobile Analytics Cloud* » en anglais) qui permettent de garder un contact direct avec ses clients, améliorer leur rétention et améliorer les produits et services offerts.

La performance numérique proposée dans cette recherche représente alors l'indicateur qui combine les 24 pratiques d'affaires, issues de la littérature et regroupées selon le modèle du HUB Institute.

2.4.4.3 Démarche d'évaluation de la performance numérique

Les auteurs ont montré que la transformation numérique passe à la fois par la mise en œuvre de pratiques d'affaires et l'acquisition d'outils numériques, identifiées et priorisées grâce à une démarche structurée. Les pratiques d'affaires et les besoins numériques ne sont toutefois pas identiques à l'intérieur des départements d'une même organisation. La chaîne de valeur de Porter (2008) détaille l'ensemble des processus d'affaires primaires et secondaires qui se trouvent dans une entreprise. L'évaluation de la performance numérique doit alors se faire en considérant les différentes réalités vécues dans une entreprise pour assurer une analyse consciencieuse et complète des besoins de l'entreprise. Les processus d'affaires identifiés par Porter (2008) sont présentés à la Figure 2.9.

Figure 2.9 : Les processus d'affaires typiques d'une entreprise selon Porter (2008)

En présentant les différents processus d'affaires de la chaîne de valeur, Porter (2008) montre qu'il existe des sources d'avantage concurrentiel dans tous ces départements. Il peut alors être pertinent de considérer chacun des processus d'affaires de la chaîne de valeur lors de l'évaluation de la performance numérique dans les entreprises afin d'identifier le maximum d'opportunités d'amélioration. Ceci permettra également d'évaluer les différences tant au niveau des besoins numériques que des pratiques d'affaires et des enjeux spécifiques à chaque département.

Aucune méthode n'a démontré jusqu'à maintenant qu'elle assure le succès du passage des entreprises à l'Industrie 4.0. Le HUB Institute (2017) et Tortorella et Fettermann (2018) ont toutefois montré qu'une direction claire, un contrôle de ses processus et une démarche structurée permettent d'en faciliter l'avancement.

Cette section a permis de démontrer que la transformation numérique des entreprises passe à la fois par l'application des bonnes pratiques d'affaires et l'acquisition de bons outils numériques. La performance numérique, basée sur la notion de performance

organisationnelle, est donc définie par la mise en œuvre des bonnes pratiques d'affaires pour améliorer sa performance autant au niveau organisationnel qu'opérationnel. Enfin, dans le but d'assurer une compréhension exhaustive d'une entreprise désirant passer au numérique, la chaîne de valeur de Porter permet de décomposer la notion de performance numérique selon les différentes réalités pouvant être vécues dans les entreprises.

2.5 Conclusion de la revue de la littérature

La clarification des connaissances sur l'Industrie 4.0, la PME manufacturière et la transformation numérique ont permis d'établir la relation entre chacun de ces concepts. La compréhension de ces notions a permis de valider la pertinence du numérique dans les PMEM.

La revue de la littérature a toutefois permis de montrer que certains auteurs ne convergent pas totalement sur les pratiques d'affaires et les outils numériques qui font, ou ne font pas partie de l'Industrie 4.0. Évidemment, étant donné l'émergence du sujet, plusieurs théories et concepts tendent à s'éclaircir au fil du temps et tendent de plus en plus vers un consensus. On remarque néanmoins un flou encore présent dans la littérature et un effort important passé à définir des concepts et leurs interrelations. En ce sens, les définitions des différents outils technologiques varient de façon plus ou moins importante d'un auteur à l'autre. Il a donc été nécessaire de sélectionner celles qui semblaient répondre à l'objectif de la thèse actuelle. Plusieurs modèles théoriques de passage à l'Industrie 4.0 ont été présentés dans la littérature tels que les modèles d'IMPULS (2016), du HUB Institute (2017) et de McKinsey Digital (2015), mais aucun d'eux n'a expliqué clairement ce qui les a amené à choisir ou à délaisser une composante dans les modèles. Pour cette raison, il a été décidé de compiler les facteurs d'influence qui revenaient le plus souvent dans la littérature, de les intégrer au modèle de la recherche actuelle et d'évaluer leur impact respectif sur la performance numérique des entreprises. Il a également semblé y avoir peu d'études terrain faites directement dans les entreprises et encore moins dans les PME manufacturières. La méthodologie

présentée au Chapitre 3 a alors été réfléchie de manière à répondre à ces lacunes dans le but d'amener à une avancée scientifique importante dans les domaines de l'Industrie 4.0 et de la PME.

La prochaine étape de la recherche est donc de tester le modèle sur le terrain pour déterminer les composantes de la performance numérique les plus pertinentes et les plus significatives pour les Petites et Moyennes Entreprises Manufacturières québécoises.

CHAPITRE 3
MÉTHODOLOGIE

Ce chapitre présente la méthodologie employée pour la conduite de cette thèse. Le contexte, la méthode, le cadre de la recherche et les hypothèses de recherche y sont présentés.

3.1 Mise en contexte

Dans une stratégie de développement des entreprises québécoises au niveau numérique, le Ministère d'Économie, du Savoir et de l'Innovation du Québec (MESI) a pris contact avec les principaux organismes à la fine pointe du développement numérique de la province du Québec. Le projet a débuté avec une mission économique international où les organismes en question se sont déplacés en Allemagne et en France pour des évènements reliés à l'Industrie 4.0 tels que la Foire d'Hanovre (« *Hanovre Messe* ») et le salon d'exposition Industrie du Futur à Paris. Ces organismes sont Productique Québec, le Centre Facilitant la Recherche et l'Innovation dans les Organisations (CEFRIO), le Centre de Recherche Industrielle du Québec (CRIQ), le Centre de Recherche Informatique de Montréal (CRIM) via l'Association de la Sous-Traitance Industrielle du Québec (STIQ) ainsi que le Département de génie industriel et l'Institut de Recherche sur les PME (INRPME) de l'UQTR. En janvier 2017, ce panel d'experts s'est vu offrir un mandat de collaboration dans un projet de développement d'évaluation de la performance numérique des entreprises. Le projet s'est étalé sur trois mois et a pris échéance le 31 mars 2017. À la suite de cette date, un projet pilote a été déployé dans 15 entreprises afin d'en récolter les commentaires et d'effectuer des ajustements. Dans un but premier, l'objectif de ce questionnaire était de le déployer à la grandeur de la province et d'évaluer la performance numérique actuelle des entreprises québécoises. Les résultats récoltés lors de ce mandat permettront par la suite d'octroyer des

subventions adaptées aux entreprises pour assurer le succès de leur développement numérique. L'exécution du projet pilote est présentée au Chapitre 4.

La méthodologie retenue pour réaliser ce projet de recherche est la recherche action. Cette méthodologie se prête bien pour explorer des sujets émergents. L'objectif de cette recherche est de développer une stratégie efficiente de passage des PMEM à l'Industrie 4.0 – objectif réalisable par la détermination des pratiques d'affaires, des processus d'affaires et des outils numériques les plus pertinents dans un contexte de PMEM québécoises. Puisque l'Industrie 4.0 est un sujet émergent ou même inconnu pour plusieurs PMEM, les travaux réalisés dans cette thèse se déroulent davantage dans une structure de recherche exploratoire ou de « *theory building* ». Ce contexte exploratoire a obligé le chercheur à choisir un échantillon d'entreprises en fonction de deux critères : (1) elles devaient avoir fait une planification stratégique et (2) posséder une maturité organisationnelle suffisante. Les critères étaient relativement souples, mais ont néanmoins forcé une certaine homogénéité entre les entreprises rencontrées.

3.2 Structure de la méthodologie

À partir du modèle présenté à la Figure 2.8, la prochaine étape de la recherche consistait à établir un questionnaire pour évaluer les pratiques puis à le tester à l'aide d'un projet pilote en entreprise. Suite au projet pilote, le modèle a été finalisé et les expériences finales ont été menées. Les résultats récoltés à partir des expériences terrain ont ensuite été analysés à l'aide des logiciels PowerBI et Minitab. La dernière étape de la méthodologie consiste enfin à développer une stratégie d'implantation de l'Industrie 4.0 dans les PME. La Figure 3.1 présente la structure de la méthodologie. Chacune des étapes est expliquée à la section suivante.

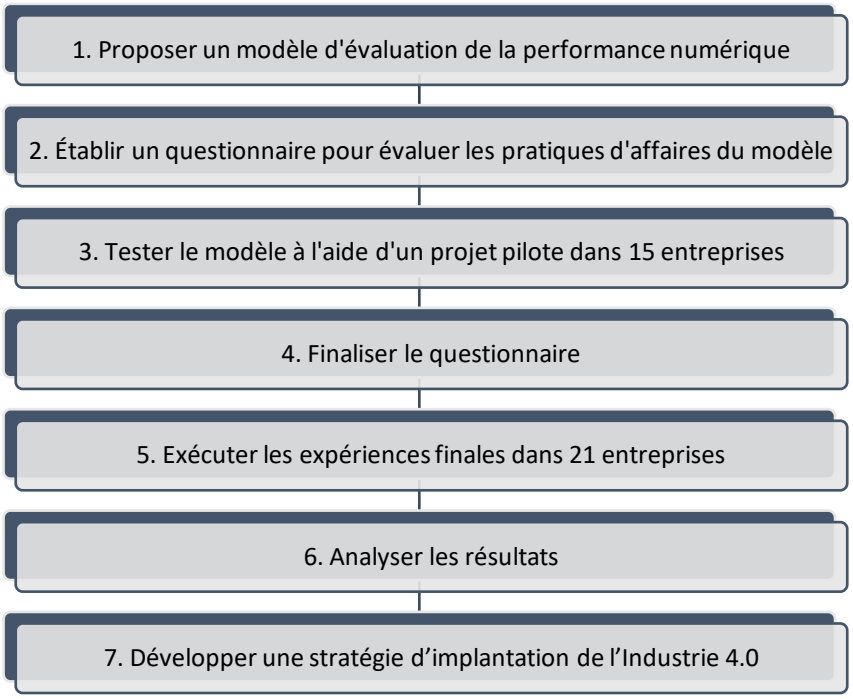


Figure 3.1 : Structure de la méthodologie

3.2.1 Proposer un modèle d'évaluation de la performance numérique

Un stage Mitacs Accélération débuté en décembre 2016 a permis de créer une entente de partenariat entre le Centre Collégial de Transfert des Technologies (CCTT) et Productique Québec. Productique Québec est une organisation neutre qui a pour mandat de conseiller et d'accompagner les entreprises manufacturières dans le choix, l'acquisition et l'implantation des technologies numériques en vue d'atteindre leurs objectifs d'affaires. L'entente avec l'organisation partenaire a facilité le développement du modèle d'évaluation de la performance numérique et l'exécution du projet pilote grâce une approche terrain structurée. Cette approche a permis d'assurer que la méthode d'évaluation et son exécution, la présentation des résultats et les recommandations associées offraient une plus-value aux entreprises participant à l'étude.

3.2.2 Développer un questionnaire

Les questions concernant chaque composante du modèle de la performance numérique ont été développées à partir de la littérature. Chaque composante individuelle a été

sujette à une revue spécifique. Le questionnaire a ensuite été complété et validé par le comité d'experts mandaté par le MÉSI pour la conduite du projet (CRIQ, STIQ, CEFRIO, Productique Québec et INRPME).

Basé sur l'échelle de Likert, le questionnaire contient des questions évaluées sur une échelle de 0 à 4. La Figure 3.2 présente une échelle adaptée du CEFRIO (2016) pour mesurer la performance numérique.

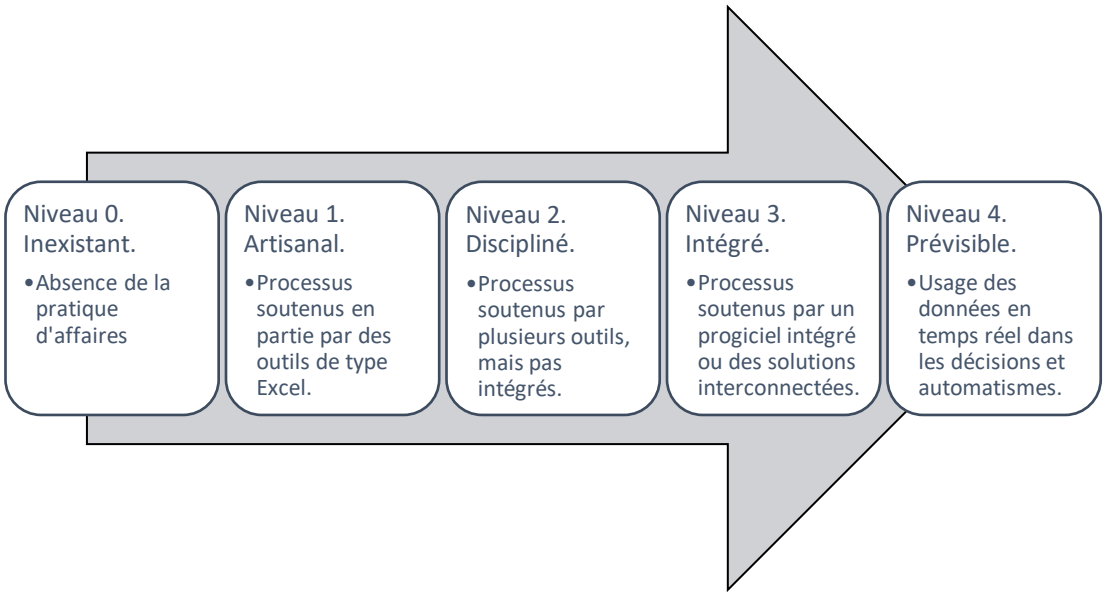


Figure 3.2 : Échelle adaptée du CEFRIO (2016)

Pour chaque question développée, la valeur de 0 à 4 permet à l'évaluateur de donner une appréciation objective et quantitative pour chaque pratique d'affaire évaluée. En se basant sur le modèle de maturité développé par Jobin et Lagacé (2014), l'évaluateur peut au terme de l'évaluation, colliger une moyenne des scores par pratique d'affaires, puis une moyenne par dimension de la performance numérique et finalement, une moyenne de performance numérique globale. La moyenne par dimension de performance numérique est calculée par la moyenne des sous-dimensions (pratiques d'affaires) qui se rattachent à chaque dimension respective. Enfin, la moyenne globale est calculée par la

moyenne des six dimensions de la performance numérique. Les calculs utilisés dans cette recherche sont les suivants :

$$\boldsymbol{Performance\ numérique} = \frac{\boldsymbol{LDS+CLT+TEC+DNE+MSR+EXP}}{\boldsymbol{6\ dimensions}} \quad \text{(Eq. 1)}$$

où,

$$LDS = \frac{VSN+VLE+NMA+ENG}{4\ composantes\ du\ leadership} \quad \text{(Eq. 2)}$$

$$CLT = \frac{GCH+AGI+RES+COMP+OUV+LEAN+COMM}{7\ composantes\ de\ la\ culture\ et\ l'organisation} \quad \text{(Eq. 3)}$$

$$TEC = \frac{ÉCO+MAÎT+SÉCU+AUTO}{4\ composantes\ de\ la\ gestion\ des\ technologies} \quad \text{(Eq. 4)}$$

$$DNE = \frac{COL+QLT+LIV}{3\ composantes\ de\ la\ gestion\ des\ données} \quad \text{(Eq. 5)}$$

$$MSR = \frac{UST+UOP}{2\ composantes\ du\ système\ de\ mesure} \quad \text{(Eq. 6)}$$

$$EXP = \frac{PERS+FID+COCR+eCOM}{4\ composantes\ de\ l'expérience\ client} \quad \text{(Eq. 7)}$$

où,

LDS = Score associé à la dimension Leadership

CLT = Score associé à la dimension Culture et Organisation

TEC = Score associé à la dimension Gestion des technologies

DNE = Score associé à la dimension Gestion des données

MSR = Score associé à la dimension Système de mesure

EXP = Score associé à la dimension Expérience client

VSN = Score associé à la pratique d’affaires Vision et Stratégie

VLE = Score associé à la pratique d'affaires Veille technologique

NMA = Score associé à la pratique d'affaires Nouveaux Modèles d'Affaires

ENG = Score associé à la pratique d'affaires Engagement et Exemplarité

GCH = Score associé à la pratique d'affaires Gestion du Changement

AGI = Score associé à la pratique d'affaires Agilité et Innovation

RES = Score associé à la pratique d'affaires Investissement et Ressources disponibles

COMP = Score associé à la pratique d'affaires Acquisition et Développement de Compétences

OUV = Score associé à la pratique d'affaires Ouverture à l'externe et Collaboration

LEAN = Score associé à la pratique d'affaires Lean et Amélioration continue

COMM = Score associé à la pratique d'affaires Communication interne

ÉCO = Score associé à la pratique d'affaires Écosystème et Architecture

MAÎT = Score associé à la pratique d'affaires Maîtrise des technologies

SÉCU = Score associé à la pratique d'affaires Cybersécurité

AUTO = Score associé à la pratique d'affaires Automatisation

COL = Score associé à la pratique d'affaires Collecte de données

QLT = Score associé à la pratique d'affaires Intégrité et qualité des données

LIV = Score associé à la pratique d'affaires Livraison des données

UST = Score associé à la pratique d'affaires Utilisation Stratégique des données

UOP = Score associé à la pratique d'affaires Utilisation Opérationnelle des données

PERS = Score associé à la pratique d'affaires Personnalisation

FID = Score associé à la pratique d'affaires Orientation service et Fidélisation

COCR = Score associé à la pratique d'affaires Cocréation et Innovation ouverte

eCOM = Score associé à la pratique d'affaires e-Commerce et SMAC

La moyenne globale (Eq. 1) fournit une évaluation générale pour comparer la performance numérique des entreprises dans le temps. Les indicateurs plus spécifiques (Eq. 2 à 7) orientent quant à eux, les sources d'amélioration potentielles spécifiques à chaque dimension. Ils facilitent l'élaboration d'un plan d'action et la direction des efforts engagés. Il est probable qu'une entreprise maîtrise certaines dimensions plus que d'autres. Cette méthode d'évaluation permet alors de nuancer le niveau de performance numérique et évite de concentrer des efforts où les gains ont peu d'impact pour l'organisation dans son ensemble.

3.2.3 Valider le modèle en entreprise.

Quinze entreprises ont été sélectionnées pour valider le questionnaire proposé. Les questionnaires ont été envoyés aux 15 entreprises. Ces dernières ont ensuite été rencontrées sur une période de trois jours chacune afin de contextualiser le questionnaire et évaluer leur performance numérique. Un plan numérique leur a ensuite été proposé en fonction des résultats de l'évaluation. L'exécution des expériences et les résultats du projet pilote sont présentés au Chapitre 4. Suite à la présentation des résultats en entreprise, le modèle lui-même a été étudié pour connaître les commentaires et la satisfaction générale des entreprises quant à son utilisation. Les commentaires récoltés par les entreprises ont permis de finaliser le modèle et le valider.

3.2.4 Développer le questionnaire final.

Le modèle a été adapté suite à l'évaluation des 15 entreprises pour créer un outil pertinent qui permette de bien comprendre les forces de chaque entreprise, l'impact des

pratiques d'affaires, des outils numériques et des processus d'affaires (facteurs d'influence) ainsi que les sources d'amélioration possible afin d'offrir une vue plus éclairée sur leur réalité et saisir les opportunités d'amélioration offrant le plus grand potentiel. Les questions répondues dans plus de 80 % des entreprises ont été conservées, les autres ont été retirées du questionnaire, combinées ou clarifiées. Le questionnaire final comporte 109 questions organisées par processus d'affaires.

3.2.5 Conduire les expériences

Afin de déterminer les facteurs d'influence les plus significatifs sur la performance numérique des PME manufacturières québécoises, 21 expériences, totalement indépendantes des 15 expériences pilotes, ont été menées dans des PMEM de secteurs variés.

Les expériences ont été exécutées en deux temps :

1. des questionnaires de 20 à 50 questions ont été envoyés aux différents intervenants des entreprises, composés d'une combinaison de 109 questions totales. Les questionnaires ont été envoyés aux entreprises via un lien *SondageOnline*. Les questions ont été répondues sur une échelle de Likert graduée de 0 à 4, selon le degré d'acceptation du répondant face à un énoncé. Jusqu'à 14 répondants par entreprise ont été sollicités pour couvrir les 14 processus d'affaires de la chaîne de valeur de Porter (Figure 2.9). Dans le cas où un répondant couvrait plus d'un processus d'affaires, ce dernier répondait au nombre de questionnaires associés à ses fonctions;

2. par la suite, trois jours d'entrevues avec des questions ouvertes ont permis d'apporter des nuances aux réponses des questionnaires et de remettre en contexte les réponses fournies. L'outil nommé FIPEC, c'est-à-dire Fournisseur – Intrant – Processus – Extrant – Client, a été utilisé pour guider les entrevues. Cet outil de cartographie des processus permet de mieux comprendre les processus et les nuances vécues par les répondants dans leur quotidien, de contextualiser les

questions pour s'assurer que le sens a bien été compris par le répondant, puis de mettre en évidence les enjeux, les objectifs individuels et communs et les besoins spécifiques au sein des processus d'affaires.

L'ensemble des informations récoltées a ensuite été analysé à l'aide du logiciel d'intelligence d'affaires « *PowerBI* ». Ce dernier permet d'organiser les données et d'effectuer des analyses croisées à partir de ces données. Des plans numériques ont également été fournis aux entreprises participantes, établis en fonction de leur performance numérique, mais aussi de leurs enjeux et objectifs d'affaires, afin de les aider à augmenter leur niveau de performance numérique. Des détails supplémentaires sont fournis à la section 3.4 concernant l'exécution des expériences.

3.2.6 Méthode d'analyse des résultats

Cette recherche tente principalement d'évaluer trois hypothèses exploratoires :

- Hypothèse 1 : les pratiques d'affaires issues de la performance numérique ont un impact sur la performance numérique des PMEM québécoises
- Hypothèse 2 : les processus d'affaires ont un impact sur la performance numérique des PMEM québécoises
- Hypothèse 3 : l'utilisation des outils numériques a un impact sur la performance numérique des PMEM québécoises

Les pratiques d'affaires, les processus d'affaires et les outils dans les entreprises sont trois facteurs qui peuvent venir influencer la performance numérique d'une organisation. Il est donc intéressant d'évaluer l'impact relatif de chacun de ces éléments, mais aussi d'évaluer lequel ou lesquels des pratiques d'affaires, processus d'affaires et outils ont le plus d'impacts positifs sur la performance des PMEM québécoises. La Figure 3.3 présente le cadre de la recherche qui met en évidence les liens entre les principales notions abordées dans la recherche ainsi que les hypothèses étudiées.

L'intégration des notions de l'Industrie 4.0 dans une entreprise est définie dans cette recherche comme la *transformation numérique*. Les mots-clés qui ressortent le plus

autour de cette notion sont principalement des outils numériques et des pratiques d'affaires. Comme Zaied et al. (2015) l'ont montré, la performance organisationnelle d'une entreprise est issue de plusieurs critères et permet de mesurer l'effet des pratiques d'affaires employées par les entreprises. Dans un contexte de passage à l'Industrie 4.0, la performance organisationnelle est remplacée par le terme performance numérique. Les dimensions qui la constituent sont le leadership, la culture et l'organisation, la gestion des technologies, la gestion des données, le système de mesure et l'expérience client, qui eux-mêmes, peuvent être décomposés en sous-dimensions, ou en pratique d'affaires. La première hypothèse cherche donc à évaluer l'impact des pratiques d'affaires sur la performance numérique des entreprises.

Le modèle de la chaîne de valeur de Porter a ensuite permis d'évaluer la performance numérique de chaque processus d'affaires afin d'identifier des potentiels d'amélioration pour chacun de ces processus d'affaires. La deuxième hypothèse cherche alors à évaluer l'impact des différents processus d'affaires sur la performance des entreprises. Enfin, la troisième hypothèse cherche à mesurer l'effet des outils de la transformation numérique sur la performance numérique des entreprises.

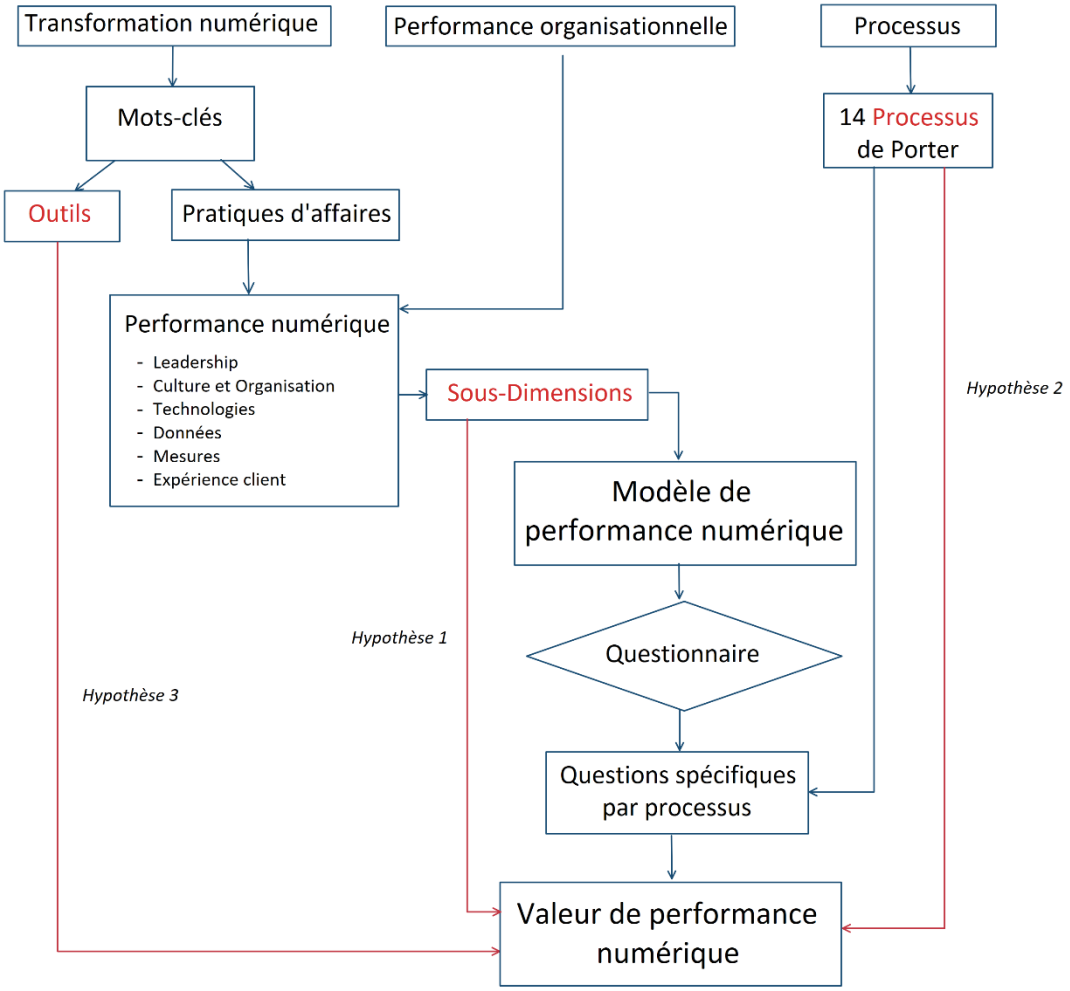


Figure 3.3 : Cadre de la recherche

Les logiciels PowerBI et Minitab ont été utilisés pour faire des analyses statistiques. Des tests d'hypothèses ont permis d'évaluer l'impact relatif des pratiques d'affaires, processus d'affaires et outils sur la performance numérique des entreprises de l'échantillon. Puisque peu d'entreprises de l'échantillon possédaient les outils numériques associés à l'Industrie 4.0, une étude en fonction de la récurrence des outils proposés dans les plans numériques et leurs relations avec les pratiques d'affaires de la performance numérique et les processus d'affaires de la chaîne de valeur a été faite.

3.2.7 Développer une stratégie d'implantation de l'Industrie 4.0

Après avoir identifié les facteurs d'influence les plus significatifs pour le passage au numérique des PME, il a été possible de prioriser les pratiques d'affaires, processus d'affaires et outils numériques selon leur impact relatif sur la PME. À partir de cette priorisation et de la revue de littérature, il a ensuite été possible de présenter une stratégie efficiente de passage au 4.0 (objectif de la recherche). La validation de cette stratégie a permis de démontrer la pertinence de la stratégie proposée.

3.3 Hypothèses statistiques

Tel que présenté à la précédente section, trois hypothèses sont étudiées dans cette recherche, soit (1) l'effet des pratiques d'affaires, (2) l'effet des processus d'affaires et (3) l'effet des outils numériques. Chaque élément issu de ces trois regroupements devient une variable indépendante et donc, une hypothèse à évaluer. La Figure 3.4 présente les hypothèses attachées aux pratiques d'affaires. Il est à noter que l'ensemble des hypothèses de recherche est présenté en Annexe 1.

- Hypothèse 1 : *les dimensions et les pratiques d'affaires ont un impact sur la performance numérique des PMEM.*

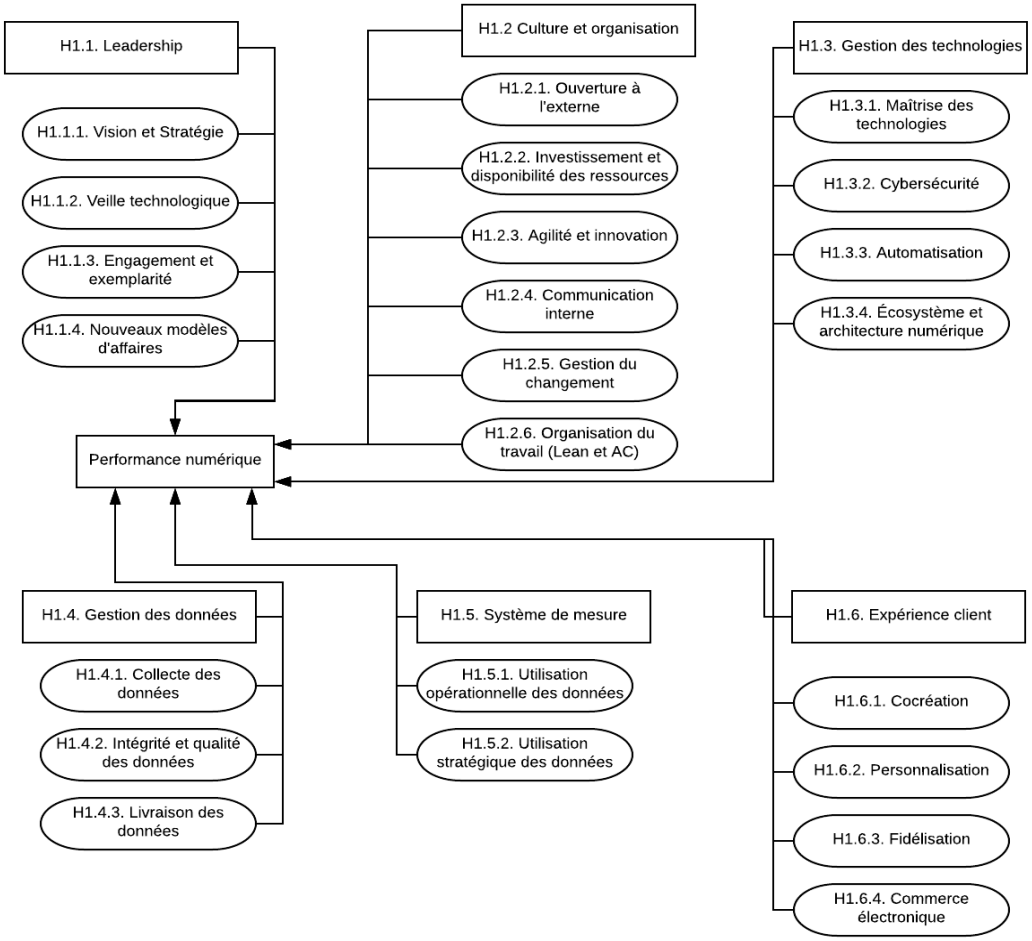


Figure 3.4 : Hypothèses de recherche associées aux pratiques d'affaires

La Figure 3.5 présente les hypothèses rattachées aux processus d'affaires.

- Hypothèse 2 : *les processus d'affaires ont un impact sur la performance numérique des PMEM.*

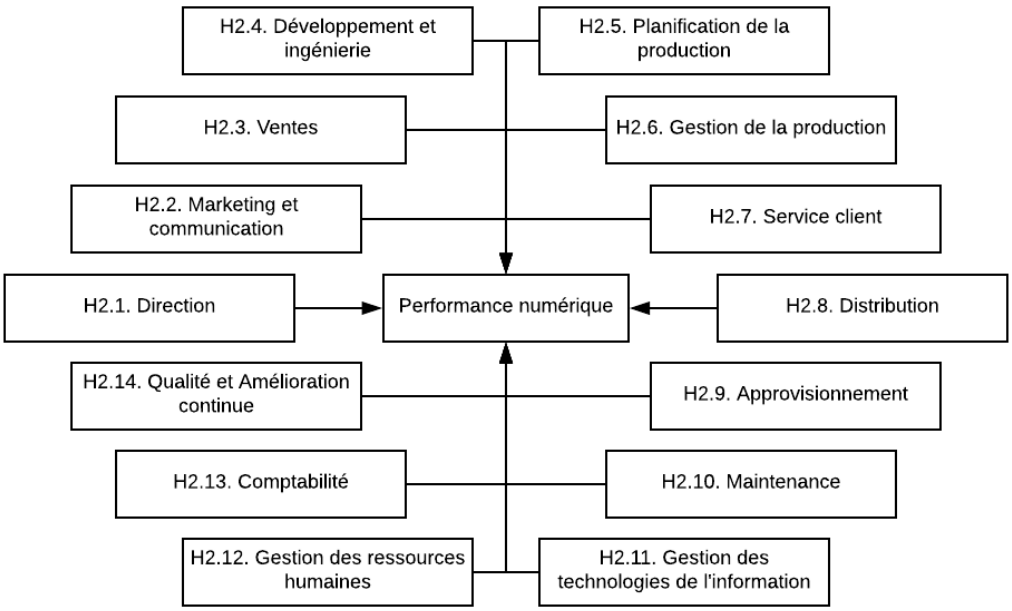


Figure 3.5 : Hypothèses de recherche associées aux processus d'affaires

La Figure 3.6 présente les hypothèses rattachées aux outils numériques.

- Hypothèse 3 : *les outils numériques ont un impact sur la performance numérique des PMEM.*

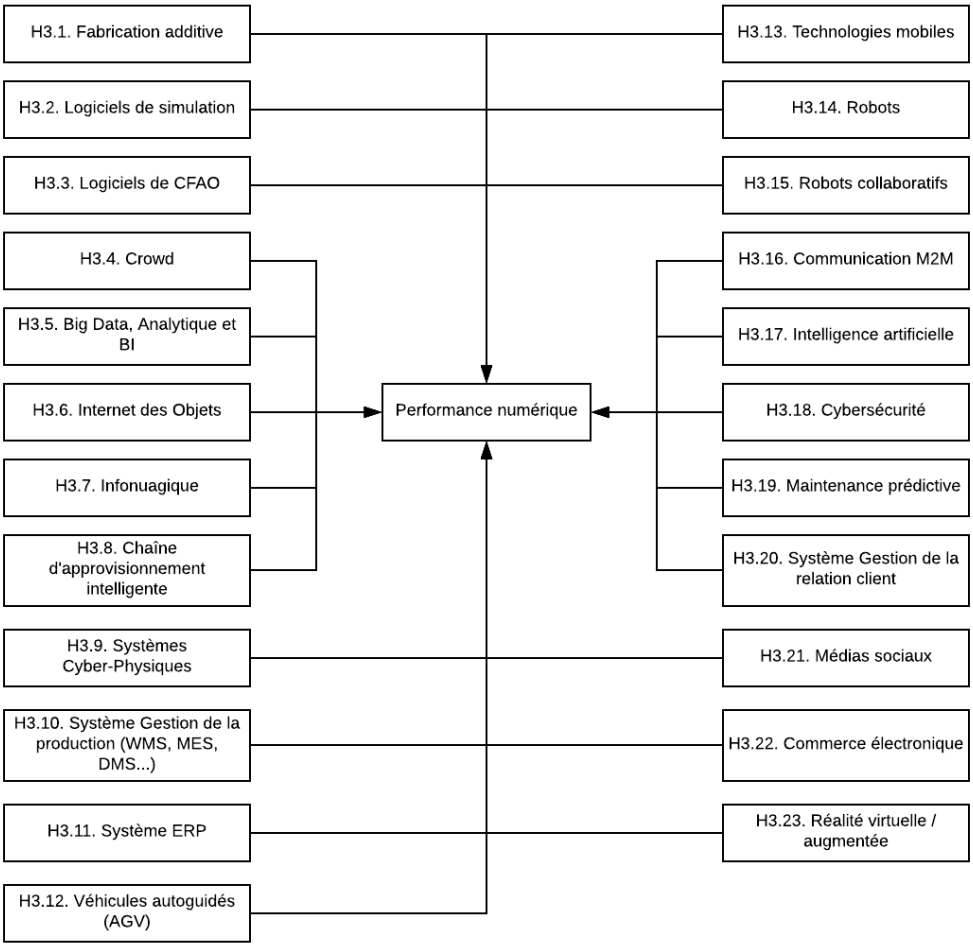


Figure 3.6 : Hypothèses de recherche associées aux outils numériques

Pour les Hypothèses 1 et 2, les tests d'hypothèses sont faits en comparant deux moyennes. Chaque variable indépendante est séparée en deux niveaux. Le premier niveau est constitué des entreprises qui ont un score inférieur à 2,5/4 pour la variable étudiée. Le deuxième niveau est constitué des entreprises qui ont un score supérieur ou égal à 2,5/4. Par exemple, une entreprise qui a un score de 3,1/4 pour le processus Direction sera dans le deuxième niveau pour l'évaluation de l'effet de la direction sur la performance numérique (Hypothèse 2.1). Si cette même entreprise a un score de 2,3/4 pour le processus Ventes, elle sera dans le premier niveau pour l'évaluation de l'effet des Ventes sur la performance numérique (Hypothèse 2.3). La comparaison des moyennes des deux niveaux, pour chaque variable indépendante, permettra d'évaluer

l'impact de ces variables sur la performance numérique. Pour l'Hypothèse 3, les tests d'hypothèses sont faits en comparant les deux moyennes de performance numérique des entreprises, où le niveau 1 est composé des entreprises qui utilisent l'outil numérique étudié et le niveau 2, les entreprises qui ne l'utilisent pas.

3.4 Déroulement des expériences

Exécutée en collaboration avec l'entreprise partenaire (Productique Québec), chaque évaluation de la performance numérique a été d'une durée d'environ 80 heures dans chaque entreprise et se décomposait en cinq étapes, soit : le lancement du projet, la réponse au questionnaire web, les entrevues en personne, la planification et l'accompagnement. Cette méthode est celle qui avait été brièvement expliquée à la section 3.2.5.

3.4.1 Lancement

Le lancement du projet correspond à l'étape de prise de contact avec l'entreprise. Cette étape inclut une période d'information et d'exemples qui permet à l'entreprise de bien saisir l'étendu et les limites du projet. L'étape du lancement dure environ une demi-journée et permet de présenter l'Industrie 4.0, l'exécution globale du projet, mais également la transformation numérique de l'entreprise. Les étapes d'exécution du projet sont expliquées et un exemple de réponse au questionnaire est effectué avec les principaux acteurs du projet. Enfin, la demi-journée inclut une visite d'usine qui permet à l'évaluateur de bien saisir la réalité du plancher de l'entreprise.

3.4.2 Questionnaire web

Des questionnaires de 20 à 50 questions sont envoyés aux différents intervenants des entreprises. Au total, 109 questions différentes sont posées. Plusieurs questions sont posées plus d'une fois, à différents intervenants, afin de mettre en lumière les différences interdépartementales à la vue d'un même énoncé. Il faut environ 30 minutes par processus d'affaires pour répondre au questionnaire.

Les questionnaires sont répondus en ligne et les données sont compilées dans une base de données web. Cette étape permet principalement à l'évaluateur d'avoir une idée représentative de l'entreprise en rapport au numérique avant les journées d'entrevues.

3.4.3 Entrevues

À la réception des résultats du questionnaire, des entrevues en personne avec les différents responsables de l'entreprise sont conduites. Les entrevues peuvent se faire individuellement ou en équipe, dépendamment du degré d'implication des répondants dans les processus d'affaires étudiés. Cette étape est d'une durée d'environ trois jours et se fait en présence de deux évaluateurs. Le binôme a été préféré afin d'offrir une vue d'ensemble plus complète de l'entreprise via la combinaison d'expertise et aussi pour évaluer différents processus d'affaires en parallèle, au besoin. Les indicateurs de performance numérique sont questionnés lors de cette journée, assurant la validité des informations fournies dans le questionnaire. Les entrevues sont dirigées selon la méthodologie FIPEC afin de couvrir les interrelations entre les processus d'affaires et permettre une discussion ouverte pour faire sortir des nuances en rapport au questionnaire.

3.4.4 Recommandations et planification

Une période d'environ sept jours a été nécessaire à la suite des entrevues pour analyser les données et rédiger le rapport. Les résultats du questionnaire et des entrevues permettent de mesurer objectivement les dimensions de la performance numérique et de détecter les forces et les opportunités d'amélioration de l'entreprise. La mise en relation des forces et des améliorations potentielles avec les enjeux de l'entreprise et ses objectifs d'affaires amènent à une liste de recommandations. Ces recommandations sont présentées lors de la demi-journée de clôture. La liste suivante présente les thématiques de recommandations majoritairement abordées :

- interopérabilité et connectivité des systèmes;
- capacité en temps réel;

- acquisition et architecture de la donnée;
- partage de l'information et système de communication;
- améliorations *lean*.

Pour chaque projet, différentes alternatives sont proposées à l'entreprise. Les alternatives sont comparées en fonction du coût et du délai approximatifs ainsi que des ressources nécessaires pour l'implantation desdites recommandations.

3.4.5 Accompagnement

L'évaluation de la performance numérique peut parfois aller plus loin que la présentation des résultats et l'élaboration du plan d'action. Le but de l'intervention est d'amener l'entreprise à passer à l'action. C'est pourquoi la journée de clôture du projet permet de présenter les ressources à contacter pour acquérir davantage d'information sur les solutions à implanter, sur les financements disponibles et sur les possibilités d'accompagnement lors des projets d'implantation.

CHAPITRE 4

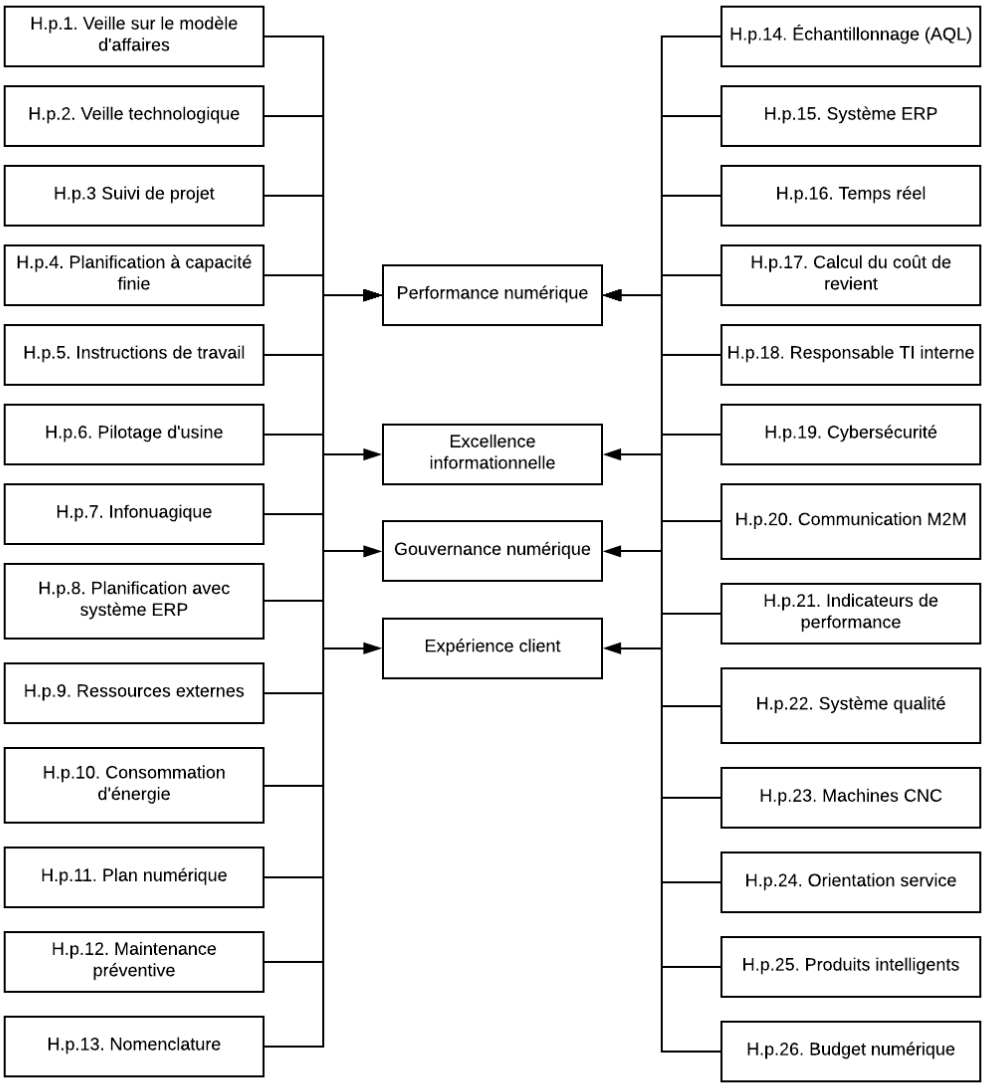
PROJET PILOTE DU MODÈLE D'ÉVALUATION DE LA PERFORMANCE NUMÉRIQUE

À la suite de la phase de développement de la méthode d'évaluation de la performance numérique, 15 entreprises québécoises ont été sollicitées pour tester le modèle en question et tirer quelques conclusions préliminaires. Ces 15 entreprises ont été sélectionnées en raison de leur haut niveau de performance numérique *a priori*. Cette section présente la description de l'échantillon, les résultats récoltés lors des expériences, l'analyse de ces résultats préliminaires, une discussion et une synthèse.

4.1 Modèle et hypothèses lors du projet pilote

Le modèle de performance numérique présenté à la Figure 2.8 représente le fruit de plusieurs mois de travail. Au moment du projet pilote, le modèle ne comportait pas les six dimensions du HUB Institute (Leadership, Culture et organisation, etc.). À la place, trois « axes de performance » étaient utilisés. Il s'agit de l'excellence informationnelle, de la gouvernance numérique et de l'expérience client qui ont été inspirés de Weinman (2015). Les hypothèses ont été posées à partir des modèles qui étaient connus à ce moment et qui ont été présentés dans la revue de littérature au Chapitre 2. À la suite du projet pilote et pour un meilleur raffinement de l'information, les axes de performance ont été remplacés par les dimensions du HUB Institute.

Les hypothèses de recherche ont également été revues à la suite du projet pilote. La Figure 4.1 présente les hypothèses qui étaient utilisées lors de cette étape.



** H.p.1 = Hypothèse pilote 1*

Figure 4.1 : Hypothèses de recherche lors du projet pilote

Il est possible de remarquer dans les hypothèses que les pratiques d'affaires et les outils numériques sont présentés sans distinction dans la Figure 4.1. En effet, ce n'est qu'à la suite des expériences pilotes que les pratiques d'affaires et les outils numériques ont été séparés. Ceci a alors permis d'affiner le modèle ainsi que les hypothèses de la recherche.

Pour la présente section, les hypothèses de la Figure 4.1 ont été considérées pour l'analyse des résultats.

4.2 Description de l'échantillon des 15 entreprises auditées

Les 15 entreprises qui ont participé au projet pilote de la performance numérique sont toutes de petite taille (< 99 employés) et ont été sélectionnées par les conseillers régionaux du MÉSI en fonction de deux critères : ces dernières devaient avoir démontré un certain niveau technologique via notamment l'acquisition et la maîtrise de nombreuses technologies numériques, devaient être impliquées dans l'industrie (participation à la chambre de commerces et d'industries, membres de comités régionaux, etc.) et devaient avoir mis en place des efforts concrets au niveau de leur transformation numérique. Les critères de sélection étaient peu quantifiables, mais étaient tout de même basés sur les recommandations des conseillers régionaux du MÉSI selon leur expérience et les lignes directrices fournies par le ministère. Les entreprises ont également été sélectionnées de sorte qu'elles couvrent plusieurs secteurs d'activité. La Figure 4.2 montre la répartition des entreprises par secteur d'activités.

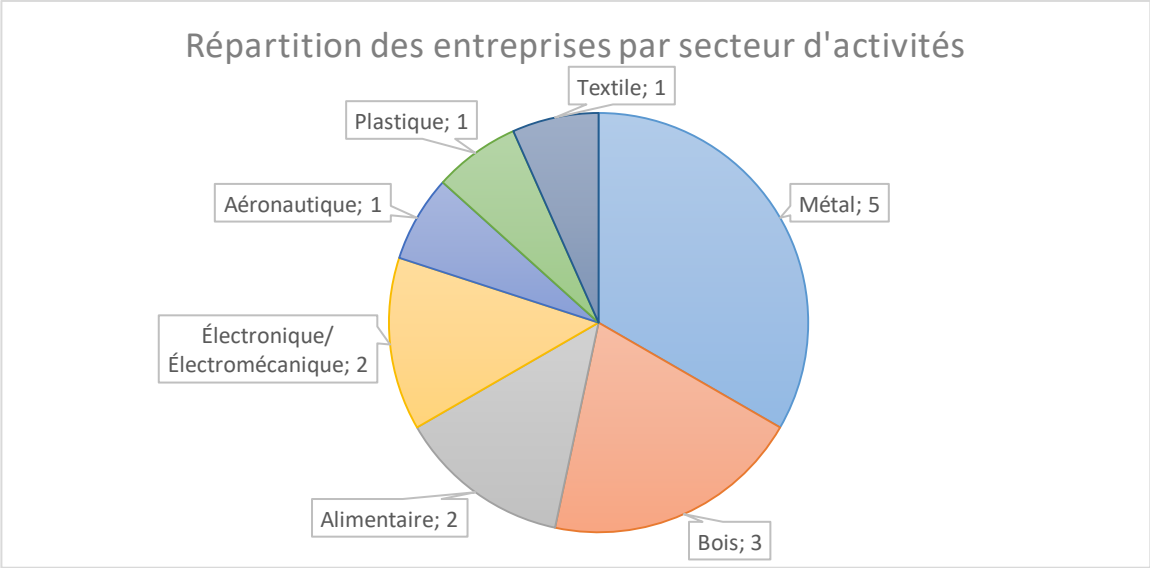


Figure 4.2 : Entreprises participantes selon le secteur d'activités

Tout comme pour les secteurs d'activités, les 15 entreprises ont été sélectionnées pour couvrir un grand territoire. La Figure 4.3 présente la répartition des entreprises en fonction de leur localisation géographique.

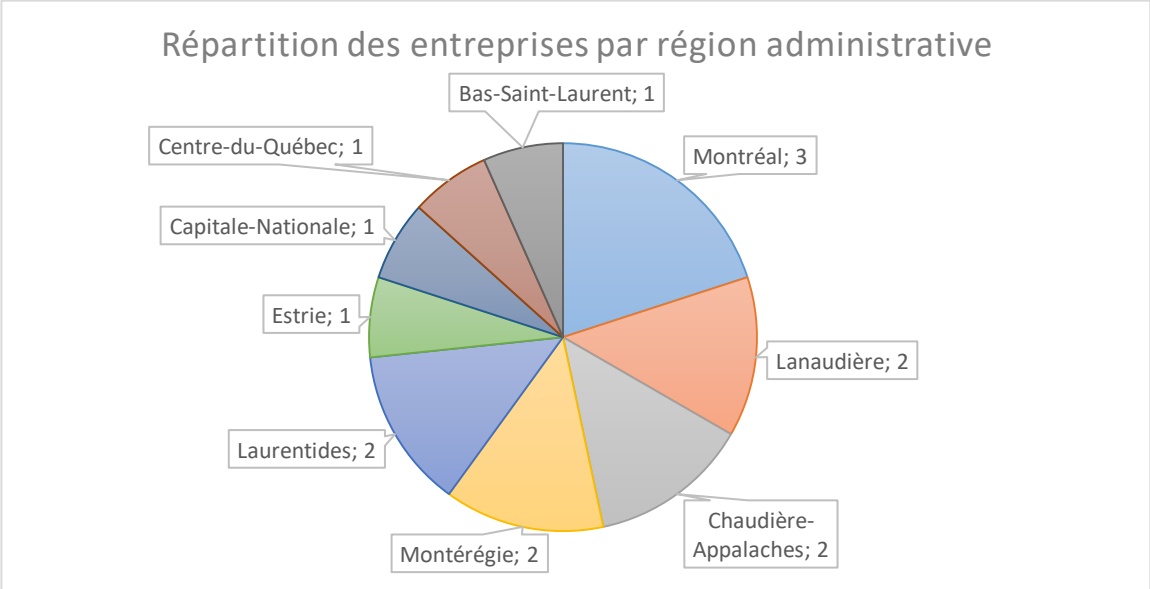


Figure 4.3 : Entreprises participantes selon leur région administrative

4.3 Résultats des expériences préliminaires (15 entreprises)

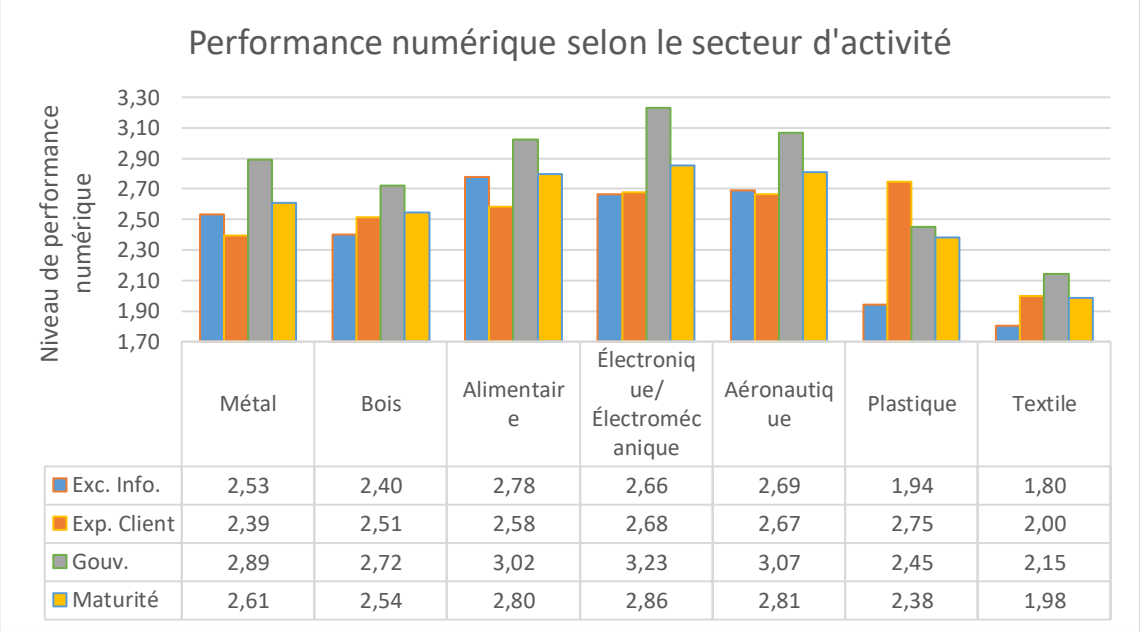
Les résultats de la performance numérique des entreprises sont présentés au Tableau 4.1 et sont séparés par axes de performance, soit l'excellence informationnelle, l'expérience client et la gouvernance. Le secteur d'activités et la performance globale sont également présentés dans le Tableau 4.1. Les entreprises ont été codées de 1 à 15 pour conserver la confidentialité. Les valeurs des axes de performance présentés dans le Tableau 4.1 ont été calculées par la moyenne obtenue dans les différentes sous-dimensions de la performance numérique. Les sous-dimensions ont aussi été revues à la suite du projet pilote, expliquant les éventuelles différences avec le modèle de la Figure 2.8. Enfin, la performance globale a été calculée par la moyenne des trois axes de performance.

Comme il est possible de le constater au Tableau 4.1, la performance moyenne des 15 entreprises est de 2,61 sur une valeur maximale de 4,00. En pourcentage, la moyenne de la performance numérique globale des entreprises est alors de 65,5 %, avec un coefficient de variation de 9,7 % et un étendu de 23,5 %, démontrant une certaine homogénéité entre les entreprises, pouvant être expliquée par les critères de sélection des entreprises au projet.

Tableau 4.1 : Résultats des 15 entreprises participantes au projet pilote

	Secteur	Excellence informationnelle	Expérience client	Gouvernance	Performance numérique
PME01	Bois	2,43	2,61	3,01	2,68
PME02	Alimentaire	2,80	2,17	3,05	2,67
PME03	Alimentaire	2,77	3,00	3,00	2,92
PME04	Métal	2,68	2,04	2,91	2,54
PME05	Électronique	2,84	2,52	3,22	2,86
PME06	Métal	2,59	2,17	2,98	2,58
PME07	Bois	2,69	2,46	3,06	2,74
PME08	Aéronautique	2,69	2,67	3,07	2,81
PME09	Bois	2,09	2,47	2,09	2,22
PME10	Textile	1,80	2,00	2,15	1,98
PME11	Plastique	1,94	2,75	2,45	2,38
PME12	Électromécanique	2,49	2,83	3,24	2,85
PME13	Métal	2,09	3,17	2,77	2,68
PME14	Métal	2,55	2,48	2,67	2,57
PME15	Métal	2,76	2,11	3,12	2,66
Moyenne		2,48	2,50	2,85	2,61

La Figure 4.4 présente les résultats des expériences en fonction du secteur d'activités des entreprises. Les secteurs de l'alimentaire (2,80), de l'électronique et électromécanique (2,86) et de l'aéronautique (2,81) montrent une performance numérique supérieure à la moyenne. Les secteurs de bois (2,54) et de métal (2,61) se situent autour de la moyenne alors que les autres secteurs sont sous la barre du 2,61.



	Métal	Bois	Alimentaire	Électronique/ Électromécanique	Aéronautique	Plastique	Textile
Exc. Info.	2,53	2,40	2,78	2,66	2,69	1,94	1,80
Exp. Client	2,39	2,51	2,58	2,68	2,67	2,75	2,00
Gouv.	2,89	2,72	3,02	3,23	3,07	2,45	2,15
Maturité	2,61	2,54	2,80	2,86	2,81	2,38	1,98

Figure 4.4 : Résultats selon le secteur d'activités

4.4 Analyses des résultats préliminaires

Le Tableau 4.2 présente les résultats des tests d'hypothèse du projet pilote pour les trois axes de la performance numérique utilisés. Les tests ont été faits en comparant deux moyennes en fonction de l'utilisation ou non de la sous-dimension inscrite dans la première colonne. Les tests ont été faits à un degré de confiance de 90 %.

Les premières colonnes du Tableau 4.2 présentent les « p-value » résultant des tests d'hypothèse de chaque sous-dimension en rapport à l'excellence informationnelle, à l'expérience client et à la gouvernance. Dans le cas où la p-value a été démontrée significative (inférieure à 0,010), les valeurs de chaque niveau (où Niveau 0 = « Valeur non » et Niveau 1 = « Valeur oui ») ont été inscrites dans les colonnes suivantes. Par exemple, si l'infonuagique a été démontré significatif à 90 % sur l'expérience client, les données de chaque niveau se retrouveront dans la colonne « Expérience client » sur la ligne « Infonuagique » afin de montrer l'écart entre les deux niveaux. Les cellules vides

du Tableau ont été laissées inoccupées dans le seul but d'alléger le Tableau puisque les sous-dimensions en question n'ont pas démontré affecter significativement les axes de performance.

Tableau 4.2 : Résultats des tests d'hypothèse du projet pilote pour l'excellence informationnelle, l'expérience client et la gouvernance

	p-value			Exc. Info.			Exp. Client			Gouv.		
#Hypothèse / Sous-dimension	Exc. Info.	Exp. Client	Gouv	Valeur oui	Valeur non	% Écart	Valeur oui	Valeur non	% Écart	Valeur oui	Valeur non	% Écart
1. Veille sur Modèle d'Affaires	**0,032**	0,204	**0,037**	2,53	1,81	28,7 %	-	-	-	2,90	2,15	26,1 %
2. Veille technologique	**0,002**	0,597	**0,013**	2,58	1,87	27,3 %	-	-	-	2,94	2,30	21,7 %
3. Suivi de projets	**0,003**	0,291	**0,000**	2,66	2,10	21,1 %	-	-	-	3,08	2,34	24,1 %
4. Planification Capacité Finie	**0,000**	0,370	**0,001**	2,66	2,04	23,1 %	-	-	-	3,02	2,44	19,3 %
5. Instruction de travail	0,205	0,436	**0,048**	-	-	-	-	-	-	3,05	2,70	11,3 %
6. Pilotage d'usine	0,365	**0,099**	**0,086**	-	-	-	2,74	2,35	14,5 %	2,96	2,59	12,5 %
7. Infonuagique	0,448	**0,049**	0,825	-	-	-	3,50	2,60	25,6 %	-	-	-
8. Planification avec ERP	0,175	0,930	**0,055**	-	-	-	-	-	-	3,00	2,27	24,3 %
9. Ressources externes	0,391	0,135	**0,089**	-	-	-	-	-	-	2,95	2,59	12,2 %
10. Consommation d'énergie	**0,044**	0,559	0,167	2,74	2,32	15,2 %	-	-	-	-	-	-
11. Plan numérique	0,348	0,503	0,118	-	-	-	-	-	-	-	-	-
12. Maintenance préventive	**0,100**	0,430	**0,032**	2,61	2,27	13,3 %	-	-	-	3,00	2,56	14,6 %
13. Nomenclature	**0,004**	0,186	0,202	2,60	2,02	22,5 %	-	-	-	-	-	-
14. Échantillonnage (AQL)	0,169	**0,015**	0,725	-	-	-	2,75	2,27	17,4 %	-	-	-
15. Système ERP	**0,765**	**0,085**	**0,466**	**-**	**-**	**-**	**2,48**	**3,03**	**-22,4 %**	**-**	**-**	**-**
16. Temps réel	0,174	0,948	0,153	-	-	-	-	-	-	-	-	-
17. Calcul du coût de revient	0,539	0,821	0,208	-	-	-	-	-	-	-	-	-
18. Responsable TI interne	0,182	0,165	0,430	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19. Cybersécurité	0,405	0,680	0,449	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20. Communication M2M	0,622	0,906	0,539	-	-	-	-	-	-	-	-	-
21. Indicateurs de performance	0,267	0,782	0,761	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22. Système Qualité	0,568	0,993	0,696	-	-	-	-	-	-	-	-	-
23. Machines CNC	0,125	0,125	0,544	-	-	-	-	-	-	-	-	-
24. Orientation Services	0,746	*0,173*	0,715	-	-	-	-	-	-	-	-	-
25. Produits intelligents	0,441	0,811	0,104	-	-	-	-	-	-	-	-	-
26. Budget numérique	0,713	0,994	0,175	-	-	-	-	-	-	-	-	-

En complément au Tableau 4.2, le Tableau 4.3 présente les résultats des tests d'hypothèse sur la performance numérique globale. Dans ce tableau, il est possible d'y voir les sous-dimensions évaluées, les résultats des « p-value », les résultats pour chaque niveau étudié ainsi que l'écart en pourcentage entre les deux niveaux de chaque sous-dimension.

Tableau 4.3 : Résultats des tests d'hypothèse du projet pilote pour la performance numérique

#Hypothèse / Sous-dimension	p-value	Performance numérique		
	Perf. Num.	Valeur oui	Valeur non	% Écart
1. Veille sur Modèle d'Affaires	**0,009**	2,67	1,98	**25,6 %**
2. Veille technologique	**0,008**	2,69	2,18	**18,8 %**
3. Suivi de projets	**0,012**	2,79	2,29	**18,0 %**
4. Planification Capacité Finie	**0,024**	2,74	2,42	**11,5 %**
5. Instruction de travail	**0,039**	2,78	2,53	**8,9 %**
6. Pilotage d'usine	**0,050**	2,74	2,43	**11,6 %**
7. Infonuagique	0,114	3,10	2,56	17,3 %
8. Planification avec ERP	0,363	2,71	2,30	15,3 %
9. Ressources externes	**0,053**	2,70	2,40	**11,2 %**
10. Consommation d'énergie	**0,090**	2,83	2,53	**10,6 %**
11. Plan numérique	0,149	2,72	2,51	7,6 %
12. Maintenance préventive	0,278	2,68	2,49	7,1 %
13. Nomenclature	0,363	2,69	2,53	6,1 %
14. Échantillonnage (AQL)	0,820	2,62	2,59	1,3 %
15. Système ERP	**0,613**	**2,63**	**2,78**	**-5,4 %**
16. Temps réel	0,227	2,74	2,50	8,7 %
17. Calcul du coût de revient	0,381	2,68	2,49	7,2 %
18. Responsable TI interne	0,849	2,61	2,65	-1,4 %
19. Cybersécurité	0,644	2,64	2,53	3,8 %
20. Communication M2M	0,684	2,64	2,58	2,4 %
21. Indicateurs de performance	0,423	2,75	2,63	4,1 %
22. Système Qualité	0,645	2,61	2,52	3,4 %
23. Machines CNC	0,691	2,66	2,60	2,2 %
24. Orientation Services	0,542	2,68	2,56	4,7 %
25. Produits intelligents	0,425	2,79	2,69	3,9 %
26. Budget numérique	0,532	2,67	2,61	2,4 %

Les résultats des tests d'hypothèse tendent à démontrer, avec un degré de confiance de 90 %, que les entreprises qui pratiquent des activités de **veille** du modèle d'affaires (H.p.1) et de veille technologique (H.p.2) augmentent leur performance de 26 % et de 19 % respectivement. En plus d'avoir un effet positif de 25 % d'augmentation de l'excellence informationnelle, ces pratiques tendent également à augmente la gouvernance des entreprises de plus de 20 %. Ces résultats amènent alors à croire que

les entreprises qui se tiennent informées des nouvelles tendances technologiques et des pratiques dans leur secteur d'activités sont des entreprises plus ouvertes, plus organisées et qui profitent davantage des bénéfices liés aux dernières technologies et pratiques d'affaires. Les bénéfices semblent effectivement se concrétiser par des planchers de production plus efficaces, plus flexibles et plus automatisés et se manifestent aussi par une gouvernance plus libérée qui encourage davantage l'amélioration des processus, l'innovation et la participation active des employés.

Aussi, au sein de l'échantillon, les entreprises qui incluent une période de **suivi** des projets (H.p.3) à la suite de changements, voient augmenter leur performance numérique de 18 % à un degré de confiance de 90 %. Cette phase de projet a également pour effet d'augmenter le niveau d'excellence informationnelle et de gouvernance de 21 % et de 24 % respectivement.

La présence d'une planification à **capacité finie** (H.p.4) tend à avoir pour effet d'augmenter la performance numérique des entreprises de 11,5 %. L'effet est aussi démontré au niveau de l'excellence informationnelle et de la gouvernance qui tendent à augmenter respectivement de 23 % et de 19 %.

Les tests d'hypothèse démontrent aussi que les entreprises de l'échantillon qui utilisent des **instructions** de travail claires et accessibles aux employés (H.p.5) tendent à augmenter leur performance numérique de 9 % ainsi que leur niveau de gouvernance de 11 %.

Enfin, les entreprises de l'échantillon qui détiennent un processus défini de **pilotage** d'usine (H.p.6) et une ressource qui y est dédiée montrent une performance supérieure à 11,6 % par rapport à celles qui n'y accordent pas d'importance.

L'accès en temps réel aux données via **l'infonuagique** (Cloud) (H.p.7) a démontré une augmentation de 25,6 % de l'expérience client, à un degré de confiance de 90 %. L'effet sur la performance numérique n'a pas été démontré, mais cette dernière tend à augmenter de 17 % lorsqu'une entreprise utilise un système d'infonuagique.

Les entreprises de l'échantillon qui font la **planification** de leur production avec le système **ERP** (H.p.8) démontrent une structure de gouvernance plus importante que celles qui ne le font pas. La gouvernance augmente de 24 %, alors que la performance numérique, bien que non démontrée significative, tend à augmenter de 15 % à l'aide de cette pratique.

Les entreprises de l'échantillon qui emploient des **ressources externes** (H.p.9) pour les accompagner dans les différents projets et changements ont semblé augmenter leur performance numérique de 11 %. La gouvernance des entreprises tend aussi à augmenter de 12 %.

À 90 % de confiance, les tests d'hypothèse démontrent que l'excellence informationnelle tend à augmenter de 15 % lorsque les entreprises suivent les coûts de **consommation énergétique** (H.p.10) de leur usine. Ce facteur tend également à augmenter la performance numérique de 10,6 %.

Enfin, la présence d'un plan numérique (H.p.11) et l'utilisation de certaines pratiques du *lean* telles que la présence d'un plan de **maintenance** préventive (H.p.12), l'utilisation de **nomenclature** hiérarchique (H.p.13) et l'assurance qualité par **échantillonnage** (H.p.14) tendent à augmenter la performance numérique, mais sans effet significatif démontré. Le plan de maintenance préventive et les nomenclatures tendent respectivement à augmenter l'excellence informationnelle de 13,3 % et de 22,5 %. L'échantillonnage augmente à 90 % de confiance, l'expérience client d'une valeur de 17,4 %. Enfin, les plans de maintenance préventive tendent à augmenter la gouvernance des entreprises de 14,6 %.

Les tests d'hypothèse ont démontré que l'utilisation d'un **système ERP** (H.p.15) tend à diminuer la performance numérique et ses composantes. L'effet n'a pas été démontré significativement sur la performance numérique, mais tend à réduire le niveau d'expérience client de 22,4 % (colonne « Écart »). Le manque de maîtrise du système et la basse qualité des données qui sont entrées dans l'ERP peuvent effectivement nuire à

la performance des entreprises, mais le test d'hypothèse sur l'usage des systèmes ERP démontre que ce phénomène tend également à nuire à la relation avec le client.

Bien que non démontrée significativement, la capacité de collecter, traiter et diffuser de l'information en **temps réel** (H.p.16), reliée à la réactivité des entreprises, tendent à améliorer la performance numérique globale de près de 8 %. En effet, les tests d'hypothèse démontrent une tendance positive sur la performance numérique entre les entreprises qui mettent régulièrement à jour leur information et celles qui sont plus réactives.

Les autres facteurs étudiés dans cette analyse n'ont pas démontré d'effet significatif sur la performance numérique ou les trois axes de performance. En effet, les effets du calcul du coût de revient (H.p.17), de la présence d'un responsable TI à l'interne (H.p.18), des pratiques de cybersécurité (H.p.19), de la présence de système Machine-à-Machine (M2M) (H.p.20), de l'utilisation de KPI (indicateurs de performance) (H.p.21), d'un système qualité (H.p.22), de la présence de machines à commande numérique (CNC) (H.p.23), de l'orientation service des modèles d'affaires (H.p.24), de la présence de produits intelligents (H.p.25) et de l'importance du budget numérique annuel (H.p.26) n'ont donc pas été démontrés significatifs par l'étude des 15 entreprises pilotes.

4.5 Discussion

L'étude des 15 PME, *a priori* performantes numériquement, a démontré que ces dernières possèdent un niveau de performance de 65 % en moyenne (2,61/4). Toutes les entreprises auditées ont une excellence informationnelle sous la barre du 3 (75 %), alors que huit entreprises sur 15 dépassent cette valeur au niveau de la gouvernance. Au niveau de l'expérience client, 13 des 15 entreprises possèdent une expérience client inférieure à 3. Les secteurs de l'alimentaire (2,80), électronique et électromécanique (2,86) et de l'aéronautique (2,81) ont démontré être les secteurs les plus performants numériquement dans l'échantillon.

La plus grande faiblesse des entreprises participantes se situe surtout au niveau de l'excellence informationnelle (2,48), spécifiquement pour les secteurs du métal (2,53), du bois (2,40), du plastique (1,94) et du textile (1,80). Soulevées comme principales problématiques lors des rencontres avec les entreprises, le manque de données de production ou leur mauvaise qualité, le manque de suivi dans les projets et le manque de connexion, de maîtrise et d'intégration des technologies semblent entraver le flux de matière et d'information et occasionnent des limites de performance significative et un faible niveau d'excellence informationnelle.

Le manque de considération de l'expérience client (2,50) chez la majorité des entrepreneurs a également pour effet de diminuer le niveau de performance numérique global (2,61). Les entrepreneurs ne sont pas prêts à la cocréation, l'innovation ouverte et l'usage des médias sociaux. L'orientation service est présente dans le discours des entreprises, mais peu concrétisée. La personnalisation est souvent possible chez les entreprises, mais pas à un coût équivalent à une production de masse. La personnalisation de masse n'est pas encore maîtrisée.

La plus grande force des entreprises est leur gouvernance (2,85) qui les amène à se structurer, développer une vision et impliquer les employés dès le départ lors de projets d'amélioration et de transformation numérique. La plupart des entrepreneurs ont une vision ambitieuse, pratiquent des activités de veille technologique et revoient leurs modèles d'affaires et leurs méthodes de travail pour les adapter au potentiel des nouvelles technologies disponibles. Les dirigeants sont engagés et supportent l'innovation, la communication et la collaboration horizontale. Ils sont conscients qu'ils n'ont pas toutes les connaissances à l'interne et n'hésitent pas à faire appel à de l'aide extérieure pour les aider à avancer. Des efforts au niveau de la collaboration entre entreprises doivent toutefois être faits pour favoriser la flexibilité, l'efficacité et la personnalisation de masse.

4.6 Principales observations lors du projet pilote

Le projet pilote dans les 15 entreprises a démontré que le modèle d'évaluation de la performance numérique tenait la route par sa pertinence dans les entreprises rencontrées. Certaines questions, dimensions et sous-dimensions méritaient d'être revues pour répondre à l'objectif de la thèse. Le questionnaire initial comportait plus de 1000 questions à répondre en trois jours en entreprise. Parmi ces 1000 questions, 114 ont été répondues dans plus de 80 % des cas et 327 questions ont été répondues dans plus de 65 %. Les autres questions n'ont pas été considérées dans l'analyse des résultats en raison de la petite taille de l'échantillon. À partir de ces constats, il a été possible de filtrer le questionnaire initial et de faire ressortir les questions les plus pertinentes. Certaines questions ont été clarifiées, reformulées ou combinées pour éliminer les redondances. Une meilleure compréhension de la transformation numérique et de la réalité des entreprises à l'étude et une clarification des hypothèses de recherche ont aussi permis de retirer les questions qui n'offraient pas d'information exploitable. Le questionnaire final est présenté au prochain chapitre et constitue la base des expériences finales.

L'évaluation de la performance numérique des 15 entreprises a permis de démontrer que le niveau de performance est significativement affecté par les activités de veille, le suivi des projets, le pilotage d'usine, la planification à capacité finie et la présence d'instructions de travail. L'infonuagique, la planification de la production via un système ERP, l'emploi de ressources externes, la capacité de gestion en temps réel, la présence d'un plan numérique et certaines pratiques du *lean* tendent également à augmenter la performance des entreprises.

Les plans numériques issus de l'étude effectuée en entreprise ont permis d'amorcer une démarche de transformation numérique dans les 15 entreprises participantes. Des recommandations aux niveaux technologiques, numériques, de gestion et de relation-client ont été faites et ont mené à l'étude de diverses alternatives d'implantation. Grâce à l'étude des 15 entreprises, le modèle d'évaluation de la performance numérique a su

montrer sa pertinence dans les PME québécoises. Les 15 plans d'actions ont permis d'orienter les entreprises sur les projets les plus intéressants et qui affectent le plus leur excellence informationnelle, leurs relations-client ainsi que leur gouvernance. Le modèle étant validé et le questionnaire revu, le ministère a déployé le projet d'évaluation de la performance numérique à grande échelle.

CHAPITRE 5
EXPÉRIENCES FINALES ET RÉSULTATS

À la suite du projet pilote et du déploiement du modèle par le MÉSI à l'automne 2017, les entreprises manufacturières participant à l'évaluation de leur performance numérique reçoivent une subvention pour couvrir les frais encourus par la démarche. Néanmoins, pour pouvoir participer à un tel projet, les entreprises doivent préalablement répondre à deux critères. Les entreprises de cette étude ont été choisies parce qu'elles (1) ont démontré qu'elles ont fait une démarche de planification stratégique et (2) qu'elles possèdent un certain niveau de maturité organisationnelle, mesuré par le conseiller technologique du MÉSI à partir de l'usage de technologies numériques et d'outils du *lean*, de leur capacité financière et de leur potentiel à mettre en œuvre les projets de l'Industrie 4.0.

Le chapitre actuel couvre la description de l'échantillon d'entreprises qui a participé à cette thèse, le questionnaire final utilisé pour l'étude et les résultats des expériences.

5.1 Description de l'échantillon

Les 21 expériences menées pour cette thèse sont totalement indépendantes de l'échantillon utilisé lors du projet pilote présenté au Chapitre 4. Ces 21 nouvelles entreprises ont été choisies par le MÉSI, qui leur a offert une subvention pour couvrir les frais de la démarche. La Figure 5.1 présente la répartition des entreprises par secteur d'activités.

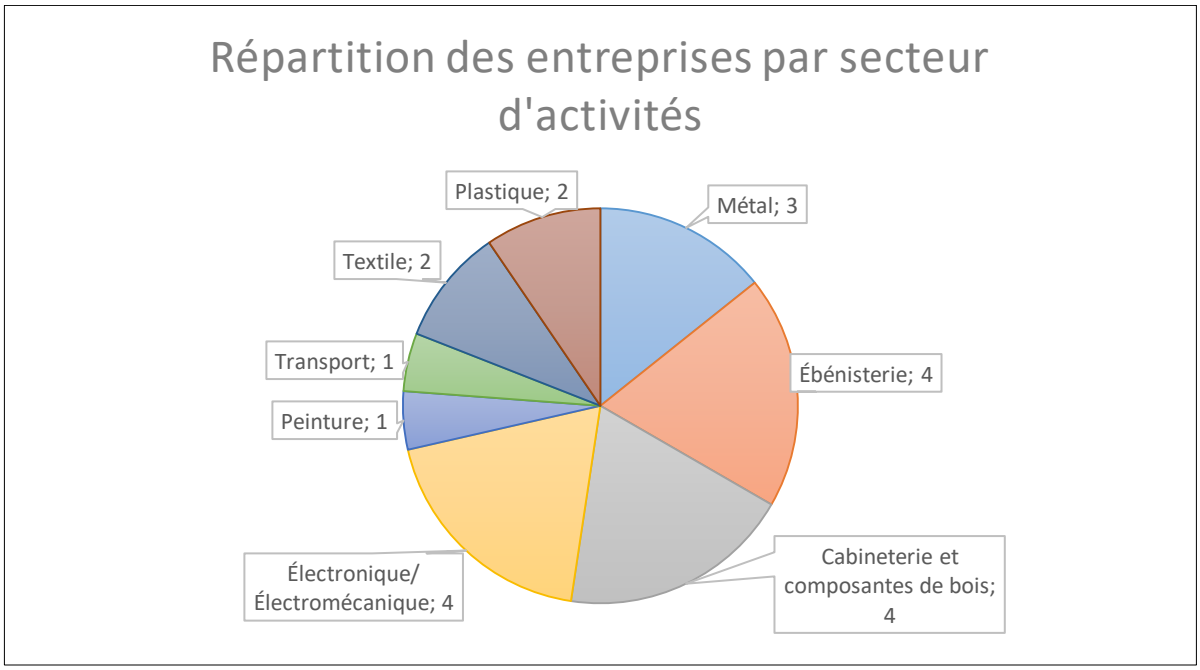


Figure 5.1 : Entreprises présentées par secteur d'activités

Dans un souci de représentativité, les entreprises sélectionnées opéraient dans plusieurs régions administratives. La répartition des entreprises en fonction de leur région administrative est présentée à la Figure 5.2.

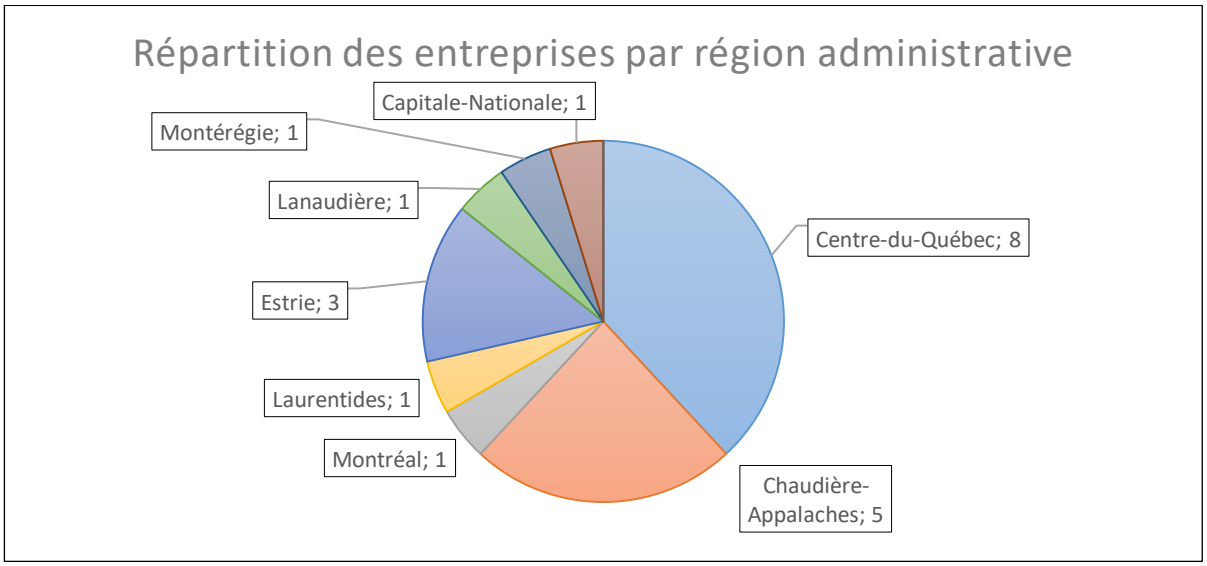


Figure 5.2 : Entreprises présentées par région administrative

5.2 Questionnaire final

Les questions utilisées pour les expériences finales sont présentées dans cette section. Posées lors de l'étape des questionnaires, ces dernières visent à évaluer chaque pratique d'affaires de façon indépendante en fonction d'un énoncé et du degré d'acceptation du répondant face à cet énoncé selon une échelle de Likert graduée de 0 à 4. Les questions ont été développées en fonction de chaque pratique d'affaires soulevée dans le modèle de la Figure 2.8 afin de mesurer individuellement, les pratiques d'affaires en place dans l'entreprise. Les entrevues en personnes ont ensuite permis de remettre en perspective les réponses aux énoncés et valider le niveau de performance numérique, présenté à la Figure 3.2, associé à chaque question. L'objectif de ces entrevues est de faire le lien entre une impression vécue par un répondant et le degré d'intégration des systèmes et de la capacité de gestion en temps réel en place dans l'entreprise. Les 109 questions sont présentées au Tableau 5.1 et seront utilisées pour aider à développer la stratégie efficiente de passage au 4.0 présentée au Chapitre 7.

Tableau 5.1 : Questionnaire final

Dimension	Pratique d'affaires	Question
Leadership (LDS)	Vision et Stratégie	Notre vision 4.0 est cohérente avec les objectifs d'affaires de l'entreprise
		Notre vision 4.0 est révisée régulièrement
		Notre vision 4.0 et notre stratégie d'intégration sont communiquées et partagées efficacement
		Notre entreprise a développé une vision de l'intégration d'outils numériques dans ses activités
		Nous avons développé une stratégie d'intégration des technologies numériques cohérente avec la vision 4.0
		Tous les employés comprennent l'impact de la vision 4.0 sur leur travail
	Veille technologique	Les objectifs visés par les activités de veille technologique de mon entreprise sont définis
		Les résultats des activités de veille technologique sont répertoriés et diffusés dans mon entreprise
		Mon entreprise participe à des activités de veille technologique telles que : événements, salons ou conférences réunissant des experts du milieu
		Mon entreprise se tient informée sur les nouvelles technologies pertinentes à nos activités
	Nouveaux modèles d'affaires	Les technologies numériques que nous possédons permettent d'améliorer nos pratiques d'affaires
		Nous intégrons les données des technologies numériques pour créer de nouveaux services
		Nous nous tenons informés des changements économiques de notre secteur d'activité
		Nous offrons ou envisageons d'offrir prochainement des services en complément de nos produits
		Nous posons des actions concrètes pour varier notre offre de services
	Engagement et exemplarité	La direction persévère dans la démarche de réalisation de la vision 4.0 malgré les difficultés
		Les employés clés sont impliqués dans les processus d'innovation et d'adoption des technologies
		Les employés comprennent comment les technologies vont les aider à accomplir leurs tâches et à atteindre les objectifs de l'entreprise
		Les employés comprennent leur rôle dans la stratégie d'intégration des technologies numériques
		Nous avons un plan numérique qui comprend des objectifs concrets (responsable, délais, actions, etc.)

Tableau 5.1 : Questionnaire final (suite)

Dimension	Pratique d'affaires	Question
Culture et organisation (CLT)	Gestion du changement	Des techniques concrètes (affiches, courriels, communications internes) sont utilisées pour communiquer la culture de notre entreprise, qui se compose de notre mission, de nos valeurs et de nos règles de fonctionnement
		La culture de notre entreprise est bien comprise de tous
		La direction fait des efforts concrets pour que les employés se sentent interpellés par la culture de l'entreprise
		Notre démarche de gestion du changement implique les employés directement
		Nous avons une démarche structurée pour gérer le changement dans notre entreprise
	Agilité et innovation	Notre équipe collabore avec un réseau de spécialistes diversifié (ex : consultants, chercheurs…)
		Notre équipe s'adapte rapidement lors de situations nouvelles
		Notre équipe se sent encouragée à innover par la direction de l'entreprise
		Nous réévaluons nos pratiques sur une base régulière pour abandonner celles qui ne sont plus pertinentes
	Investissement et ressources disponibles	Notre budget d'acquisition, de formation et de maintien des technologies prévoit l'acquisition d'automates ou de robots
		Notre budget d'acquisition, de formation et de maintien des technologies prévoit l'acquisition de logiciels
		Notre budget d'acquisition, de formation et de maintien des technologies prévoit l'acquisition de matériel de communication (site Web, e-commerce, présence sur les médias sociaux, plateforme de communication interne…)
		Notre budget d'acquisition, de formation et de maintien des technologies prévoit l'acquisition de matériel informatique
		Nous investissons dans les technologies pour accroitre notre productivité
		Nous investissons dans les technologies pour améliorer notre infrastructure numérique
		Nous investissons dans les technologies pour innover dans nos procédés
	Acquisition et développement de compétences	La direction comprend les besoins en numérique de notre processus d'affaires
		L'entreprise a créé des programmes de formation au numérique pour tous les employés concernés
		L'entreprise fournit la formation et alloue du temps afin que les employés maîtrisent les technologies
		L'entreprise sait attirer, motiver et fidéliser les employés talentueux
	Ouverture à l'externe et innovation ouverte	Les employés de notre processus d'affaires acceptent les innovations qui n'ont pas été développées à l'interne
		Nous travaillons en collaboration avec des acteurs externes dans le but d'innover
		Nous travaillons en collaboration avec fournisseurs, clients et partenaires dans le but d'améliorer nos performances
	Lean et Amélioration continue	Des indicateurs de performance sont en place pour mesurer notre processus d'affaires
		Les principes de l'amélioration continue sont utilisés dans notre processus d'affaires
		Un climat favorable à l'amélioration continue est en place dans notre processus d'affaires
	Communication interne	Il y a une bonne communication pour les enjeux touchant notre processus d'affaires
		La culture de collaboration est promue par les dirigeants de l'entreprise
		Les employés de notre processus d'affaires utilisent des outils de collaboration numériques dans leurs communications
		Les objectifs financiers qui concernent notre processus d'affaires sont clairs et compris par les employés

Tableau 5.1 : Questionnaire final (suite)

Dimension	Pratique d'affaires	Question
Gestion des Technologies (TEC)	Écosystème et architecture	Il existe dans l'entreprise une carte à jour et détaillée de l'architecture et l'écosystème technologique complet de l'entreprise
		Les standards à respecter pour les technologies de l'entreprise sont définis
		Les technologies utilisées dans les opérations et la prise de décision de notre processus d'affaires répondent à mes besoins
		Les technologies utilisées dans les opérations et la prise de décision de notre processus d'affaires sont faciles à utiliser
		Les technologies utilisées dans les opérations et la prise de décision de notre processus d'affaires sont interreliées
		Les technologies utilisées dans les opérations et la prise de décision de notre processus d'affaires sont rapides
	Maîtrise des technologies	Des équipes multidisciplinaires sont formées lors de projets d'implantation des technologies
		La direction, le personnel technique et les employés s'entendent sur les objectifs auxquels les technologies doivent répondre
		La direction, le personnel technique et les employés s'entendent sur les priorités technologiques
		Les employés de notre processus d'affaires ont accès au soutien technique adéquat lié à l'utilisation des technologies à leur disposition
		Les employés de notre processus d'affaires possèdent les compétences pour bien utiliser les technologies à leur disposition
		Les employés de notre processus d'affaires sont impliqués dans l'implantation des technologies qu'ils auront à utiliser.
	Automatisation	L'information envoyée est numérique
		L'information reçue dans notre processus d'affaires est numérique
		Les employés de notre processus d'affaires ont peu ou pas de tâches répétitives à faire
		Les employés de notre processus d'affaires reçoivent des suggestions de la part des machines ou des systèmes
		L'information envoyée peut être utilisée sans être manipulée en tout ou en partie
		L'information reçue peut être utilisée sans être manipulée en tout ou en partie
	Sécurité informatique	L'entreprise a un plan de continuité pour remettre ses affaires en marche après sinistre (vols, piratage, incendie)
		Les employés n'ont accès qu'aux systèmes (logiciels, automates, machines) dont ils ont besoin
		Les interactions des employés avec les systèmes sont restreintes à ce qui est strictement nécessaire
		Les systèmes de sécurité informatique sont mis à jour sur une base régulière et systématiquement après la découverte d'une faille
		Tous les employés comprennent les risques en lien avec la sécurité informatique

Tableau 5.1 : Questionnaire final (suite)

Dimension	Pratique d'affaires	Question
Gestion des données (DNE)	Acquisition des données	La maintenance sur les bases de données est faite en continu
		Les bases de données appropriées sont en place dans l'entreprise
		Les besoins d'affaires en matière d'entreposage des données sont analysés
	Livraison des données	Les données nécessaires aux analyses et à la prise de décision sont accessibles sans manipulation (ex : tableaux croisés) par l'utilisateur
		Les systèmes d'aide à la décision appropriés sont en place dans l'entreprise
		L'information nécessaire aux analyses et à la prise de décision est disponible
	Qualité des données	Des actions correctives sont effectuées lorsque l'on détecte un problème de qualité des données
		Des actions ont été mises en place pour s'assurer de la qualité des données à la source (bonne saisie)
		Il n'existe qu'une seule version de chaque entité (ex: un seul dossier par client)
		La qualité des données est surveillée continuellement
		Les standards de qualité des données sont établis
Expérience client (EXP)	Personnalisation	La capacité de personnalisation des produits et services est définie
		La production permet de s'adapter à des lots uniques à un coût raisonnable
		Le client peut configurer lui-même certains éléments du produit sur une plateforme numérique libre-service (portail, site Web…)
		L'entreprise est en mesure de personnaliser son offre à un client en fonction de ses données (habitudes, historique, etc.)
	Engagement et cocréation	L'entreprise entretient une relation d'écoute avec le client tout au long du processus de création
		L'entreprise est en mesure de collecter les commentaires et les attentes des clients pour développer ou améliorer les produits
		L'entreprise offre au client de participer de façon constructive au processus de création
	Orientation service et Fidélisation	L'entreprise est en mesure de cibler les clients qui lui apportent le plus de valeur
		L'entreprise mesure la satisfaction de ses clients par rapport à ses produits et services
		L'entreprise mesure l'intention de ses clients d'acheter ses produits et services
		L'entreprise mesure l'intention de ses clients de ne pas acheter ses produits et services
		L'entreprise mesure l'intention de ses clients de recommander ses produits et services à ses pairs
	Commerce électronique et SMAC	Les clients peuvent effectuer des achats de produits en ligne de façon autonome
		Les médias électroniques (logiciels de communication, réseaux sociaux, portails…) sont utilisés pour échanger de l'information avec les clients, fournisseurs et partenaires
		Les médias sociaux sont utilisés pour aller chercher de l'information sur les clients
		Les médias sociaux sont utilisés pour créer une relation de proximité avec les clients

Tableau 5.1 : Questionnaire final (suite)

Dimension	Pratique d'affaires	Question
Système de mesure (MSR)	Utilisation des données dans les opérations	Les données nécessaires à la prise de décision sont mises à jour en temps réel
		Les employés affectés aux tâches de ce processus d'affaires ont accès à des outils d'aide à la décision (indicateurs clés de performance, tableaux de bord, rapports…)
		Les employés peuvent facilement accéder aux données dont ils ont besoin
		Les employés utilisent les données pour prendre des décisions efficaces
	Utilisation des données dans les décisions stratégiques	Je m'assiste d'outils d'aide à la décision (KPI, tableaux de bord…)
		Je suis en mesure d'ajuster ma stratégie à l'aide des données et de l'information disponibles
		Je suis en mesure d'analyser la situation de mon entreprise
		Je suis en mesure d'avoir une vue d'ensemble complète des opérations
		Je suis en mesure d'identifier les tendances, opportunités et menaces de mon environnement

5.3 Résultats et analyse descriptive

Le Tableau 5.2 présente les résultats pour chaque dimension pour les 21 entreprises.

Tableau 5.2 : Résultats par dimensions pour les 21 entreprises

Entreprise	Dimensions						Perf. Num.
	LDS	CLT	TEC	DNE	EXP	MSR	
PME1	1,63	2,61	1,89	1,84	1,82	2,15	1,99
PME2	2,06	2,5	2,2	2,62	2,08	1,7	2,19
PME3	2	1,99	1,67	2,13	2,36	1,84	2
PME4	1,51	2,62	2	0,67	1,54	2,13	1,74
PME5	2,59	3,06	2,54	1,87	2,03	2,75	2,47
PME6	1,74	1,99	1,43	1,56	1,24	1,25	1,54
PME7	3,53	3,11	2,26	2,18	2,45	2,61	2,69
PME8	2,15	2,45	1,98	1,62	1,38	1,82	1,9
PME9	2,07	2,78	2,13	2	2,38	1,84	2,2
PME10	1,29	2,17	1,67	2,04	1,71	2,44	1,89
PME11	2,28	2,25	2,29	2,36	2,12	1,69	2,16
PME12	1,83	2,36	2,41	2,3	2,07	1,91	2,15
PME13	2,83	3,32	2,53	2,42	1,98	2,41	2,58
PME14	2,24	2,53	2,39	3,36	2,25	2,56	2,55
PME15	2,3	2,6	2,32	1,64	1,73	2,33	2,15
PME16	1,76	2,77	2,42	2,38	1,94	2,64	2,32
PME17	1,76	2,75	2,45	2,38	1,59	2,61	2,26
PME18	2,03	2,45	1,87	1,87	2,28	2,01	2,08
PME19	2,93	3,24	2,99	3,19	2,72	2,95	3
PME20	2,14	2,35	1,71	1,27	1,94	1,61	1,84
PME21	1,45	2,45	2,56	2,56	2,48	2,08	2,26
Moyenne	2,13	2,6	2,16	2,08	1,98	2,16	2,18

À partir des résultats présentés au Tableau 5.2, il est possible de voir que la moyenne de la performance numérique des 21 entreprises est 2,18. Basée sur l'échelle de performance présentée à la Figure 3.2, une moyenne de 2,18 pour la performance numérique des entreprises signifie que l'échantillon possède un niveau de performance numérique discipliné, mais peu intégré et pas en temps réel.

Un test de normalité a montré que les données suivent une loi normale. Les résultats du test sont présentés à l'Annexe 3. En outre, 15 entreprises sur 21 ont reçu une valeur de

performance numérique à l'intérieur d'un écart-type (0,34) autour de la moyenne, cinq sont à deux écart-types et une à trois écart-types. Le coefficient de variation de 16 % montre une certaine homogénéité dans les données. Cette homogénéité peut notamment être expliquée par les critères de sélection des entreprises à la démarche d'évaluation de la performance numérique, puisque les PME sollicitées devaient avoir mis en marche un cheminement de planification stratégique et des actions concrètes en amélioration continue.

Dans le Tableau 5.2, il est possible de voir que la dimension avec le score moyen le plus élevé est la culture et l'organisation, alors que celles avec les scores les plus faibles sont l'expérience client et la gestion de la donnée. Les scores associés à la culture et l'organisation démontrent en effet le caractère familial et peu hiérarchisé souvent retrouvé dans les Petites et Moyennes Entreprises, encourageant l'ouverture au changement, à l'autonomie, à l'innovation et à la participation des employés au quotidien, affectant alors le score associé à cette dimension. De son côté, l'expérience client est sortie faible dans presque toutes les entreprises de l'échantillon, indépendamment de la valeur de performance numérique. Ceci se manifeste entre autres, par le peu d'importance accordé à l'expérience client par rapport aux autres dimensions en ce qui a trait à leur transformation numérique.

On constate qu'en moyenne, les entreprises manquent d'intégration entre leurs systèmes et leur capacité à acquérir, à traiter et à diffuser des données de qualité en temps réel. Seules deux entreprises de l'échantillon ont eu un score supérieur à 3 concernant la gestion des données (PME14 et PME19). Ces dernières possédaient effectivement des données de qualité et à jour, mais manquaient d'intégration pour certains processus et ne savaient pas comment analyser les données pour prendre de meilleures décisions. Les scores associés au système de mesure (MSR) pour ces entreprises étaient par ailleurs inférieurs à ceux de la gestion de la donnée (DNE).

Enfin, le leadership, la gestion des technologies et le système de mesure ont tous des scores moyens autour de 2,15. Ces dimensions montrent alors un niveau discipliné avec

un début d'intégration entre les processus. La plupart des entreprises possédaient en effet un système ERP, mais la majorité utilisait également des systèmes parallèles pour pallier les lacunes du ERP ou au manque de formation quant à son utilisation. Un score autour de 2,15 montre une gestion à l'instinct avec un début de structure, mais sans être totalement intégré.

La Figure 5.3 présente la proportion de chaque entreprise en fonction des quatre niveaux de performance numérique étudiés à savoir, le niveau artisanal, discipliné, intégré et en temps réel. Pour le regroupement, le niveau 1 (artisanal) a été déterminé selon les valeurs inférieures à 1,5/4 pour la dimension mesurée. Le niveau 2 (discipliné) représente les valeurs situées entre 1,5 et 2,5/4. Le niveau 3 (intégré) correspond aux valeurs entre 2,5/4 et 3,5/4 et finalement, le niveau 4 (en temps réel) représente les valeurs de 3,5/4 et plus.

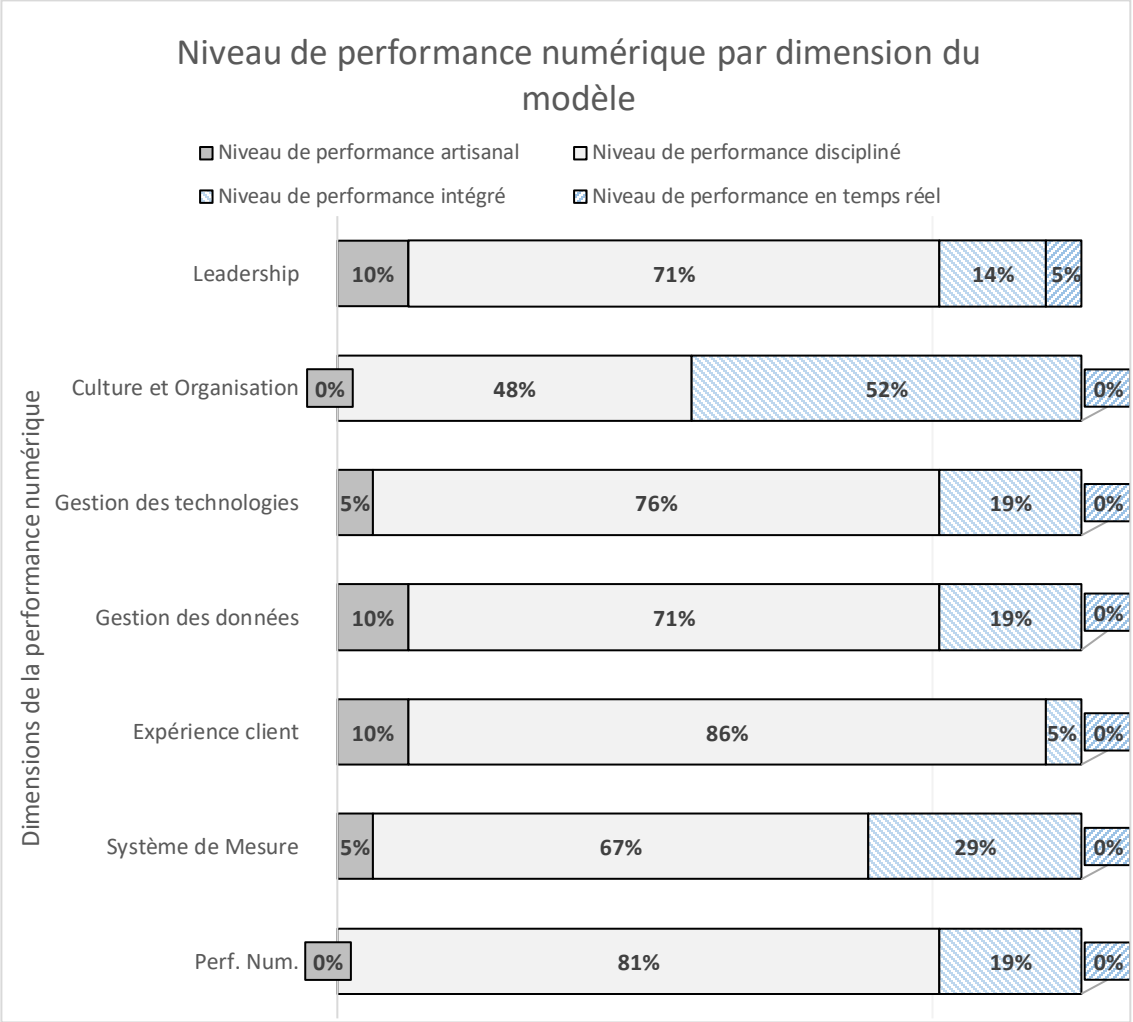


Figure 5.3 : Répartition des entreprises selon le niveau de performance numérique de chaque dimension du modèle

Il est possible de constater à la Figure 5.3 que plus de 70 % des entreprises sont à un niveau numérique discipliné pour la majorité des dimensions étudiées, bien que certaines tendent vers l'intégration de leurs processus et logiciels. Concrètement, ceci peut se manifester par l'usage d'un système de gestion intégré, additionné de multiples fichiers Excel et autres logiciels utilisés en parallèle. Ces ajouts reflètent un manque de rigueur, un mauvais choix de système ERP ou manque de formation par exemple. Les niveaux présentés à la Figure 5.3 sont ceux qui ont été utilisés pour effectuer les tests d'hypothèses au Chapitre 6. Par exemple, les tests sur la dimension Leadership

comparent la moyenne des entreprises avec une performance artisanale et disciplinée (Niveau 1) et les entreprises avec un niveau intégré et en temps réel (Niveau 2). Visuellement, ceci revient à comparer les moyennes des entreprises se situant dans le gris (10 % + 71 %) à celles dans le bleu hachuré (14 % + 5 %).

5.3.1 Analyse par pratique d'affaires

Le Tableau 5.3 présente les résultats des 24 pratiques d'affaires pour les 21 entreprises. Les codes utilisés pour lister les pratiques d'affaires sont les mêmes que ceux présentés dans la Méthodologie au Chapitre 3.

Tableau 5.3 : Résultats par pratiques d'affaires pour les 21 entreprises

Pratique d'affaires	PME1	PME2	PME3	PME4	PME5	PME6	PME7	PME8	PME9	PME10	PME11	PME12	PME13	PME14	PME15	PME16	PME17	PME18	PME19	PME20	PME21	Moyenne
VSN	0,83	1,50	1,17	0,50	2,00	1,17	3,00	1,00	1,67	1,00	1,75	1,00	2,67	1,50	1,83	1,00	1,00	1,00	2,33	1,67	0,00	1,41
VLE	2,50	2,75	2,25	1,75	2,75	2,00	3,50	3,00	2,00	1,75	2,25	2,50	3,25	2,25	2,75	2,25	2,25	2,50	3,00	2,50	3,00	2,51
NMA	1,60	2,40	2,60	2,40	2,80	2,00	4,00	2,20	2,40	0,80	2,60	2,40	2,40	2,60	1,40	1,80	1,80	2,80	3,60	2,80	1,40	2,32
ENG	1,60	1,60	2,00	1,40	2,80	1,80	3,60	2,40	2,20	1,60	2,50	1,40	3,00	2,60	3,20	2,00	2,00	1,80	2,80	1,60	1,40	2,16
GCH	2,76	2,50	1,42	2,98	3,18	2,04	3,12	1,86	2,56	1,52	2,22	1,94	3,32	2,22	2,38	3,06	3,00	1,78	3,08	2,28	2,70	2,47
AGI	2,40	2,48	2,15	2,75	2,93	2,43	3,15	2,45	2,95	2,65	2,13	2,63	3,13	2,65	2,58	2,88	2,88	2,68	3,08	2,48	2,43	2,66
RES	3,00	2,86	2,29	2,14	3,57	1,86	4,00	3,29	4,00	3,00	2,71	2,29	4,00	2,71	3,57	2,43	2,43	2,86	4,00	2,00	2,00	2,90
COMP	2,25	2,38	1,45	2,70	2,60	1,83	2,38	1,83	1,90	2,15	2,08	1,88	3,03	2,18	2,45	2,63	2,48	1,95	2,98	2,38	1,93	2,26
OUV	2,67	3,00	2,70	2,63	3,03	3,00	3,23	3,53	2,80	2,50	2,67	2,83	3,53	3,20	2,13	3,07	3,07	2,70	3,33	2,87	2,77	2,92
LEAN	2,47	2,00	1,90	2,50	3,43	1,17	2,93	1,93	2,60	1,37	1,90	2,47	3,13	2,40	2,57	2,47	2,57	2,63	3,20	2,07	2,50	2,39
COMM	2,70	2,28	2,05	2,63	2,68	1,65	2,93	2,28	2,63	1,98	2,08	2,50	3,10	2,38	2,55	2,85	2,85	2,55	3,03	2,40	2,83	2,52
ÉCO	1,02	1,93	0,93	1,38	2,13	0,63	2,05	1,62	1,77	1,48	1,85	2,20	2,40	1,47	1,95	2,38	2,28	1,38	2,85	1,65	2,32	1,79
MAÎT	2,42	2,43	1,82	2,37	2,85	2,15	2,77	2,22	2,62	1,95	2,67	2,17	2,83	2,68	2,45	2,40	2,53	2,25	3,02	2,25	2,38	2,44
AUTO	1,72	1,33	1,62	2,03	1,98	1,05	2,32	1,68	1,73	0,85	1,90	1,87	1,88	2,52	2,18	2,28	2,38	2,15	2,73	1,53	1,93	1,89
SÉCU	2,40	3,10	2,30	2,20	3,20	1,90	1,90	2,40	2,40	2,40	2,74	3,40	3,00	2,90	2,70	2,60	2,60	1,70	3,34	1,40	3,60	2,58
COL	2,00	3,00	3,00	1,67	3,00	2,67	3,00	2,67	2,00	2,67	2,33	3,33	3,33	3,67	1,67	2,67	2,67	1,67	3,67	2,00	3,00	2,65
LIV	1,33	2,67	2,00	0,33	1,00	1,00	1,33	1,00	2,00	1,67	2,33	1,67	2,33	3,00	1,67	2,67	2,67	2,33	3,00	1,00	2,67	1,89
QLT	2,20	2,20	1,40	0,00	1,60	1,00	2,20	1,20	2,00	1,80	2,40	1,90	1,60	3,40	1,60	1,80	1,80	1,60	2,90	0,80	2,00	1,78
PERS	1,60	3,10	2,33	1,93	2,50	1,85	2,50	1,43	2,40	1,25	2,13	1,35	2,00	3,25	1,00	2,25	0,90	2,03	3,35	2,58	2,00	2,08
COCR	2,67	1,33	3,67	0,00	2,67	2,00	3,33	1,67	3,00	2,00	2,50	2,67	2,00	0,00	2,67	2,00	2,33	2,33	1,67	3,17	3,33	2,24
FID	1,40	2,40	2,30	1,92	1,20	0,30	2,10	1,30	2,30	2,00	1,98	3,10	1,90	2,50	1,90	2,20	2,10	3,10	3,12	1,60	3,00	2,08
eCOM	1,63	1,50	1,15	2,30	1,75	0,83	1,85	1,13	1,83	1,60	1,88	1,15	2,03	3,25	1,35	1,33	1,03	1,68	2,73	0,40	1,60	1,62
UOP	1,70	1,48	1,55	2,05	2,75	1,03	2,30	1,70	1,38	1,88	1,60	2,03	2,45	2,45	2,25	2,55	2,50	2,08	2,95	1,63	1,83	2,00
UST	2,60	1,92	2,12	2,20	2,74	1,48	2,92	1,94	2,30	3,00	1,78	1,80	2,36	2,66	2,40	2,72	2,72	1,94	2,94	1,60	2,34	2,31

Au Tableau 5.3, il est possible de voir que la veille technologique (VLE), l'agilité et l'innovation (AGI), l'investissement et les ressources disponibles (RES), l'ouverture à l'externe (OUV), la communication interne (COMM), la sécurité informatique (SÉCU) et l'acquisition des données (COL) sont les pratiques d'affaires avec des scores moyens les plus élevés dans les 21 entreprises.

Les résultats montrent en effet que la moyenne pour la pratique d'affaires Veille technologique (VLE) est de 2,51. Ce résultat nous amène à croire que les entreprises de l'échantillon semblent s'informer des dernières tendances numériques, ce qui est encourageant dans le cadre d'une démarche de transition au 4.0. Le résultat pour l'Agilité et l'Innovation (AGI) de 2,66 suggère que les entreprises mettent des efforts importants pour développer et maintenir un niveau de flexibilité, de vitesse d'adaptation et d'innovation. Au niveau de l'Investissement et des ressources disponibles (RES) et de l'Ouverture à l'externe (OUV), les résultats de 2,90 et 2,92 montrent que les entreprises semblent libérer du temps, de l'argent et des ressources internes et externes pour la mise en œuvre de leurs projets de transformation numérique. Ces valeurs indiquent aussi que les entreprises sont prêtes à investir, mais que l'absence d'une stratégie numérique claire semble limiter l'avancement de la transformation numérique des entreprises.

De plus en plus, les entreprises cherchent à améliorer leur système de communication interne via entre autres, l'usage de iPads, de l'infonuagique, d'Intranets, ou de plateformes collaboratives; ce constat est d'ailleurs appuyé par le score de 2,52 pour la pratique d'affaires Communication interne (COMM). Les entreprises semblent toutefois au début de l'intégration de ces technologies étant donné que la valeur n'est que 2,52/4. La valeur de 2,58 pour la pratique d'affaires Cybersécurité (SÉCU) montre la tendance des entreprises à mettre en place une structure de cybersécurité, sans toutefois l'intégrer complètement à toutes les technologies en place. La plupart des entreprises rencontrées étaient sensibilisées à l'importance de cette pratique d'affaires et sous-traitaient complètement les activités de cybersécurité avec des firmes spécialisées, sans toutefois mettre en place une structure interne rigide. Enfin, le résultat de 2,65 pour l'Acquisition

des données (COL) montre que les entreprises semblent accorder de l'importance à la donnée pour exécuter leurs tâches. Les valeurs associées à la livraison (LIV) (1,89) et la qualité (QLT) (1,78) de la donnée suggèrent toutefois que, bien que les entreprises collectent de la donnée, peu d'efforts sont mis en place pour assurer une donnée de qualité, intègre et accessible sans manipulation, soulevant par le fait même la question de la pertinence de la donnée collectée.

Bien que ces pratiques d'affaires soient les plus fortes en moyenne chez les 21 entreprises de l'échantillon, ces résultats sont tous en dessous de 3, soit sous le niveau intégré. En se basant sur l'échelle de la Figure 3.2, ceci suggère donc que ces pratiques sont bien structurées, mais qu'elles ne sont pas complètement intégrées ou supportées par des technologies numériques.

De l'autre côté, la vision et la stratégie (VSN), l'écosystème et l'architecture numérique (ÉCO), l'automatisation (AUTO), la livraison (LIV) et la qualité des données (QLT) et le commerce électronique (eCOM) sont les pratiques d'affaires avec les scores moyens les moins élevés, avec des résultats sous la barre du 2/4.

La valeur de 1,41 pour la pratique d'affaires Vision et stratégie (VSN) montre que les entreprises de l'échantillon ne semblent pas savoir par où et comment avancer dans la direction de l'Industrie 4.0, rappelant ainsi le besoin de développer une stratégie efficiente de passage au numérique. Puisque l'exercice de planification stratégique devait avoir été faite pour être sélectionné à l'étude, le résultat de cette pratique d'affaires suggère que les entrepreneurs n'avaient pas tous intégré le volet sur la transformation numérique dans leur plan stratégique. Le résultat de 1,79 pour l'écosystème et l'architecture (ÉCO) montre que les entreprises ne semblent pas maîtriser les interrelations entre les différents systèmes numériques. Ce constat explique possiblement la raison pour laquelle la plupart des résultats des expériences sont sous la barre du 3/4. Le résultat de cette pratique d'affaires nous amène à croire que sans architecture numérique structurée, l'intégration entre les systèmes et la capacité de gestion en temps réel sont plus difficiles à atteindre.

Le résultat de 1,89 pour la pratique d'affaires Automatisation montre que peu d'entreprises dans l'échantillon ne semblent avoir numérisé leurs processus à l'heure actuelle ou que leurs processus automatisés ne sont ni intégrés ni en temps réel. Un parallèle peut alors être fait entre le résultat d'Automatisation et de Vision et stratégie puisque les entreprises semblent être au début de leur transformation numérique et paraissent vouloir automatiser les processus, mais ne savent pas par où commencer, expliquant le faible résultat pour la pratique d'affaires Automatisation (AUTO). Tel que discuté précédemment, les valeurs de 1,89 et 1,78 respectivement pour la livraison (LIV) et la qualité de la donnée (QLT) montrent que peu d'efforts semblent fournis par les entreprises de l'échantillon, pour assurer que les données collectées sont intègres, de bonne qualité et accessibles sans manipulation. Enfin, la valeur de 1,62 pour la pratique d'affaires e-Commerce (eCOM) suggère que les entreprises n'utilisent pas encore le commerce électronique et les réseaux sociaux dans leurs pratiques d'affaires ou le font de façon sporadique et peu structurée.

La Figure 5.4 présente la répartition des entreprises selon les quatre niveaux de performance numérique étudiés.

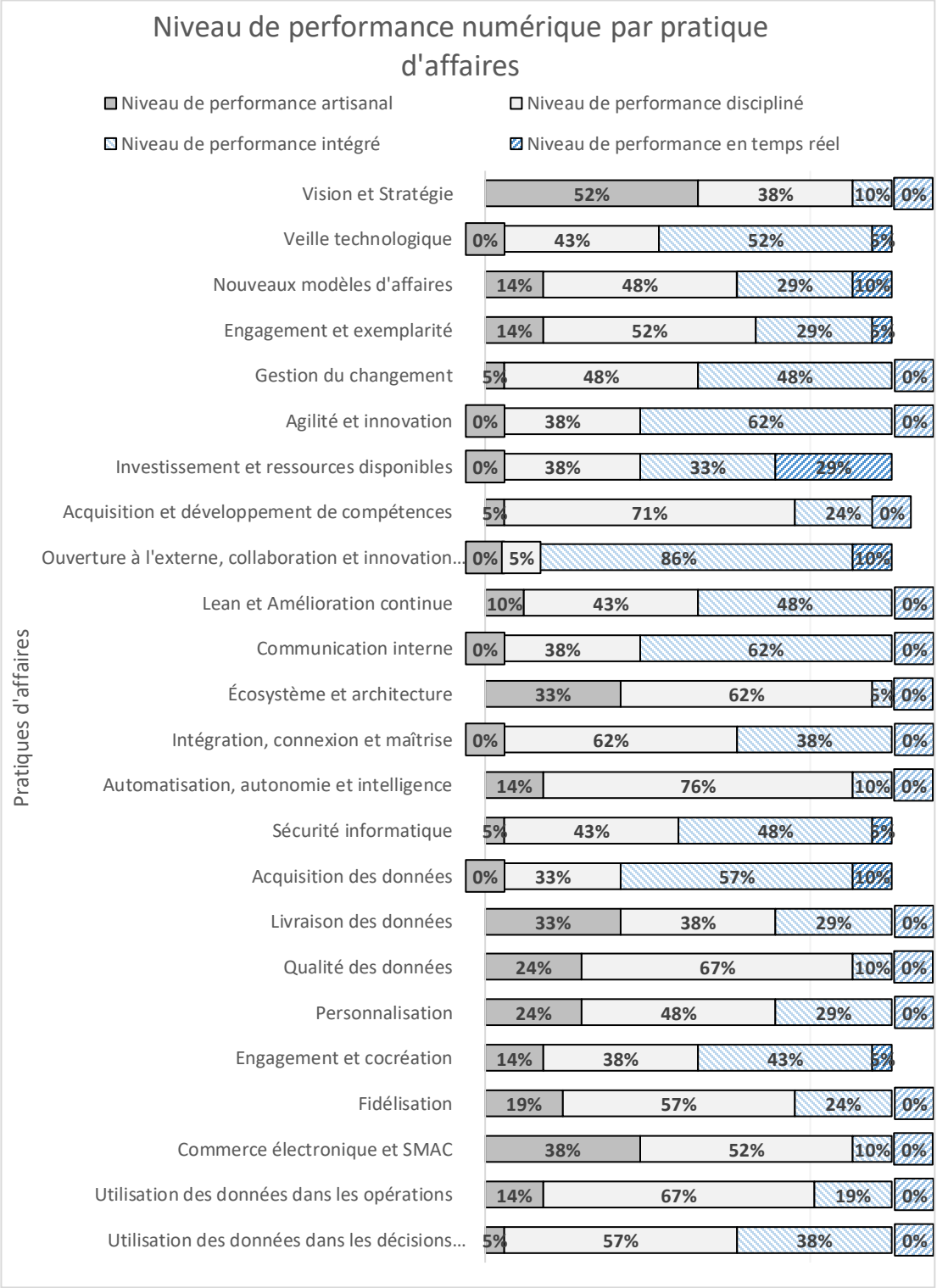


Figure 5.4 : Répartition des entreprises selon le niveau de performance numérique de chaque pratique d'affaires

5.3.2 Analyse par processus d'affaires

Le Tableau 5.4 présente les résultats de la performance numérique séparés selon les 14 processus d'affaires pour les 21 entreprises.

Tableau 5.4 : Résultats par processus d'affaires pour les 21 entreprises

Processus d'affaires	Direction	Marketing et Communication	Ventes	Développement et ingénierie	Planification de la production	Gestion de la production	Distribution et expédition	Service client	Approvisionnement	Maintenance	Gestion des TI	Gestion des RH	Comptabilité	Qualité et Amélioration continue
PME1	2,10	2,20	2,10	2,00	2,40	2,10	2,40	2,10	2,00	2,30	2,10	2,40	2,60	2,20
PME2	2,40	2,01	2,30	2,10	2,10	2,10	2,20	2,10	1,60	1,50	2,40	1,90	2,50	2,10
PME3	2,10	1,70	2,30	2,20	1,90	1,10	1,90	1,60	2,10	1,80	2,30	0,70	2,10	1,30
PME4	1,90	2,63	2,28	1,90	2,70	2,82	2,70	2,45	2,53	2,10	1,70	2,00	1,73	3,00
PME5	2,73	2,40	2,46	2,66	2,68	2,64	2,68	2,45	2,45	2,68	2,53	2,68	2,68	2,68
PME6	1,70	1,40	1,80	1,70	1,60	1,40	1,50	2,00	1,80	1,50	1,70	1,40	1,70	1,80
PME7	3,60	3,20	3,10	2,60	3,40	1,80	3,30	2,00	2,20	2,40	2,50	2,20	2,90	2,00
PME8	2,40	2,10	2,00	2,20	2,20	1,70	1,90	1,80	2,20	1,60	1,93	1,90	2,30	2,20
PME9	2,90	3,00	2,70	2,70	1,90	1,90	1,90	1,90	1,90	1,50	2,00	2,10	2,00	2,80
PME10	1,70	2,20	2,30	1,70	1,60	1,10	1,20	2,20	1,90	1,96	2,04	1,90	1,90	1,96
PME11	2,15	2,54	1,64	2,02	1,90	2,46	2,00	2,88	1,94	1,56	2,30	1,85	2,06	2,52
PME12	1,80	2,12	2,60	1,80	2,30	2,50	2,00	1,40	1,90	2,40	3,10	1,80	2,50	1,90
PME13	3,10	2,20	2,30	2,60	3,10	3,05	3,00	2,20	3,50	2,70	3,00	2,80	1,00	3,30
PME14	2,40	2,40	2,90	2,40	2,30	2,60	2,20	2,60	2,50	2,50	2,80	2,30	2,40	2,80
PME15	2,70	1,60	2,50	2,40	2,40	2,10	2,40	2,08	2,10	2,00	2,00	2,80	2,90	2,60
PME16	2,30	2,30	2,40	2,40	2,40	1,70	2,10	1,80	2,60	3,20	1,60	3,30	2,60	3,70
PME17	2,30	2,30	2,50	1,70	2,80	2,40	2,10	2,40	2,50	3,20	1,60	3,30	2,60	3,70
PME18	2,40	1,80	2,60	2,70	2,00	2,20	2,30	1,90	2,20	1,90	2,00	1,70	2,20	2,50
PME19	3,40	3,20	3,50	3,20	2,50	3,00	3,30	2,75	2,70	2,40	3,70	2,10	3,10	1,90
PME20	2,00	2,00	2,10	2,60	2,05	1,70	2,00	2,10	2,00	2,00	1,80	2,20	2,00	2,40
PME21	1,90	2,30	2,70	2,30	2,30	2,40	2,30	2,60	1,70	2,40	2,90	2,30	1,40	2,40
Moyenne	2,38	2,27	2,43	2,28	2,31	2,13	2,26	2,16	2,21	2,17	2,29	2,17	2,25	2,46

Dans le Tableau 5.4, il est possible de voir qu'en moyenne, les processus d'affaires dont le niveau de performance numérique est le plus élevé sont la direction (2.38), les ventes (2,43), la planification de la production (2,31) et la qualité et amélioration continue (2,46). De l'autre côté, les processus d'affaires dont le niveau de performance numérique est le plus faible sont la gestion de la production (2,13), le service client (2,16), la

maintenance (2,17) et la gestion des ressources humaines (2,17). Les scores moyens des 14 processus d'affaires se situent tous entre 2,13 et 2,46, suggérant que chaque processus d'affaires est soutenu par des outils numériques disciplinés, mais qu'ils sont plus ou moins intégrés et n'utilisent pas de données en temps réel. Cependant, les résultats spécifiques à chaque entreprise quant à eux, varient de 0,70 à 3,70 démontrant ainsi une forte variabilité entre chaque processus d'affaires des entreprises.

La Figure 5.5 présente la proportion des entreprises selon les quatre niveaux de performance numérique pour chaque processus d'affaires.

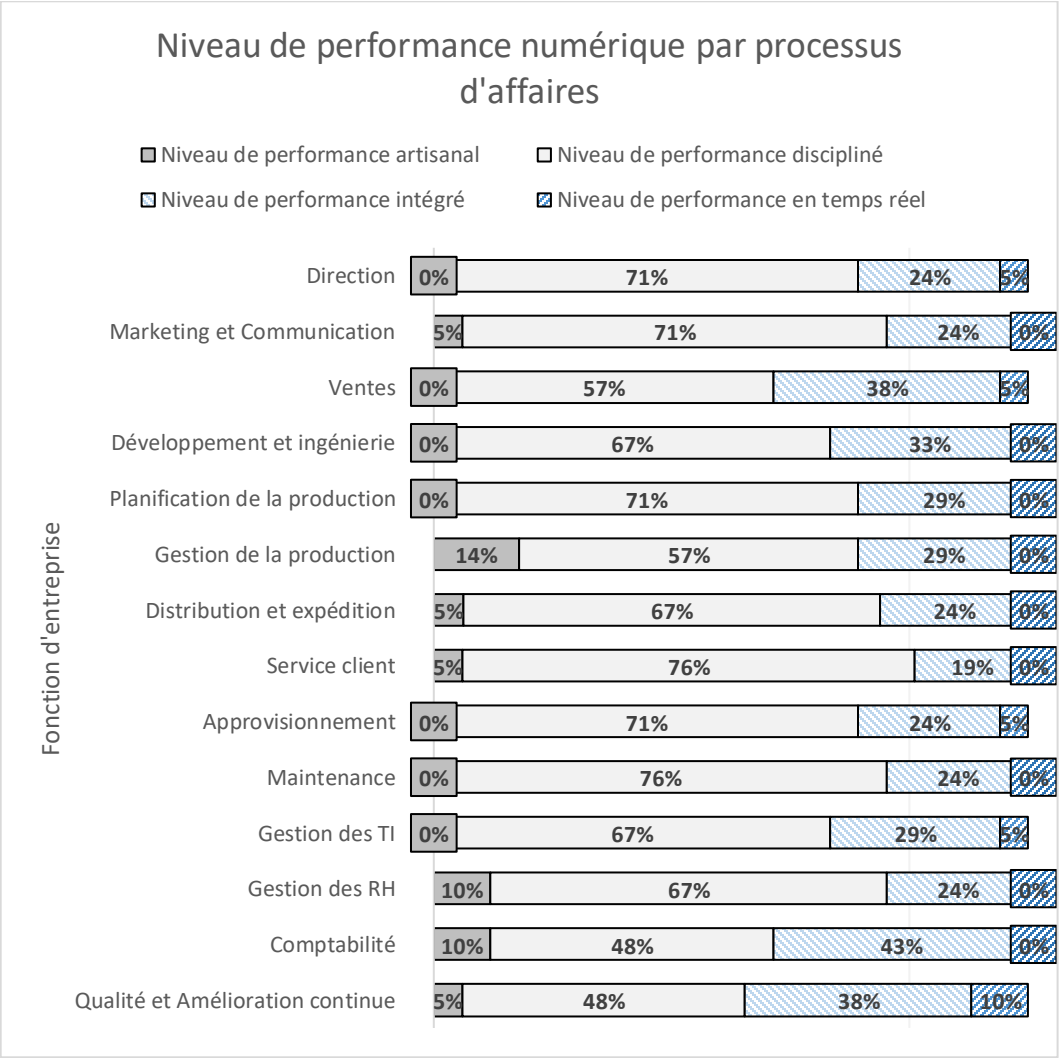


Figure 5.5 : Répartition des entreprises selon le niveau de performance numérique de chaque processus d'affaires

L'étude des deux processus d'affaires dont les scores sont les plus forts et des deux processus d'affaires dont les scores sont les plus faibles pour chaque entreprise, *incluant les valeurs ex aequo*, a permis d'identifier les processus d'affaires pour lesquels les entreprises de l'échantillon investissent davantage dans la transformation numérique et ceux où moins d'efforts leur sont consacrés. Par exemple, le Tableau 5.4 montre que la PME3 possède un score de 0,7 à la Gestion des ressources humaines et 1,1 à la Gestion de la production. Ces deux processus d'affaires sont ceux dont les scores sont les plus faibles pour cette entreprise. D'un autre côté, cette même entreprise possède un score de 2,3 au processus Ventes, un score de 2,3 à la Gestion des TI et un score de 2,2 au processus Développement et ingénierie. Dans ce cas, les deux processus d'affaires dont les scores sont les plus élevés pour la PME3 sont les Ventes, la Gestion des TI et le Développement et l'ingénierie puisque les *ex aequo* sont inclus dans le calcul. La fréquence des processus d'affaires les plus forts et les plus faibles dans les entreprises de l'échantillon est présentée à la Figure 5.6.

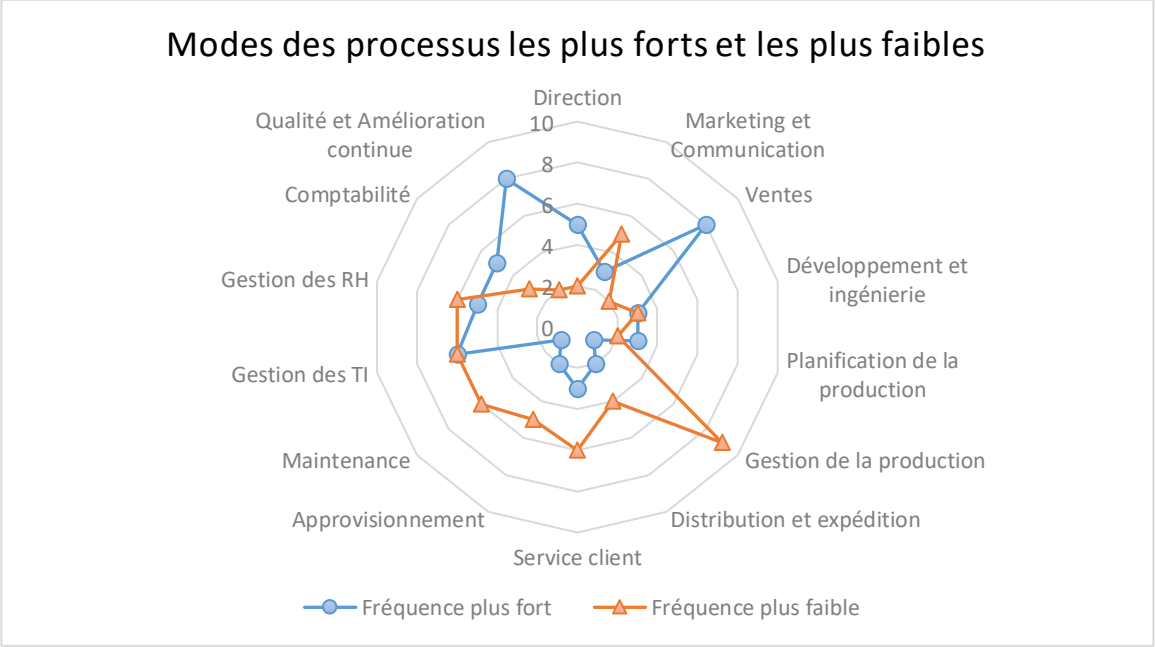


Figure 5.6 : Fréquence des processus d'affaires les plus forts et les plus faibles

Trois informations principales ressortent de la Figure 5.6. Tout d'abord, (1) les processus d'affaires les plus performants numériquement dans les entreprises sont, selon les résultats obtenus, les processus de ventes, gestion des TI et qualité et amélioration continue. À l'opposé, (2) les processus d'affaires soulevés comme les plus faibles dans les entreprises sont la gestion de la production, le service client, la maintenance, la gestion des TI et la gestion des RH. Ensuite, (3) il est intéressant de constater que sur 14 processus d'affaires étudiés, tous ont à un moment donné, été soulevés comme étant l'un des plus forts ou l'un des plus faibles d'une ou plusieurs entreprises. Il y a donc peu d'homogénéité en ce qui a trait à l'importance relative que les entrepreneurs accordent aux différents processus d'affaires. Un autre fait intéressant montre que la gestion de la production, la distribution, l'approvisionnement et la maintenance sont les processus d'affaires qui ont le moins souvent été soulevés comme les plus forts d'une entreprise, ce qui signifie que sans être les plus faibles, ces processus d'affaires ne sont pas priorisés chez la plupart des entreprises. La direction, les ventes, la planification de la production et la qualité et l'amélioration continue ont quant à eux, été les processus d'affaires les moins souvent soulevés comme les plus faibles des entreprises, démontrant que les entreprises semblent minimalement implanter un niveau de numérisation moyen pour les tâches reliées aux ventes, à la gestion des technologies et à la qualité et amélioration continue. Il est toutefois intéressant de soulever que le processus de gestion des TI a été aussi souvent noté comme le processus d'affaires le plus fort des entreprises que comme le processus d'affaires le plus faible. Ce constat est par ailleurs souvent relié à la présence ou l'absence d'un responsable des technologies numériques dans l'entreprise même.

Plusieurs entreprises de l'échantillon ne semblent pas voir les bénéfices associés à la transformation numérique des tâches de gestion de production, de service client, de maintenance et de gestion des RH en raison des faibles scores de performance numérique ou alors, les bénéfices sont jugés moins importants que pour les autres processus d'affaires. La gestion de la production est le processus d'affaires qui a été le plus souvent soulevé comme le moins supporté par les technologies numériques. La

mauvaise compréhension des capacités des systèmes ERP, la forte présence de fichiers Excel et l'absence d'outils numériques spécifiques aux tâches de gestion de production peut expliquer ce que vivent les entreprises de l'échantillon.

Contrairement à ce qui était attendu, le processus de planification de la production n'est pas sorti comme l'un des plus faibles parmi les 14 processus d'affaires évalués. En effet, lors des entrevues, la plupart des entreprises ne possédaient ou n'utilisaient pas de systèmes de planification et ordonnancement à capacité finie et de calculs de charge. Cette situation peut en partie être expliquée par la présence, l'absence et les capacités limitées du module de planification dans la plupart des systèmes ERP. En effet, plusieurs fournisseurs de systèmes ERP utilisent les logiciels comptables comme base de programmation; la planification de la production est présente dans les modules offerts, mais est souvent limitée à une capacité infinie et ne permet pas de planifier en temps réel et en capacité finie. Comme il sera discuté plus loin, les solutions liées à la planification de la production ont notamment fait partie de nombreuses recommandations fournies aux entreprises participant à l'étude à la suite de l'évaluation de leur performance numérique.

5.3.3 Analyse par outil numérique

Le Tableau 5.5 présente les outils numériques utilisés dans les entreprises de l'échantillon. Le niveau 1 signifie que l'entreprise n'utilise pas l'outil en question, alors que le niveau 2 signifie que l'outil est présent dans l'entreprise et utilisé. La Figure 5.7 fournit une présentation plus visuelle de la répartition des outils utilisés dans les entreprises étudiées.

Tableau 5.5 : Outils numériques utilisés dans les 21 entreprises

Entreprise	Fabrication additive	Logiciels de simulation	CFAO	Crowd	Big Data, Analytiques et BI	IoT	Infonuagique	Chaîne d'approvisionnement intelligente	CPS	Système de gestion de production (MES, DMS,)	ERP	AGV	Mobilité	Robots	Cobots	M2M	Intelligence artificielle	Cybersécurité	Maintenance prédictive	CRM	Médias sociaux	e-commerce	Réalité virtuelle / augmentée
PME1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	2	1	1	2	1	1
PME2	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1
PME3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	2	1	1	2	1	1
PME4	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	1
PME5	1	1	2	1	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	1	2	1	2	1	2	2	2	1
PME6	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	2	1	1
PME7	1	1	2	1	1	1	1	1	1	2	2	1	1	2	1	1	1	2	1	1	1	2	1
PME8	1	1	2	1	2	2	1	1	2	1	1	1	1	1	1	2	1	2	1	1	1	1	1
PME9	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1
PME10	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
PME11	1	1	2	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
PME12	1	1	2	1	2	1	2	1	1	1	2	2	2	2	1	1	1	2	1	2	1	1	1
PME13	1	1	2	1	2	1	1	1	2	1	2	1	1	1	1	1	1	2	1	1	2	1	1
PME14	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1
PME15	1	2	2	1	1	1	2	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1
PME16	1	1	2	1	1	2	2	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	1	1
PME17	1	1	2	1	1	1	2	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	1	1
PME18	1	1	2	1	1	2	1	2	1	2	2	1	1	2	1	1	1	2	1	2	2	1	1
PME19	1	1	2	1	1	1	1	1	1	2	2	1	1	1	1	2	1	2	1	1	2	2	1
PME20	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1
PME21	1	2	1	1	1	1	2	1	1	2	2	1	1	1	1	1	1	2	1	2	1	1	2
Nb Niv. 2	0	2	18	0	5	4	6	1	3	5	15	2	2	4	0	3	0	13	0	7	11	5	1

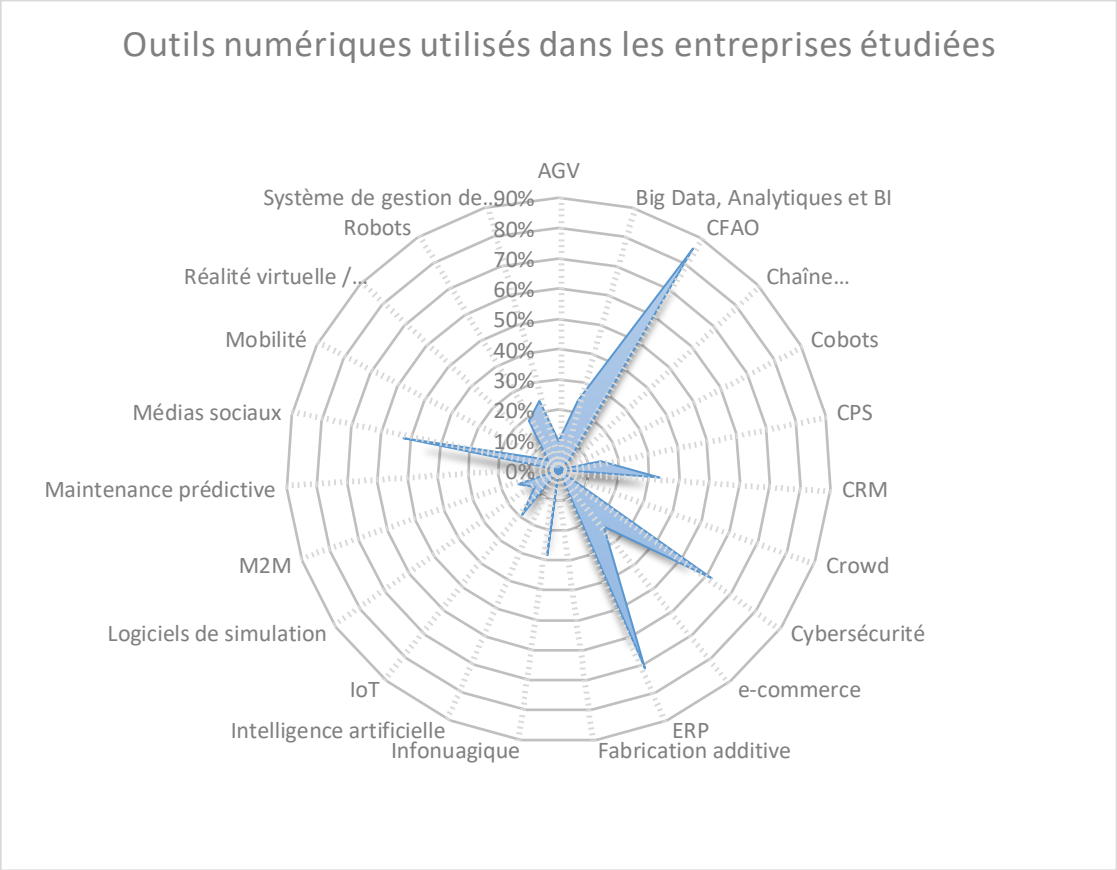


Figure 5.7 : Répartition des outils numériques utilisés dans les entreprises

Le Tableau 5.5 et la Figure 5.7 montrent que plusieurs outils associés à la notion de transformation numérique sont peu présents dans les PME de l'échantillon. C'est le cas pour la fabrication additive, les logiciels de simulation, les foules (ou *crowd*), les chaînes d'approvisionnement intelligentes, les systèmes cyber-physiques, les véhicules autoguidés, les appareils mobiles, les robots collaboratifs, la communication intermachine (*M2M*), l'intelligence artificielle, la maintenance prédictive et la réalité virtuelle et augmentée. Chacun de ces outils était utilisé dans moins de 15 % des entreprises rencontrées.

L'absence totale de la fabrication additive, des foules, des cobots, de l'intelligence artificielle et de la maintenance prédictive suggère que les entreprises n'ont pas totalement ressenti les avantages à utiliser de telles technologies ou alors, que les cas

d’application sont trop particuliers ou encore, que les entreprises ne sont pas tout à fait rendues à intégrer ces technologies dans leur démarche de transformation numérique.

Ensuite, comme il est représenté dans le Tableau 5.5, les logiciels de conception et fabrication assistées par ordinateur, les systèmes ERP, les outils de cybersécurité et les médias sociaux sont utilisés dans plus de 50 % des entreprises de l’échantillon. Ces résultats nous amènent à croire qu’ils sont possiblement plus répandus grâce à un niveau de maîtrise supérieur autant au sein des entreprises que chez les fournisseurs de solutions technologiques. Il est également possible de remarquer que certains outils comme l’intelligence d’affaire et l’analytique (5), l’internet des objets (4), l’infonuagique (6), les systèmes de gestion de la production et de traçabilité (5) tels que les MES, DMS et WMS, les robots (4), les CRM (7) et le commerce électronique (5) semblent être les outils qui sont priorisés par les PME de l’échantillon par rapport aux autres outils numériques tels que les CPS, l’impression 3D, la réalité virtuelle et augmentée et la cobotique par exemple.

CHAPITRE 6
RÉSULTATS DES TESTS D'HYPOTHÈSES

Partant des hypothèses de recherche présentées dans le Chapitre 3, les résultats de chaque variable indépendante des pratiques d'affaires et processus d'affaires ont été séparés en deux niveaux, selon le niveau de performance numérique : Artisanal, Discipliné, Intégré, Temps réel. Pour les pratiques d'affaires, le niveau 1 inclut les entreprises avec une utilisation artisanale ou disciplinée de la pratique d'affaires dans l'entreprise. Le niveau 2 est constitué des entreprises avec un niveau intégré ou en temps réel. Pour les processus d'affaires, le niveau 1 inclut les entreprises avec une utilisation artisanale ou disciplinée des outils numériques dans le processus d'affaires de l'entreprise. Le niveau 2 inclut les entreprises avec une utilisation intégrée ou en temps réel des outils numériques dans le processus d'affaires. Pour les outils, les tests comparent les entreprises qui utilisent et celles qui n'utilisent pas chaque outil numérique.

6.1 Analyse par pratiques d'affaires

Les valeurs qui ont permis d'effectuer les tests d'hypothèses sur les pratiques d'affaires sont présentées aux Tableaux 6.1 et 6.2. La variable dépendante utilisée pour effectuer les tests d'hypothèse est la valeur de performance numérique par PME et est présentée dans le Tableau 6.1.

Tableau 6.1 : Niveaux par dimensions pour les 21 entreprises

Entreprise	LDS	CLT	TEC	DNE	EXP	MSR	Perf. Num.
PME1	1	2	1	1	1	1	1,99
PME2	1	2	1	2	1	1	2,19
PME3	1	1	1	1	1	1	2,00
PME4	1	2	1	1	1	1	1,74
PME5	2	2	2	1	1	2	2,47
PME6	1	1	1	1	1	1	1,54
PME7	2	2	1	1	1	2	2,69
PME8	1	1	1	1	1	1	1,90
PME9	1	2	1	1	1	1	2,20
PME10	1	1	1	1	1	1	1,89
PME11	1	1	1	1	1	1	2,16
PME12	1	1	1	1	1	1	2,15
PME13	2	2	2	1	1	1	2,58
PME14	1	2	1	2	1	2	2,55
PME15	1	2	1	1	1	1	2,15
PME16	1	2	1	1	1	2	2,32
PME17	1	2	1	1	1	2	2,26
PME18	1	1	1	1	1	1	2,08
PME19	2	2	2	2	2	2	3,00
PME20	1	1	1	1	1	1	1,84
PME21	1	1	2	2	1	1	2,26

** Légende :* *1 = Artisanal + Discipliné*
2 = Intégré + En temps réel

Tableau 6.2 : niveaux par pratique d'affaires pour les 21 entreprises

Pratique d'affaires	PME1	PME2	PME3	PME4	PME5	PME6	PME7	PME8	PME9	PME10	PME11	PME12	PME13	PME14	PME15	PME16	PME17	PME18	PME19	PME20	PME21
VSN	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1
VLE	2	2	1	1	2	1	2	2	1	1	1	2	2	1	2	1	1	2	2	2	2
NMA	1	1	2	1	2	1	2	1	1	1	2	1	1	2	1	1	1	2	2	2	1
ENG	1	1	1	1	2	1	2	1	1	1	2	1	2	2	2	1	1	1	2	1	1
GCH	2	2	1	2	2	1	2	1	2	1	1	1	2	1	1	2	2	1	2	1	2
AGI	1	1	1	2	2	1	2	1	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1
RES	2	2	1	1	2	1	2	2	2	2	2	1	2	2	2	1	1	2	2	1	1
COMP	1	1	1	2	2	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	2	1	1	2	1	1
OUV	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2
LEAN	1	1	1	2	2	1	2	1	2	1	1	1	2	1	2	1	2	2	2	1	2
COMM	2	1	1	2	2	1	2	1	2	1	1	2	2	1	2	2	2	2	2	1	2
ÉCO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1
MAÎT	1	1	1	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	2	1	1	2	1	2	1	1
AUTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	2	1	1
SÉCU	1	2	1	1	2	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	1	2	1	2
COL	1	2	2	1	2	2	2	2	1	2	1	2	2	2	1	2	2	1	2	1	2
LIV	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	2	2	1	2	1	2
QLT	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	2	1	1
PERS	1	2	1	1	2	1	2	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	2	2	1
COCR	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	2	1	1	2	1	1	1	1	2	2
FID	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	2	1	1	1	2	2	1	2
eCOM	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	2	1	1
UOP	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	1	2	1	1
UST	2	1	1	1	2	1	2	1	1	2	1	1	1	2	1	2	2	1	2	1	1

** Légende :* *1 = Artisanal + Discipliné*
2 = Intégré + En temps réel

Afin d'identifier l'impact relatif de chaque dimension et pratique d'affaires sur la performance numérique des entreprises, des tests d'hypothèse en comparant deux moyennes ont été effectués avec Minitab. Les résultats sont présentés au Tableau 6.3. Il est possible d'y voir les valeurs moyennes de la performance numérique pour chaque niveau, le nombre d'entreprises par niveau pour chaque dimension et pratique d'affaires ainsi que la p-value qui permettent de déterminer si la variable a un impact significatif ou non. Les écarts entre les niveaux y sont également présentés. Les tests ont été faits avec un degré de confiance de 95 %.

Tableau 6.3 : Tests d'hypothèse sur les 6 dimensions et 24 pratiques d'affaires

Dimension	**Niv. 1**	**Nb Ent**	**Niv. 2**	**Nb Ent**	**Écart**	**% Écart**	**p-value**
LDS	2,07	17	2,69	4	0,62	30,00 %	0,000*
CLT	1,98	9	2,35	12	0,37	18,70 %	0,010*
TEC	2,10	17	2,58	4	0,48	22,90 %	0,007*
DNE	2,11	17	2,50	4	0,39	18,50 %	0,036*
EXP	2,15	20	3,00	1	0,85	39,50 %	0,010*
MSR	2,05	15	2,55	6	0,5	24,40 %	0,001*
Pratique d'affaires	**Niv. 1**	**Nb Ent**	**Niv. 2**	**Nb Ent**	**Écart**	**% Écart**	**p-value**
VSN	2,14	19	2,63	2	0,49	22,90 %	0,049*
VLE	2,07	9	2,28	12	0,21	10,10 %	0,183
NMA	2,09	13	2,35	8	0,26	12,40 %	0,089
ENG	2,03	14	2,52	7	0,49	24,10 %	0,000*
GCH	2,03	10	2,34	11	0,31	15,30 %	0,033*
AGI	1,99	8	2,31	13	0,32	16,10 %	0,028*
RES	2,01	8	2,30	13	0,29	14,40 %	0,060
COMP	2,12	16	2,42	5	0,3	14,20 %	0,077
OUV	2,15	1	2,19	20	0,04	1,90 %	0,918
LEAN	2,05	11	2,34	10	0,29	14,10 %	0,043*
COMM	2,01	8	2,30	13	0,29	14,40 %	0,055
ÉCO	2,15	20	3,00	1	0,85	39,50 %	0,010*
MAÎT	2,00	13	2,49	8	0,49	24,50 %	0,000*
AUTO	2,13	19	2,78	2	0,65	30,50 %	0,006*
SÉCU	1,99	10	2,37	11	0,38	19,10 %	0,006*
COL	2,02	7	2,27	14	0,25	12,40 %	0,119
LIV	2,09	15	2,43	6	0,34	16,30 %	0,035*
QLT	2,13	19	2,78	2	0,65	30,50 %	0,006*
PERS	2,08	15	2,46	6	0,38	18,30 %	0,018*
COCR	2,19	11	2,19	10	0	0,00 %	0,979
FID	2,12	16	2,41	5	0,29	13,70 %	0,097
eCOM	2,13	19	2,78	2	0,65	30,50 %	0,006*
UOP	2,11	17	2,51	4	0,4	19,00 %	0,031*
UST	2,06	13	2,40	8	0,34	16,50 %	0,040*

** Significatif à 95%*

À la suite des tests d'hypothèse, les six dimensions tendent à avoir un impact significatif positif sur la performance numérique des entreprises. Au niveau des pratiques d'affaires, la vision et la stratégie (VSN), l'engagement et l'exemplarité (ENG), la gestion du changement (GCH), l'agilité et l'innovation (AGI), l'usage du *Lean* et de l'amélioration continue (LEAN), le développement d'un écosystème et architecture numérique (ÉCO), la maîtrise des outils numériques (MAÎT), l'automatisation (AUTO), la sécurité informatique (SÉCU), la livraison (LIV) et la qualité des données (QLT), la capacité de personnalisation (PERS), le commerce électronique (eCOM) et l'usage opérationnel (UOP) et stratégique des données (UST) ont tous un impact significatif positif sur la performance numérique des entreprises. Ceci tend à signifier que l'exploitation de ces pratiques d'affaires par une entreprise, fournira des bénéfices significatifs dans l'entreprise. Par exemple, des investissements élevés dans le numérique (RES) ou la participation à tous les salons d'exposition numériques (VLE) n'aura pas nécessairement d'impact significatif sur la performance numérique d'une entreprise. En effet, l'absence de différence au niveau de la performance numérique entre les entreprises qui investissaient fortement dans le numérique et celles qui avaient un budget plus limité, tend à montrer que l'investissement dans les technologies (RES) n'est pas significatif, par rapport aux entreprises qui ont une direction très engagée (ENG), qui utilisent adéquatement des données (UOP et UST) de qualité (QLT) et qui possèdent une bonne gestion du changement (GCH).

Le Tableau 6.3 montre également l'écart entre les deux niveaux des tests d'hypothèse. En évaluant les pourcentages d'écart des pratiques d'affaires significatives, il est possible de constater que (1) l'établissement d'une vision claire, d'une stratégie numérique et sa mise en œuvre (VSN), (2) l'engagement et la rigueur de la direction et des employés dans les projets de transformation numérique (ENG), (3) l'organisation des systèmes, logiciels et autres technologies numériques dans une architecture intégrée et connectée (ÉCO), (4) la maîtrise des outils via entre autres, des programmes de formation et de suivis appropriés (MAÎT), (5) l'automatisation des tâches administratives et opérationnelles (AUTO), (6) la mise en place de procédures et

méthodes pour assurer la qualité des données utilisées (QLT) et (7) l'exploitation du commerce électronique et des réseaux sociaux (eCOM) sont les actions qui selon les résultats de l'étude, affecteront le plus positivement et le plus significativement le passage au numérique des entreprises.

Enfin, cette section a permis de valider l'hypothèse 1 posée dans la méthodologie de la recherche qui stipule que certaines pratiques d'affaires issues du modèle affectent la performance numérique. Il a en ce sens, été possible d'identifier les pratiques d'affaires qui semblent influencer le plus la performance numérique des entreprises et par le fait-même, facilitant leur transformation numérique.

6.2 Analyse par processus d'affaires

Afin d'identifier les processus d'affaires qui impactent significativement la performance numérique des entreprises, des tests d'hypothèses sur les moyennes des entreprises par processus d'affaires ont été effectués. Le Tableau 6.4 présente les niveaux (1 ou 2) auxquels appartiennent chaque entreprise en fonction des 14 processus d'affaires. La variable dépendante utilisée pour effectuer les tests d'hypothèse est pour le rappeler, la valeur de performance numérique par PME.

Tableau 6.4 : Niveaux par dimensions pour les 14 processus d'affaires

Processus d'affaires	Direction	Marketing et Communication	Ventes	Développement et ingénierie	Planification de la production	Gestion de la production	Distribution et expédition	Service client	Approvisionnement	Maintenance	Gestion des TI	Gestion des RH	Comptabilité	Qualite et Amélioration	**Performance numérique**
PME1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1,99
PME2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	2,19
PME3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2,00
PME4	1	2	1	1	2	2	2	1	2	1	1	1	1	2	1,74
PME5	2	1	1	2	2	2	2	1	1	2	2	2	2	2	2,47
PME6	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1,54
PME7	2	2	2	2	2	1	2	1	1	1	2	1	2	1	2,69
PME8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1,90
PME9	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2,20
PME10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1,89
PME11	1	2	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	2	2,16
PME12	1	1	2	1	1	2	1	1	1	1	2	1	2	1	2,15
PME13	2	1	1	2	2	2	2	1	2	2	2	2	1	2	2,58
PME14	1	1	2	1	1	2	1	2	2	2	2	1	1	2	2,55
PME15	2	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2,15
PME16	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	1	2	2	2	2,32
PME17	1	1	2	1	2	1	1	1	2	2	1	2	2	2	2,26
PME18	1	1	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2,08
PME19	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	1	2	1	3,00
PME20	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1,84
PME21	1	1	2	1	1	1	1	2	1	1	2	1	1	1	2,26

** Légende :* *1 = Artisanal + Discipliné*
2 = Intégré + En temps réel

Le Tableau 6.5 présente les résultats des tests d'hypothèses pour les 14 processus d'affaires.

Tableau 6.5 : Tests d'hypothèse sur les 14 processus d'affaires

Processus d'affaires	Niv. 1	Nb Ent	Niv. 2	Nb Ent	Écart	%Écart	p-value
Direction	2,06	15	2,52	6	0,46	22,30 %	0,003*
Marketing et Communication	2,14	16	2,36	5	0,22	10,30 %	0,209
Ventes	2,05	12	2,37	9	0,32	15,60 %	0,029*
Développement et ingénierie	2,08	14	2,41	7	0,33	15,90 %	0,032*
Planification de la production	2,08	15	2,46	6	0,38	18,30 %	0,018*
Gestion de la production	2,10	15	2,42	6	0,32	15,20 %	0,050*
Distribution	2,09	16	2,50	5	0,41	19,60 %	0,016*
Service client	2,12	17	2,50	4	0,38	17,90 %	0,042*
Approvisionnement	2,10	15	2,41	6	0,31	14,80 %	0,059
Maintenance	2,11	16	2,44	5	0,33	15,60 %	0,060
Gestion des TI	2,02	14	2,53	7	0,51	25,30 %	0,000*
Gestion des RH	2,14	16	2,36	5	0,22	10,30 %	0,216
Comptabilité	2,06	12	2,36	9	0,3	14,60 %	0,046*
Qualité et Amélioration Cont.	2,13	11	2,25	10	0,12	5,60 %	0,429

** Significatif à 95%*

Les résultats au Tableau 6.5 montrent que la direction, les ventes, le développement et l'ingénierie, la planification de la production, la gestion de la production, la distribution, le service client, la gestion des TI et la comptabilité tendent à augmenter significativement la performance numérique des entreprises à un niveau de confiance de 95 %. Ces résultats suggèrent pour la direction par exemple, que de mettre de l'emphase sur la transformation numérique des tâches liées à la direction, offrira des bénéfices significatifs sur la performance des entreprises. Ceci peut signifier de mettre en place une salle de pilotage numérisée où un tableau de bord automatique est mis à jour à une fréquence déterminée (temps réel, aux 15 minutes, à l'heure…) avec des indicateurs de performance pertinents tels que des retards prévus, des taux d'efficacité, des retours client, etc., qui permettent de réagir rapidement en cas de défaillance. Encore mieux, un système de génération automatique d'alertes en cas d'anomalie (sur mobile ou par courriel par exemple) pourrait permettre aux directeurs de réagir plus rapidement à des

cas hors normes et de respecter les objectifs d'affaires prévus. Dans le cas de la planification de la production, ceci peut signifier d'outiller le planificateur d'un système de planification et d'ordonnancement à capacité finie lié à un système MES qui indique, en temps réel, l'avancement des commandes sur le plancher et les réceptions de matières premières afin d'améliorer le flux de matière, de minimiser les retards, réduire les pertes de temps et augmenter la capacité de production de façon significative.

Selon les résultats des tests d'hypothèse, l'approvisionnement et la maintenance n'ont pas démontré d'impact significatif, mais tendent à augmenter la performance numérique de près de 15 %. Le marketing et communication, la gestion des RH et la qualité et amélioration continue n'ont pas montré avoir d'impact sur la valeur de performance numérique des entreprises de l'échantillon.

La colonne présentant l'écart entre les deux niveaux des variables indépendantes montre que la direction, la planification de la production, la distribution, le service client et la gestion des TI sont les processus d'affaires qui, lorsqu'à un niveau intégré ou en temps réel, semblent offrir le plus grand potentiel d'augmentation de la performance numérique, soit une amélioration d'environ 18 % à 25 %, relativement à chaque dimension.

Enfin, cette section valide l'hypothèse 2 posée dans la méthodologie de la recherche qui stipule que certains processus d'affaires de la chaîne de valeur des entreprises affectent positivement la performance numérique des PME manufacturières.

6.3 Analyse par outil numérique

Pour chaque outil numérique, un test d'hypothèse comparant les moyennes de performance numérique des entreprises qui utilisent et n'utilisent pas l'outil étudié a été effectué afin de vérifier l'impact associé à chacun de ces outils. Les valeurs utilisées pour les tests d'hypothèse sont celles présentées au Tableau 5.5. Les résultats des tests sont présentés au Tableau 6.6.

Tableau 6.6 : Tests d'hypothèse sur les 23 types d'outils numériques

Outils numériques	**Niveau 1** (absence)	**Nb Ent**	**Niveau 2** (présence)	**Nb Ent**	**Écart**	**%Écart**	**p-value**
Logiciels de simulation	2,19	19	2,21	2	0,02	0,9 %	0,935
CFAO	2,27	3	2,17	18	-0,1	-4,4 %	0,659
Big Data, Analytiques et BI	2,17	16	2,25	5	0,08	3,7 %	0,643
IoT	2,19	17	2,19	4	0	0,0 %	0,997
Infonuagique	2,16	15	2,27	6	0,11	5,1 %	0,514
Chaîne d'approv. intelligente	2,19	20	2,08	1	-0,11	-5,0 %	0,761
CPS	2,17	18	2,32	3	0,15	6,9 %	0,492
Système de gestion de production (MES, DMS…)	2,09	16	2,5	5	0,41	19,6 %	0,014
ERP	1,9	6	2,3	15	0,4	21,1 %	0,011
AGV	2,18	19	2,31	2	0,13	6,0 %	0,613
Mobilité	2,18	19	2,31	2	0,13	6,0 %	0,613
Robots	2,15	17	2,35	4	0,2	9,3 %	0,313
M2M	2,14	18	2,46	3	0,32	15,0 %	0,143
Cybersécurité	2,12	8	2,23	13	0,11	5,2 %	0,478
CRM	2,18	14	2,2	7	0,02	0,9 %	0,944
Médias sociaux	2,18	10	2,2	11	0,02	0,9 %	0,898
e-commerce	2,09	16	2,49	5	0,4	19,1 %	0,018
Réalité virtuelle / augmentée	2,19	20	2,26	1	0,07	3,2 %	0,829
Fabrication additive	2,18	21	0	0	-2,18	-100,0 %	Err.*
Crowd	2,18	21	0	0	-2,18	-100,0 %	Err.*
Cobots	2,18	21	0	0	-2,18	-100,0 %	Err.*
Intelligence artificielle	2,18	21	0	0	-2,18	-100,0 %	Err.*
Maintenance prédictive	2,18	21	0	0	-2,18	-100,0 %	Err.*

** Err. = « Erreur », dû à une division par 0*

Comme il est possible de voir au Tableau 6.6, peu d'outils ont été soulevés comme ayant un impact significatif sur la performance numérique des PME rencontrées (en gris dans la colonne p-value du Tableau 6.6). Ceci peut s'expliquer notamment par la faible présence de plusieurs outils dans les entreprises de l'échantillon, mais aussi par le manque d'intégration entre les outils (démontré au Tableau 6.3 à la pratique d'affaires « ÉCO »).

Les résultats montrent néanmoins que les systèmes ERP, MES, WMS ainsi que le commerce électronique ont un impact significatif sur la performance numérique des entreprises, avec un degré de confiance de 95 %. Selon ces données, les entreprises de l'échantillon qui utilisent un système ERP ont une performance numérique supérieure de près de 20 % par rapport à celles qui n'en utilisent pas (en gris dans la colonne %Écart du Tableau 6.6). Ce constat est le même pour les systèmes de gestion de la production tels que des MES, WMS et DMS (« *Daily Management System* »), ainsi que pour

l'utilisation du commerce électronique. L'utilisation des outils comme l'ERP, les MES, WMS et DMS semble en effet démontrer que l'accès et une meilleure utilisation des données en entreprise amènent généralement à prendre de meilleures décisions plus rapidement et augmentent ainsi la performance numérique des entreprises. De plus, les entreprises qui possèdent et maîtrisent déjà ce type de systèmes recherchent généralement à aller plus loin au niveau de l'Industrie 4.0 et sont donc, généralement plus performantes numériquement. D'un autre côté, les entreprises qui cherchent à se numériser, mais qui ne maîtrisent pas les systèmes ERP ne sont souvent pas intégrées tant au niveau de leurs départements que des outils en place, affectant alors négativement leur niveau de performance numérique.

L'utilisation du commerce électronique suggère quant à lui un certain niveau de maturité, car ce service requiert souvent une maîtrise élevée de son produit, de sa gestion et de sa capacité de livraison entre autres, via une configuration paramétrique des produits, signe d'un certain niveau de standardisation et de modularisation déjà en place.

Enfin, cette section a permis de valider l'hypothèse 3 posée dans la méthodologie de la recherche qui stipule que certains outils affectent significativement la performance numérique des entreprises. Pour le moment, seuls les progiciels de gestion intégrés, les outils de gestion de la production et le commerce électronique ont démontré avoir un impact significatif sur la performance numérique des PME rencontrées. L'évaluation de l'effet des outils numériques sur la performance des entreprises était en effet limitée, principalement en raison de la faible utilisation des outils associés à l'Industrie 4.0 dans les entreprises rencontrées. Pour cette raison, il est intéressant de faire un partitionnement de données et d'identifier la présence ou l'absence de groupes similaires dans l'échantillon. Ceci permet d'identifier des tendances supplémentaires entre les entreprises, possiblement de confirmer des tests d'hypothèse qui ont été démontrés significatifs et de dégager davantage d'information que l'homogénéité (due aux critères de sélection à l'étude) qui ont pu être dissimulés.

6.4 Partitionnement de données

Les groupes d'entreprises ont été formés selon la similitude entre les groupes avec pour variable de regroupement, les six dimensions de la performance numérique, à savoir le leadership (LDS), la culture et l'organisation (CLT), la gestion des technologies (TEC), la gestion des données (DNE), l'expérience client (EXP) et le système de mesure (MSR).

La procédure de partitionnement de données utilisée se base sur la notion de regroupement hiérarchique, mais plus précisément sur l'algorithme de classification ascendante hiérarchique. La mesure de regroupement est la distance euclidienne entre les centroïdes. La Figure 6.1 présente le dendrogramme issu de l'algorithme de partitionnement de données.

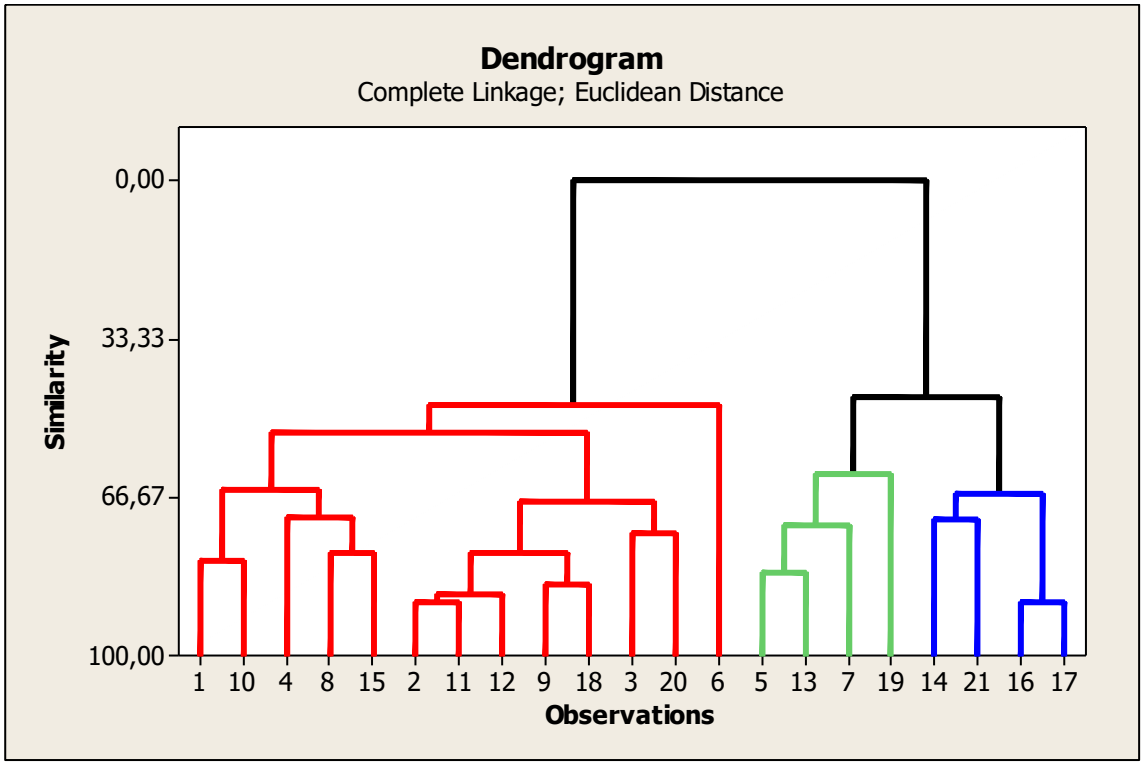


Figure 6.1 : Dendrogramme des 21 entreprises (observations)

La Figure 6.1 montre que trois groupes ont été formés. De gauche à droite, ces groupes seront respectivement nommés « Groupe 1 », « Groupe 2 » et « Groupe 3 ». Le calcul utilisé pour arriver à ce résultat est présenté à l'Annexe 4. La Figure 6.1 montre que le Groupe 1 est formé de 13 entreprises, alors que les Groupe 2 et Groupe 3 sont tous deux composés de quatre entreprises. Le Tableau 6.7 présente la moyenne, l'écart-type et le coefficient de variation de chacun des trois groupes concernant la performance numérique, les dimensions de la performance numérique, les pratiques d'affaires, les processus d'affaires et les technologies numériques utilisées dans les entreprises de chaque groupe.

Tableau 6.7 : Informations relatives aux trois groupes d'entreprises

	Groupe 1			Groupe 2			Groupe 3		
n	13			4			4		
Variable	Moy.	É.-type	CV	Moy.	É.-type	CV	Moy.	É.-type	CV
Perf. Num.	1,99	0,20	**0,10**	2,69	0,23	0,09	2,35	0,14	0,06
Dimensions									
LDS	1,92	0,31	**0,16**	2,97	0,40	**0,13**	1,80	0,32	**0,18**
CLT	2,39	0,24	**0,10**	3,18	0,12	**0,04**	2,63	0,16	**0,06**
TEC	1,97	0,30	**0,15**	2,58	0,30	**0,12**	2,45	0,07	**0,03**
DNE	1,84	0,51	0,28	2,41	0,56	0,23	2,67	0,47	**0,18**
EXP	1,90	0,37	0,19	2,29	0,35	**0,15**	2,07	0,39	**0,19**
MSR	1,90	0,32	**0,17**	2,68	0,23	**0,08**	2,47	0,26	**0,11**
Pratiques d'affaires									
VSN	1,24	0,41	0,33	2,50	0,43	**0,17**	0,88	0,63	0,72
VLE	2,35	0,39	**0,17**	3,13	0,32	**0,10**	2,44	0,38	**0,15**
NMA	2,18	0,59	0,27	3,20	0,73	0,23	1,90	0,50	0,26
ENG	1,93	0,52	0,27	3,05	0,38	**0,12**	2,00	0,49	0,24
GCH	2,17	0,47	0,22	3,18	0,11	**0,03**	2,75	0,38	**0,14**
AGI	2,52	0,23	**0,09**	3,07	0,10	**0,03**	2,71	0,22	**0,08**
RES	2,76	0,63	0,23	3,89	0,21	**0,06**	2,39	0,29	**0,12**
COMP	2,09	0,33	**0,16**	2,74	0,31	**0,11**	2,30	0,31	**0,14**
OUV	2,77	0,32	**0,12**	3,28	0,21	**0,06**	3,03	0,18	**0,06**
LEAN	2,12	0,47	0,22	3,18	0,21	**0,06**	2,48	0,07	**0,03**
COMM	2,33	0,31	**0,13**	2,93	0,19	**0,06**	2,73	0,23	**0,09**
ÉCO	1,52	0,45	0,30	2,36	0,36	**0,15**	2,11	0,43	0,20
MAÎT	2,29	0,24	**0,11**	2,87	0,11	**0,04**	2,50	0,14	**0,06**
AUTO	1,67	0,40	0,24	2,23	0,38	**0,17**	2,28	0,25	**0,11**
SÉCU	2,39	0,54	0,23	2,86	0,66	0,23	2,93	0,47	**0,16**
COL	2,36	0,57	0,24	3,25	0,32	**0,10**	3,00	0,47	**0,16**
LIV	1,62	0,66	0,41	1,92	0,92	0,48	2,75	0,17	**0,06**
QLT	1,55	0,67	0,43	2,08	0,62	0,30	2,25	0,77	0,34
PERS	1,92	0,59	0,31	2,59	0,56	0,22	2,10	0,97	0,46
COCR	2,28	0,93	0,41	2,42	0,74	0,31	1,92	1,40	0,73
FID	1,97	0,75	0,38	2,08	0,79	0,38	2,45	0,40	**0,16**
eCOM	1,42	0,49	0,35	2,09	0,44	0,21	1,80	0,99	0,55
UOP	1,72	0,34	**0,20**	2,61	0,29	**0,11**	2,33	0,34	**0,15**
UST	2,08	0,42	0,20	2,74	0,27	**0,10**	2,61	0,18	**0,07**

Tableau 6.7 : Informations relatives aux trois groupes d'entreprises (suite)

	Groupe 1			Groupe 2			Groupe 3		
n	13			4			4		
Variable	Moy.	É.-type	CV	Moy.	É.-type	CV	Moy.	É.-type	CV
Perf. Num.	1,99	0,20	0,10	2,69	0,23	0,09	2,35	0,14	0,06
Processus d'affaires									
DIR	2,17	0,37	**0,17**	3,21	0,38	**0,12**	2,23	0,22	**0,10**
MKG	2,10	0,44	0,21	2,75	0,53	**0,19**	2,33	0,05	**0,02**
VNT	2,25	0,32	**0,14**	2,84	0,56	**0,20**	2,63	0,22	**0,08**
DEV	2,16	0,35	**0,16**	2,76	0,29	**0,11**	2,20	0,34	**0,15**
PLAN	2,08	0,32	**0,15**	2,92	0,41	**0,14**	2,45	0,24	**0,10**
GPRD	1,94	0,53	0,27	2,62	0,58	0,22	2,28	0,39	**0,17**
DIST	2,03	0,39	**0,19**	3,07	0,30	**0,10**	2,18	0,10	**0,04**
SERV	2,04	0,37	**0,18**	2,35	0,32	**0,14**	2,35	0,38	**0,16**
APPR	2,01	0,23	**0,11**	2,71	0,56	0,21	2,33	0,42	**0,18**
MNTN	1,86	0,31	**0,17**	2,55	0,17	**0,07**	2,83	0,43	**0,15**
GTI	2,11	0,37	**0,18**	2,93	0,56	**0,19**	2,23	0,72	0,32
GRH	1,90	0,50	0,26	2,45	0,35	**0,14**	2,80	0,58	0,21
CTB	2,19	0,35	**0,16**	2,42	0,96	0,40	2,25	0,57	0,26
QLTAC	2,25	0,45	0,20	2,47	0,65	0,26	3,15	0,66	0,21
Technologies numériques									
SIMUL	1,08	0,28	0,26	1,00	0,00	**0,00**	1,25	0,50	0,40
CFAO	1,92	0,28	**0,14**	2,00	0,00	**0,00**	1,50	0,58	0,38
Big Data	1,23	0,44	0,36	1,50	0,58	0,38	1,00	0,00	**0,00**
IoT	1,15	0,38	0,33	1,25	0,50	0,40	1,25	0,50	0,40
Cloud	1,15	0,38	0,33	1,25	0,50	0,40	1,75	0,50	0,29
CHApp	1,08	0,28	0,26	1,00	0,00	**0,00**	1,00	0,00	**0,00**
CPS	1,08	0,28	0,26	1,50	0,58	0,38	1,00	0,00	**0,00**
SGPROD	1,08	0,28	0,26	1,75	0,50	0,29	1,25	0,50	0,40
ERP	1,54	0,52	0,34	2,00	0,00	**0,00**	2,00	0,00	**0,00**
AGV	1,08	0,28	0,26	1,25	0,50	0,40	1,00	0,00	**0,00**
Mobil	1,08	0,28	0,26	1,25	0,50	0,40	1,00	0,00	**0,00**
Robots	1,15	0,38	0,33	1,50	0,58	0,38	1,00	0,00	**0,00**
M2M	1,08	0,28	0,26	1,50	0,58	0,38	1,00	0,00	**0,00**
CSECU	1,62	0,51	0,31	2,00	0,00	**0,00**	1,25	0,50	0,40
CRM	1,23	0,44	0,36	1,25	0,50	0,40	1,75	0,50	0,29
SMAC	1,46	0,52	0,36	1,75	0,50	0,29	1,50	0,58	0,38
eCOMm	1,08	0,28	0,26	1,75	0,50	0,29	1,25	0,50	0,40
VRAR	1,00	0,00	**0,00**	1,00	0,00	**0,00**	1,25	0,50	0,40

Les coefficients de variation de chacun des groupes (0,10; 0,09; 0,06) montrent une forte homogénéité entre les entreprises à l'intérieur des groupes. L'analyse qui suit est faite en deux temps : (1) la première étape consiste à identifier ce qui différencie les groupes, puis ensuite, (2) identifier les similitudes à l'intérieur des groupes.

La Figure 6.2 montre les trois groupes d'entreprises en fonction des dimensions de la performance numérique. Il est possible de remarquer que le Groupe 2 possède une performance supérieure aux deux autres groupes au niveau du leadership, de la culture et l'organisation, de la gestion des technologies, de l'expérience client et du système de données. De son côté, le Groupe 3 est supérieur aux Groupe 1 et Groupe 2 au niveau de la gestion des données. Enfin, le Groupe 1 possède une performance numérique inférieure aux deux autres groupes pour l'ensemble des dimensions, sauf pour le leadership où le Groupe 3 possède la performance numérique la plus faible.

Groupe 1

Score varie de 1,84 à 2,39

CLT	TEC	LDS	EXP	MSR	DNE
2,39	1,97	1,92	1,90	1,90	1,84
Discipliné					

Plusieurs outils numériques, mais ne sont pas intégrés

Groupe 2

Score varie de 2,29 à 3,18

CLT	LDS	MSR	TEC	DNE	EXP
3,18	2,97	2,68	2,58	2,41	2,29
Intégré				Discipliné	

Progiciels intégrés et solutions connectées

Groupe 3

Score varie de 1,80 à 2,67

DNE	CLT	MSR	TEC	EXP	LDS
2,67	2,63	2,47	2,45	2,07	1,80
Intégré		Discipliné			

Importance de la donnée, mais sans indicateurs de performance

0 Inexistant	0 - 0,5
1 Artisanal	0,5 - 1,5
2 Discipliné	1,5 - 2,5
3 Intégré	2,5 - 3,5
4 Prévisible	3,5 - 4

Figure 6.2 : Répartition des groupes selon les dimensions de la performance numérique

Les résultats de la Figure 6,2 montrent que les entreprises du Groupe 2 sont les plus avancées numériquement et semblent avoir mis leurs efforts sur la culture (CLT), le leadership (LDS), le système de mesure (MSR) et la gestion des technologies (TEC)

pour améliorer leur performance numérique. Pour ce faire, les entreprises du Groupe 3 semblent miser sur la gestion des données (DNE) et sur la culture et l'organisation (CLT). On remarque toutefois que les entreprises des deux autres groupes ne semblent pas prioriser la gestion des données. Enfin, les entreprises du Groupe 1 sont à un niveau discipliné pour toutes les dimensions.

Des tests d'hypothèse sur les moyennes ont été faits pour vérifier la présence d'un écart entre chacun des groupes. À la suite des tests, un test de Tukey a été fait pour identifier les différences entre les trois groupes. Le Tableau 6.8 présente les résultats de ces tests d'hypothèse.

Tableau 6.8 : Tests d'hypothèse sur les dimensions de la performance numérique pour les trois groupes

Dimension	Groupe 1 (n = 13)	Groupe 2 (n = 4)	Groupe 3 (n = 4)	p-value
LDS	1,92 (B)	2,97 (A)	1,80 (B)	0,000
CLT	2,39 (B)	3,18 (A)	2,63 (B)	0,000
TEC	1,97 (B)	2,58 (A)	2,45 (A)	0,001
DNE	1,84 (B)	2,41 (AB)	2,67 (A)	0,020
EXP	1,90 (A)	2,29 (A)	2,07 (A)	0,185
MSR	1,90 (B)	2,68 (A)	2,47 (A)	0,000

** (A) et (B) représentent les groupes formés par un test de Tukey lors des tests d'hypothèse*

Les résultats montrent que le Groupe 2 est statistiquement supérieur aux autres groupes au niveau du leadership (LDS) et de la culture et de l'organisation (CLT). Il est également possible de constater que le Groupe 1 est significativement inférieur au niveau de la gestion des technologies (TEC) et du système de mesure (MSR). Aucune différence significative n'a été démontrée pour l'expérience client (EXP). Le test sur la gestion des données (DNE) a montré que le Groupe 1 est significativement inférieur au Groupe 3 sur ce point. Il peut également être intéressant d'étudier les pratiques d'affaires mises en place dans les trois groupes. La Figure 6.3 présente les trois groupes d'entreprises en fonction des moyennes associées aux 24 pratiques d'affaires.

Groupe 1

Score varie de 1,24 à 2,77

OUV	RES	AGI	SÉCU	COL	VLE	COMM	MAÎT	COCR	NMA	GCH	LEAN	COMP	UST	FID	ENG	PERS	UOP	AUTO	LIV	QLT	ÉCO	eCOM	VSN
2,77	2,76	2,52	2,39	2,36	2,35	2,33	2,29	2,28	2,18	2,17	2,12	2,09	2,08	1,97	1,93	1,92	1,72	1,67	1,62	1,55	1,52	1,42	1,24
Intégré			Discipliné																			Artisanal	

Entreprises ouvertes au changement, prêtes à investir, mais manquent de vision et semblent au début de la transformation numérique

Groupe 2

Score varie de 1,92 à 3,89

RES	OUV	COL	NMA	GCH	LEAN	VLE	AGI	ENG	COMM	MAÎT	SÉCU	COMP	UST	UOP	PERS	VSN	COCR	ÉCO	AUTO	eCOM	FID	QLT	LIV
3,89	3,28	3,25	3,20	3,18	3,18	3,13	3,07	3,05	2,93	2,87	2,86	2,74	2,74	2,61	2,59	2,50	2,42	2,36	2,23	2,09	2,08	2,08	1,92
Prévisible	Intégré																Discipliné						

Entreprises ouvertes à s'améliorer, avec une bonne vision numérique, conscientes de l'importance de la donnée et de l'amélioration des méthodes de travail, mais ne gèrent pas les données de façon optimale et débutent dans l'automatisation

Groupe 3

Score varie de 0,88 à 3,03

OUV	COL	SÉCU	LIV	GCH	COMM	AGI	UST	MAÎT	LEAN	FID	VLE	RES	UOP	COMP	AUTO	QLT	ÉCO	PERS	ENG	COCR	NMA	eCOM	VSN
3,03	3,00	2,93	2,75	2,75	2,73	2,71	2,61	2,50	2,48	2,45	2,44	2,39	2,33	2,30	2,28	2,25	2,11	2,10	2,00	1,92	1,90	1,80	0,88
Intégré									Discipliné														Artisanal

Entreprises qui gèrent bien la donnée, qui investissent surtout dans le capital humain, mais manquent de vision et débutent dans l'automatisation

0 Inexistant	0 - 0,5
1 Artisanal	0,5 - 1,5
2 Discipliné	1,5 - 2,5
3 Intégré	2,5 - 3,5
4 Prévisible	3,5 - 4

Figure 6.3 : Répartition des groupes selon les pratiques d'affaires

La Figure 6.3 montre que le Groupe 1 possède une performance numérique inférieure aux deux autres groupes pour l'ensemble des pratiques d'affaires étudiées, sauf pour la vision et la stratégie, pour les nouveaux modèles d'affaires, pour la mise à disposition de ressources et pour la cocréation avec le client où le Groupe 3 est le plus faible des trois groupes. Le Groupe 2 possède une performance numérique supérieure pour toutes les pratiques, à l'exception de la cybersécurité, de la livraison des données, de la qualité des données et de la fidélisation, où le Groupe 3 est en tête. La Figure 6.3 montre également que le Groupe 2 possède plusieurs pratiques d'affaires (9) au-dessus de 3/4. Ce résultat tend à démontrer que les entreprises dans le Groupe 2 sont plus performantes au niveau de la transformation numérique par rapport aux autres groupes sur plusieurs points, notamment la veille technologique, les nouveaux modèles d'affaires, l'engagement et l'exemplarité, la gestion du changement, l'agilité et l'innovation, la mise à disposition de ressources, l'ouverture à l'externe, l'usage du lean et de l'amélioration continue et la collecte de données. Le Tableau 6.9 présente les résultats des tests d'hypothèse pour valider la présence d'écart entre les groupes pour les 24 pratiques d'affaires.

Tableau 6.9 : Tests d'hypothèse sur les pratiques d'affaires pour les trois groupes

Pratique d'affaires	Groupe 1 (n = 13)	Groupe 2 (n = 4)	Groupe 3 (n = 4)	p-value
VSN	1,24 (B)	2,50 (A)	0,88 (B)	0,000
VLE	2,35 (B)	3,13 (A)	2,44 (B)	0,007
NMA	2,18 (B)	3,20 (A)	1,90 (B)	0,013
ENG	1,93 (B)	3,05 (A)	2,00 (B)	0,003
GCH	2,17 (B)	3,18 (A)	2,75 (AB)	0,001
AGI	2,52 (B)	3,07 (A)	2,71 (AB)	0,001
RES	2,76 (B)	3,89 (A)	2,39 (B)	0,002
COMP	2,09 (B)	2,74 (A)	2,30 (AB)	0,009
OUV	2,77 (B)	3,28 (A)	3,03 (AB)	0,016
LEAN	2,12 (B)	3,18 (A)	2,48 (AB)	0,001
COMM	2,33 (B)	2,93 (A)	2,73 (AB)	0,003
ÉCO	1,52 (B)	2,36 (A)	2,11 (AB)	0,006
MAÎT	2,29 (B)	2,87 (A)	2,50 (AB)	0,001
AUTO	1,67 (B)	2,23 (A)	2,28 (A)	0,010
SÉCU	2,39 (A)	2,86 (A)	2,93 (A)	0,151
COL	2,36 (B)	3,25 (A)	3,00 (AB)	0,013
LIV	1,62 (B)	1,92 (AB)	2,75 (A)	0,026
QLT	1,55 (A)	2,08 (A)	2,25 (A)	0,151
PERS	1,92 (A)	2,59 (A)	2,10 (A)	0,241
COCR	2,28 (A)	2,42 (A)	1,92 (A)	0,755
FID	1,97 (A)	2,08 (A)	2,45 (A)	0,508
eCOM	1,42 (A)	2,09 (A)	1,80 (A)	0,145
UOP	1,72 (B)	2,61 (A)	2,33 (A)	0,000
UST	2,08 (B)	2,74 (A)	2,61 (AB)	0,007

** (A) et (B) représentent les groupes formés par un test de Tukey lors des tests d'hypothèse*

Les résultats montrent que le Groupe 2 est statistiquement supérieur aux autres groupes au niveau de la vision et stratégie (VSN), de la veille technologique (VLE), des nouveaux modèles d'affaires (NMA), de l'engagement et de l'exemplarité (ENG) et de la mise à disposition des ressources (RES). Le Groupe 2 partage également la tête avec le Groupe 3 au niveau de la gestion du changement (GCH), de l'agilité et l'innovation (AGI), de l'acquisition et du développement des compétences (COMP), de l'ouverture à l'externe (OUV), de l'utilisation du lean et de l'amélioration continue (LEAN), de la communication interne (COMM), de l'écosystème et architecture numérique (ÉCO), de la maîtrise des technologies (MAÎT), de la collecte de données (COL), de la livraison de

données (LIV) et de l'utilisation opérationnelle (UOP) et stratégique des données (UST). Il est également possible de constater que le Groupe 1 est significativement inférieur au niveau de toutes les pratiques d'affaires qui ont montré avoir un écart statistique entre les groupes. Ceci amène alors à croire que le Groupe 1 est composé d'entreprises encore peu matures numériquement puisqu'elles possèdent des scores faibles au niveau de la majorité des éléments étudiés lors des expériences.

De plus, il est possible de constater que le Groupe 2 semble être composé d'entreprises plus avancées au niveau de leur transformation numérique, notamment en raison de leur vision et de leur écoute de l'environnent démontrés par leurs activités de veille technologique, de la revue de leurs pratiques d'affaires, de l'engagement de la direction et de l'investissement et de la mise à disposition de ressources suffisantes pour mettre en œuvre les changements issus du passage au 4.0. Jusqu'à maintenant, le Groupe 3 semble être composé d'entreprises avec un niveau moyen de performance numérique.

La Figure 6.4 présente les trois groupes d'entreprises séparés en fonction des moyennes associées aux 14 processus d'affaires.

Groupe 1

Score varie de 1,86 à 2,25

QLTAC	VNT	CTB	DIR	DEV	GTI	MKG	PLAN	SERV	DIST	APPR	GPRD	GRH	MNTN
2,25	2,25	2,19	2,17	2,16	2,11	2,10	2,08	2,04	2,03	2,01	1,94	1,90	1,86
Discipliné													

Tous les processus fonctionnent de façon disciplinée

Groupe 2

Score varie de 2,35 à 3,21

DIR	DIST	GTI	PLAN	VNT	DEV	MKG	APPR	GPRD	MNTN	QLTAC	GRH	CTB	SERV
3,21	3,07	2,93	2,92	2,84	2,76	2,75	2,71	2,62	2,55	2,47	2,45	2,42	2,35
Intégré										Discipliné			

Les processus sont typiquement supportés numériquement et la direction et la distribution sont mises de l'avant.

Groupe 3

Score varie de 2,18 à 3,15

QLTAC	MNTN	GRH	VNT	PLAN	SERV	APPR	MKG	GPRD	CTB	DIR	GTI	DEV	DIST
3,15	2,83	2,80	2,63	2,45	2,35	2,33	2,33	2,28	2,25	2,23	2,23	2,20	2,18
Intégré				Discipliné									

Les processus sont surtout disciplinés, avec un début d'intégration

0 Inexistant	0 - 0,5
1 Artisanal	0,5 - 1,5
2 Discipliné	1,5 - 2,5
3 Intégré	2,5 - 3,5
4 Prévisible	3,5 - 4

Figure 6.4 : Répartition des groupes selon les processus d'affaires

La Figure 6.4 montre que le Groupe 1 possède une performance numérique inférieure aux deux autres groupes pour l'ensemble des processus d'affaires étudiés. Le Groupe 2 possède une performance numérique supérieure pour tous les processus d'affaires, à l'exception du service client, de la maintenance, de la gestion des ressources humaines et de la qualité et amélioration continue, où le Groupe 3 possède un niveau de performance numérique supérieur. Ceci montre alors l'hétérogénéité entre les Groupe 2 et Groupe 3 en relation aux endroits où les efforts de transformation numérique sont déployés et permet alors de dresser une première tendance qui semble séparer les entreprises du Groupe 2 et celles du Groupe 3. La Figure 6.4 montre également que le Groupe 2 a déployé davantage d'efforts de transformation numérique au niveau des processus de direction et de distribution, alors que le Groupe 3 semble avoir priorisé le département de qualité et d'amélioration continue. Le Tableau 6.10 présente les résultats des tests d'hypothèse pour valider la présence d'écart entre les groupes pour les 14 processus d'affaires.

Tableau 6.10 : Tests d'hypothèse sur les processus d'affaires pour les trois groupes

Processus d'affaires	Groupe 1 (n = 13)	Groupe 2 (n = 4)	Groupe 3 (n = 4)	p-value
DIR	2,17 (B)	3,21 (A)	2,23 (B)	0,000
MKG	2,10 (B)	2,75 (A)	2,33 (AB)	0,043
VNT	2,25 (B)	2,84 (A)	2,63 (AB)	0,019
DEV	2,16 (B)	2,76 (A)	2,20 (AB)	0,019
PLAN	2,08 (B)	2,92 (A)	2,45 (AB)	0,001
GPRD	1,94 (A)	2,62 (A)	2,28 (A)	0,082
DIST	2,03 (B)	3,07 (A)	2,18 (B)	0,000
SERV	2,04 (A)	2,35 (A)	2,35 (A)	0,190
APPR	2,01 (B)	2,71 (A)	2,33 (AB)	0,007
MNTN	1,86 (B)	2,55 (A)	2,83 (A)	0,000
GTI	2,11 (B)	2,93 (A)	2,23 (AB)	0,025
GRH	1,90 (B)	2,45 (AB)	2,80 (A)	0,010
CTB	2,19 (A)	2,42 (A)	2,25 (A)	0,764
QLTAC	2,25 (B)	2,47 (AB)	3,15 (A)	0,028

** (A) et (B) représentent les groupes formés par un test de Tukey lors des tests d'hypothèse*

Les résultats montrent que le Groupe 1 est statistiquement inférieur aux Groupe 2 et Groupe 3 sur tous les processus d'affaires, à l'exception de la gestion de la production (GRPD), du service client (SERV) et de la comptabilité (CTB), où aucune différence n'a été démontrée entre les groupes. Le Groupe 2 est supérieur statistiquement aux deux autres groupes au niveau de la direction (DIR) et de la distribution et expédition (DIS). Le Groupe 3 ne possède pas d'autres écarts significatifs avec les Groupe 1 et Groupe 2, bien que ce dernier ait tendance à avoir une gestion de ressources humaines (GRH) et une qualité et amélioration continue (QLTAC) supérieures aux autres groupes.

La Figure 6.5 présente les trois groupes d'entreprises séparés en fonction des outils numériques utilisés. Plus la valeur présentée dans le graphique est près de 2, plus la technologie associée à cette valeur est utilisée dans les entreprises du groupe. Dans le cas inverse, plus la valeur associée à une technologie est près de 1, alors moins les entreprises du groupe utilisent cette technologie.

Groupe 1

CFAO	CSECU	ERP	SMAC	Big Data	CRM	IoT	Cloud	Robots	Ch App	CPS	SGPROD	AGV	Mobil	M2M	eCOM	SIMUL	VRAR
1,92	1,62	1,54	1,46	1,23	1,23	1,15	1,15	1,15	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,00
Souvent présent	Moy. présent		Peu présent	Absent													

Peu de technologies utilisées, typiquement des logiciels d'ingénierie, de cybersécurité et des systèmes ERP

Groupe 2

CFAO	ERP	CSECU	SGPROD	SMAC	eCOM	Big Data	CPS	Robots	M2M	IoT	Cloud	AGV	Mobil	CRM	Ch App	VRAR	SIMUL
2	2	2	1,75	1,75	1,75	1,5	1,5	1,5	1,5	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1	1	1
Présent			Souvent présent			Moy. présent				Peu présent					Absent		

Plusieurs technologies utilisées, en voie d'atteindre l'Industrie 4.0

Groupe 3

ERP	Cloud	CRM	CFAO	SMAC	IoT	SGPROD	CSECU	eCOM	SIMUL	VRAR	Big Data	Ch App	CPS	AGV	Mobil	Robots	M2M
2	1,75	1,75	1,5	1,5	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1	1	1	1	1	1	1
Présent	Souvent présent		Moy. présent		Peu présent						Absent						

Système intégré toujours présent, et mise surtout sur l'infonuagique et la relation client

1,00 Absent	1,00-1,25
1,25 Peu présent	1,25-1,50
1,50 Moyennement présent	1,50-1,75
1,75 Souvent présent	1,75-2,00
2,00 Présent	2,00

Figure 6.5 : Répartition des groupes selon les outils numériques utilisés

La Figure 6.5 montre que le Groupe 1 utilise peu d'outils numériques associés à l'Industrie 4.0. Les entreprises de ce groupe utilisent principalement les logiciels d'ingénierie (CFAO) et environ la moitié d'entre elles utilisent des systèmes ERP, la cybersécurité et les médias sociaux (SMAC). Les entreprises du Groupe 2 utilisent toutes les logiciels d'ingénierie (CFAO), les systèmes ERP et la cybersécurité. Les trois quarts d'entre elles utilisent également des systèmes de gestion de la production (SGPROD), les médias sociaux (SMAC) et le commerce électronique (eCOMm) et la moitié utilise les outils du Big Data, des systèmes cyber-physiques, des robots et la communication intermachine (M2M). Les entreprises du Groupe 3 sont plus hétérogènes à ce niveau, bien qu'au moins trois entreprises sur quatre utilisent l'infonuagique, un système ERP et un système de gestion de la relation client (CRM). La moitié des entreprises du Groupe 3 utilise également les logiciels d'ingénierie et les médias sociaux (SMAC). On peut également noter que les entreprises du Groupe 2 sont typiquement les seules à utiliser les systèmes cyber-physiques, les systèmes de gestion de la production, les robots, la communication intermachine et le commerce électronique. De même, les entreprises du Groupe 3 sont davantage portées vers l'infonuagique, les systèmes de gestion de la relation client et parfois, la réalité augmentée ou virtuelle (VRAR) en comparaison aux autres entreprises. La Figure 6.5 montre qu'il y a au sein des groupes, une certaine hétérogénéité au niveau des outils numériques utilisés. Toutefois, des tendances peuvent être remarquées, offrant alors une compréhension plus complète des trois groupes et de leurs différences respectives.

Il peut désormais être intéressant d'étudier les entreprises au sein des mêmes groupes afin d'y déceler les similitudes les plus prononcées. Pour cette analyse, le coefficient de variation est l'indicateur qui a été utilisé. Il a été décidé d'utiliser un coefficient de variation inférieur à 20 % pour statuer une ressemblance suffisante entre les entreprises du groupe et ainsi, identifier les tendances significatives à l'intérieur des groupes. Les informations utilisées sont présentées au Tableau 6.7.

Suivant cette logique, les entreprises du Groupe 1 ont montré avoir des ressemblances importantes au niveau du leadership (CV = 0,16), de la culture et de l'organisation (CV = 0,10), de la gestion des technologies (CV = 0,15), de l'expérience client (CV = 0,19) et du système de mesure (CV = 0,17). À l'inverse, la gestion des données ne semble pas être un élément qui relie les entreprises à l'intérieur du Groupe 1, puisque le coefficient de variation est de 0,28. La dimension culture et organisation moyenne dans le Groupe 1 est de 2,39 alors que les autres dimensions ont typiquement une performance numérique sous la barre du 2/4, démontrant un manque général de numérisation dans ces entreprises. Les pratiques d'affaires qui relient les entreprises du Groupe 1 sont la veille technologique (CV = 0,17), l'acquisition et le développement de compétences (CV = 0,16), l'ouverture à l'externe (CV = 0,12), la communication interne (CV = 0,13), la maîtrise des technologies (CV = 0,11) et l'utilisation opérationnelle des données (CV = 0,20). La plus grande faiblesse de ces entreprises est surtout l'utilisation opérationnelle des données, avec un score moyen de 1,72 pour les entreprises de ce groupe. La plus grande force est l'ouverture à l'externe avec un score moyen de 2,77. Les autres pratiques d'affaires ont des performances numériques moyennes entre 2,00 et 2,50, démontrant que ces entreprises sont encore à un niveau discipliné et peu intégré. Au niveau des processus d'affaires, les entreprises du Groupe 1 se ressemblent au niveau de la direction (CV = 0,17), des ventes (CV = 0,14), du développement et de l'ingénierie (CV = 0,16), de la planification de la production (CV = 0,15), de la distribution et de l'expédition (CV = 0,19), du service client (CV = 0,18), de l'approvisionnement (CV = 0,11), de la maintenance (CV = 0,17), de la gestion des TI (CV = 0,18) et de la comptabilité (CV = 0,16). Tout comme les pratiques d'affaires, les scores moyens de performance numérique pour les processus d'affaires se situent entre 2,00 et 2,50, à l'exception de la maintenance qui se situe en moyenne sous la barre du 2/4 (1,86). Au niveau des technologies utilisées, les entreprises du Groupe 1 semblent relativement hétérogènes puisque les coefficients de variation varient tous entre 0,26 et 0,36 à l'exception de l'utilisation des logiciels d'ingénierie (CV = 0,14) et de l'absence totale d'utilisation de la réalité augmentée et de la réalité virtuelle (CV = 0,00).

Les entreprises du Groupe 2 ont montré avoir des ressemblances importantes au niveau du leadership (CV = 0,16), de la culture et de l'organisation (CV = 0,04), de la gestion des technologies (CV = 0,12), de l'expérience client (CV = 0,15) et du système de mesure (CV = 0,08). En moyenne, les dimensions de la performance numérique dans le Groupe 2 se situent généralement entre 2,5 et 3,5, démontrant un niveau numérique intégré. Au niveau des pratiques d'affaires, les similitudes les plus importantes entre les entreprises du Groupe 2 tendent à être la vision et la stratégie (CV = 0,17), la veille technologique (CV = 0,10), l'engagement et l'exemplarité (CV = 0,12), la gestion du changement (CV = 0,03), l'agilité et l'innovation (CV = 0,03), l'investissement et les ressources disponibles (CV = 0,06), l'acquisition et le développement de compétences (CV = 0,11), l'ouverture à l'externe (CV = 0,06), le lean et l'amélioration continue (CV = 0,06), la communication interne (CV = 0,06), l'écosystème et l'architecture numérique (CV = 0,15), la maîtrise des technologies (CV = 0,04), l'automatisation des processus (CV = 0,17), la collecte de données (CV = 0,10) et l'utilisation opérationnelle (CV = 0,15) et stratégique (CV = 0,10) des données. Les scores les moins élevés au niveau de la performance numérique chez les entreprises du Groupe 2 sont la vision et la stratégie (2,50), l'écosystème et l'architecture numérique (2,36), l'automatisation (2,23) et l'utilisation opérationnelle (2,61) et stratégique des données (2,74), suggérant des pistes d'amélioration qui pourraient être intéressantes pour les entreprises de ce groupe. Cependant, la vision et la stratégie, l'écosystème et l'architecture numérique et l'utilisation des données dans les entreprises du Groupe 2 sont tout de même plus performantes numériquement que chez les entreprises des deux autres groupes. Les autres pratiques d'affaires similaires entre les entreprises du Groupe 2 sont quant à elles, au-dessus de 3/4, ou alors tout près de cette valeur, démontrant encore une fois le caractère intégré de ces entreprises. Les processus d'affaires similaires dans le Groupe 2 sont la direction (CV = 0,12), le marketing et les communications (CV = 0,19), les ventes (CV = 0,20), le développement et l'ingénierie (CV = 0,11), la planification de la production (CV = 0,14), la distribution et l'expédition (CV = 0,10), le service client (CV = 0,14), la maintenance (CV = 0,07), la gestion des TI (CV = 0,19) et la gestion des

ressources humaines (CV = 0,14). Le service client, la maintenance et la gestion des RH sont les processus d'affaires avec des scores moyens les plus faibles, situés entre 2,35 et 2,55. Les autres processus d'affaires ont des valeurs de performances numériques moyennes situées entre 2,75 et 3,21. Au niveau des outils utilisés, on remarque que les entreprises du Groupe 2 utilisent typiquement les logiciels d'ingénierie (CV = 0,00), les systèmes ERP (CV = 0,00) et la cybersécurité (CV = 0,00). Ces dernières n'utilisent toutefois pas d'outils de simulation (CV = 0,00), de systèmes de gestion de la chaîne d'approvisionnement intelligents (CV = 0,00) et de réalité augmentée et réalité virtuelle (CV = 0,00).

Les résultats ont aussi montré que les entreprises du Groupe 3 semblent avoir des ressemblances importantes au niveau de l'ensemble des dimensions de la performance numérique (CV entre 0,03 et 0,19). Au niveau des pratiques d'affaires, ces dernières se rejoignent surtout en rapport à la veille technologique (CV = 0,15), la gestion du changement (CV = 0,14), l'agilité et l'innovation (CV = 0,08), l'investissement et les ressources disponibles (CV = 0,12), l'acquisition et le développement de compétences (CV = 0,14), l'ouverture à l'externe (CV = 0,06), l'usage du lean et de l'amélioration continue (CV = 0,03), la communication interne (CV = 0,09), la maîtrise des technologies (CV = 0,06), l'automatisation des processus (CV = 0,11), la cybersécurité (CV = 0,16), la collecte (CV = 0,16) et la livraison (CV = 0,06) des données, la fidélisation (CV = 0,16) et l'utilisation opérationnelle (CV = 0,15) et stratégique (CV = 0,07) des données. La majorité des pratiques d'affaires communes dans les entreprises du Groupe 3 ont des valeurs de performance numérique entre 2,25 et 2,75/4, démontrant que ces entreprises se situent entre le niveau discipliné et intégré. Leurs plus grandes forces se situent surtout au niveau de l'ouverture à l'externe (3,03), de la cybersécurité (2,93) et de la collecte de données (3,00). Les processus d'affaires similaires entre les entreprises du Groupe 3 sont la direction (CV = 0,10), le marketing et les communications (CV = 0,02), les ventes (CV = 0,08), le développement et l'ingénierie (CV = 0,15), la planification (CV = 0,10) et la gestion de la production (CV = 0,17), la distribution et l'expédition (CV = 0,04), le service client (CV = 0,16),

l'approvisionnement (CV = 0,18) et la maintenance (CV = 0,15). Ces processus d'affaires ont typiquement une performance numérique entre 2,18 et 2,83. Les entreprises du Groupe 3 utilisent toutes un système ERP (CV = 0,00) et n'utilisent pas d'outils du Big Data, des logiciels de gestion de chaîne d'approvisionnement intelligents, de système cyber-physique, de véhicule autoguidé (AGV), d'appareil mobile, de robot et de communication intermachine (CV = 0,00).

Les différences et les ressemblances significatives ainsi que les tendances démontrées par le partitionnement de données ont finalement permis de séparer les trois groupes selon les descriptions suivantes :

1. les entreprises du Groupe 1 se distinguent typiquement par un manque de vision et de stratégie par rapport aux autres groupes. Elles ont un LDS < 2, donc tout au plus discipliné. Ces entreprises ont une culture numérique moyenne (2,39), mais un faible niveau d'utilisation des technologies (1,97) et des données (1,84). Les processus d'affaires sont disciplinés, mais sans plus et peu de technologie du 4.0 sont en place dans ce type d'entreprise, à l'exception des logiciels d'ingénierie, d'outils de cybersécurité et parfois, de système ERP. Les entreprises de ce groupe semblent peu utiliser de données en temps réel (COL, LIV, QLT, UOP, UST), ne semblent pas connecter leurs systèmes dans une architecture numérique (ÉCO), maîtriser les technologies en place (MAÎT) ou opter pour l'automatisation de leurs processus (AUTO). Elles tendent à manquer d'engagement (ENG) en provenance de la direction (DIR) et ne mettent pas en place les processus suffisants pour mettre en œuvre une transformation numérique effective (GCH, AGI, RES, COMP, OUV, LEAN, COMM). Ces entreprises sont peu numérisées et doivent mettre en œuvre des efforts importants pour passer à un niveau d'Industrie 4.0. Cependant, la participation à cette thèse démontre l'intérêt des entreprises à aller vers la transformation numérique. Ces résultats montrent en effet que les entreprises sont dans un domaine nouveau et cherchent la meilleure manière d'investir pour réussir son passage à l'Industrie 4.0;

2. les entreprises du Groupe 2 se distinguent par un LDS élevé (2,69) et une vision numérique très supérieure (> 100% plus élevé) aux autres entreprises. Ces entreprises ont généralement une culture numérique très élevée (3,18) ainsi qu'une gestion des technologies (2,58) et un système de mesure (2,68) qui tendent à être intégrés. Les entreprises de ce groupe se distinguent également par une revue de leur modèle d'affaires (3,20), l'engagement de la direction (3,05) et la mise à disposition de ressources suffisantes (3,89) pour implanter la transformation numérique. Elles effectuent typiquement des activités de veilles technologiques (3,13), possèdent un processus formel de gestion du changement (3,18), mettent en place des pratiques d'agilité et d'innovation (3,07), tendent à aller chercher et développer les compétences requises pour le numérique (2,74), font régulièrement appel à de l'aide externe (3,28), implantent les notions du lean (3,18), possèdent un système de communication adéquat (2,93) et tendent à maîtriser leurs technologies en place (2,87). Leur système de collecte de données est intégré et tend vers le temps réel (3,25) et des tableaux de bord sont généralement utilisés (2,61 et 2,74). L'automatisation (2,23) et l'interconnectivité des systèmes numériques (2,36) sont encore en voie d'intégration. L’ensemble de leurs processus d’affaires semble être supporté numériquement et les processus de direction (3,21) et de distribution (3,07) le sont beaucoup plus que chez les autres entreprises. Elles sont dans les rares entreprises qui possèdent et utilisent des systèmes de gestion de la production et le e-Commerce. Bien que ce ne soit que des tendances, les entreprises du Groupe 2 semblent les plus portées à mettre en place les technologies de l’Industrie 4.0 telles que le Big Data, les systèmes cyber-physiques, les systèmes de gestion de la production, les systèmes ERP, les robots, la communication intermachine, la cybersécurité, les médias sociaux et le commerce électronique. Ces entreprises semblent bien avancées au niveau de la transformation numérique et se démarquent surtout par leur leadership et leur culture et organisation très développés;

3. les entreprises du Groupe 3 se distinguent par un leadership (1,80), une culture et une organisation (2,63) faibles, mais qui performent néanmoins au niveau numérique (2,35). Ces entreprises possèdent généralement une gestion des technologies (2,45) et des données (2,67) et un système de mesure (2,47) qui tendent à être intégrés. Les entreprises de ce groupe se distinguent par l'absence de vision et de stratégie numériques (0,88) et de revue du modèle d'affaires (1,90) et par un niveau d'engagement de la direction moyen (2,00). Les entreprises du Groupe 3 possèdent des scores similaires au Groupe 2 au niveau de nombreuses pratiques d'affaires, démontrant une performance numérique qui tend vers l'intégration, notamment au niveau de la gestion du changement (2,75), de l'agilité et l'innovation (2,71), de l'acquisition et du développement des compétences (2,30). Elles font également appel à de l'aide externe (3,03), utilisent certaines notions du lean et de l'amélioration continue (2,48), possèdent un système de communication adéquat (2,73) et tendent à avoir un certain niveau de maîtrise de leurs technologies en place (2,50). Elles semblent collecter (3,00) et diffuser (2,75) les données de façon intégrée et utiliser adéquatement les données tant au niveau des opérations (2,33) que des décisions stratégiques (2,61). L'automatisation (2,28) et l'interconnectivité des systèmes numériques (2,11) sont encore en voie d'intégration, notamment par l'utilisation de l'infonuagique, de systèmes ERP, de systèmes de gestion de la relation client et parfois, de systèmes de gestion de la production. L'ensemble de leurs processus d'affaires semblent être équitablement numérisés, à l'exception des processus de maintenance (2,83), de gestion des ressources humaines (2,80) et de qualité et amélioration continue (3,15) qui sont davantage supportés numériquement. Bien que le manque de leadership et de culture soit notable dans ces entreprises, ces dernières semblent néanmoins bien avancées au niveau de la transformation numérique et semblent investir davantage dans la qualité, la maintenance, l'utilisation efficiente des données et une bonne gestion du changement.

Une autre analyse intéressante qui peut être faite à partir du partitionnement de données, est de tenter d'identifier les tendances qui relient les différentes pratiques d'affaires de l'Industrie 4.0. Un algorithme de partitionnement de données a été fait sur les résultats des pratiques d'affaires en regroupant les pratiques d'affaires selon leur niveau de corrélation. La Figure 6.6 présente le dendrogramme issu de l'algorithme. Le calcul est présenté à l'Annexe 5.

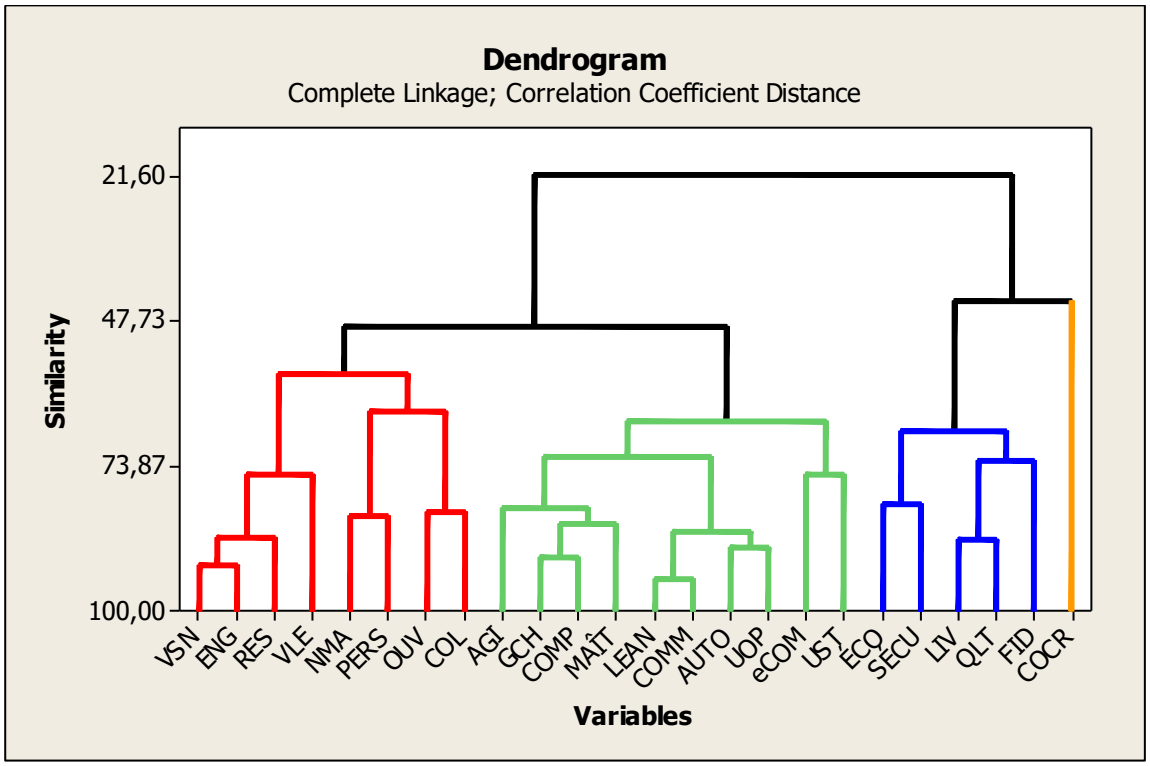


Figure 6.6 : Dendrogramme des pratiques d'affaires

Le partitionnement de données montre que quatre groupes de pratiques d'affaires ont été formés. Pour éviter de confondre ces groupes avec les Groupes 1, 2 et 3 analysés précédemment, ces derniers seront respectivement nommés « Groupement 1 », « Groupement 2 », « Groupement 3 » et « Groupement 4 ». Le Groupement 1 est composé de la vision et la stratégie (VSN), de l'engagement et l'exemplarité (ENG), de l'investissement et ressources disponibles (RES), de la veille technologique (VLE), des

nouveaux modèles d'affaires (NMA), de la personnalisation (PERS), de l'ouverture à l'externe (OUV) et de la collecte de données (COL). Le Groupement 2 est constitué de l'agilité et l'innovation (AGI), de la gestion du changement (GCH), de l'acquisition et du développement de compétences (COMP), de la maîtrise des technologies (MAÎT), du lean et de l'amélioration continue (LEAN), de la communication interne (COMM), de l'automatisation (AUTO), de l'utilisation opérationnelle des données (UOP), du commerce électronique (eCOM) et de l'utilisation stratégique des données (UST). Le Groupement 3 est composé de l'écosystème et l'architecture numérique (ÉCO), de la cybersécurité (SÉCU), de la livraison (LIV) et la qualité (QLT) des données et de la fidélisation du client (FID). Le Groupement 4 est uniquement composé de la pratique d'affaires cocréation (COCR).

Le Tableau 6.11 présente les forces et les faiblesses des Groupe 1, Groupe 2 et Groupe 3 par rapport au 4 groupements formés par le partitionnement des données. Les forces et les faiblesses sont déterminées par les tests d'hypothèse qui ont été faits au Tableau 6.9.

Tableau 6.11 : Forces et faiblesses des trois groupes répartis selon les quatre groupements

Groupements	Pratiques d'affaires	Groupe 1	Groupe 2	Groupe 3
Groupement 1	VSN	×	√	×
	ENG	×	√	×
	RES	×	√	×
	VLE	×	√	×
	NMA	×	√	×
	PERS	-	-	-
	OUV	×	√	√
	COL	×	√	√
Groupement 2	AGI	×	√	√
	GCH	×	√	√
	COMP	×	√	√
	MAÎT	×	√	√
	LEAN	×	√	√
	COMM	×	√	√
	AUTO	×	√	√
	eCOM	×	√	√
	UOP	×	√	√
	UST	×	√	√
Groupement 3	ÉCO	×	√	√
	SÉCU	-	-	-
	LIV	×	√	√
	QLT	-	-	-
	FID	-	-	-
Groupement 4	COCR	-	-	-

× Faiblesse
√ Force
- Ni force ni faiblesse

Il est intéressant de constater que les différences entre les groupes se reflètent assez bien dans le Tableau 6.11. En effet, les résultats montrent que le Groupe 1 est plus faible au niveau de la performance numérique pour l'ensemble des pratiques d'affaires étudiées. De l'autre côté, le Groupe 2 est visiblement performant numériquement en rapport à presque toutes les pratiques étudiées et les entreprises du Groupe 3, quant à elles, semblent avoir misé davantage sur les pratiques du Groupement 2.

En étudiant ces quatre groupements, il est possible de distinguer certaines tendances dans les pratiques qui les composent. Le Groupement 1 semble être composé de pratiques fortement liées à la direction et à la stratégie d'une entreprise (VSN, ENG, RES, VLE, OUV), amenant de plus en plus à la personnalisation de masse (NMA, PERS, COL). Le Groupement 2 semble de son côté, être composé de pratiques d'affaires surtout axées sur l'interne, telles que la culture et l'organisation, les méthodes de travail et l'utilisation des données (AGI, GCH, COMP, MAÎT, LEAN, COMM, AUTO, UOP, UST). Le Groupement 3 semble quant à lui, être composé de tout ce qui touche l'intégration, la qualité, l'accès et la sécurité des données (ÉCO, SÉCU, LIV, QLT, FID). Enfin, le Groupement 4 est composé d'une pratique d'affaire qui ne semble pas être liée à aucun des trois autres groupements.

Pour terminer, l'analyse par partitionnement de données a permis de comprendre davantage les entreprises de l'échantillon et identifier des tendances tant au niveau des pratiques d'affaires que des processus d'affaires et des outils utilisés par les différents groupes d'entreprises. Cela a également permis de voir où les trois groupes mettent des efforts pour passer à l'Industrie 4.0, ce qui permettra éventuellement d'adapter la stratégie de passage au 4.0 en fonction de la position de chaque entreprise par rapport au modèle de performance numérique utilisé dans cette recherche.

6.5 Recommandations aux entreprises et discussion

Dans le contexte de déploiement des évaluations de la performance numérique par le MÉSI, plusieurs des entreprises de l'échantillon étaient sur le point d'investir dans de nouvelles technologies et comptaient sur la démarche proposée dans cette recherche pour orienter leurs futurs investissements. À la suite de chaque expérience, un plan d'action ou souvent nommés « plan numérique », a été proposé aux entreprises, élaborés en fonction du résultat de l'évaluation, des enjeux, des priorités et des objectifs d'affaires spécifiques à chaque entreprise ainsi que de leur besoin technologique pour atteindre l'Industrie 4.0. Chaque plan numérique comportait en moyenne quatre à cinq recommandations, directement issues des priorités numériques des entreprises

rencontrées. La Figure 6.7 présente la fréquence des outils numériques proposés dans les plans numériques présentés aux entreprises.

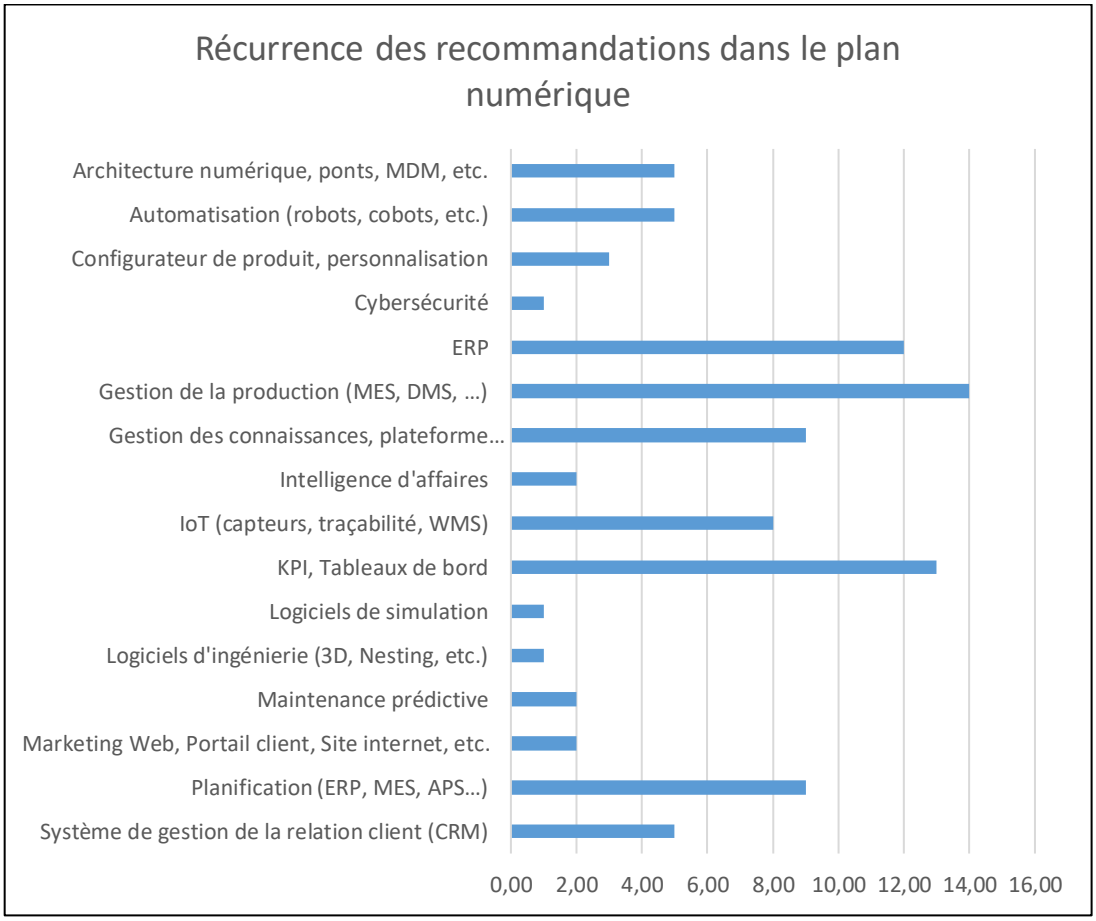


Figure 6.7 : Récurrences des outils dans les plans numériques des 21 entreprises

Étant donné l'importance de la donnée dans une démarche de transformation numérique, les recommandations concernant surtout la mise en place des systèmes ERP, des systèmes de gestion de la production et des tableaux de bords ont ressorti comme étant des priorités dans la plupart des entreprises rencontrées. Plusieurs entreprises avaient déjà un système ERP en place, mais plusieurs sentaient ne pas maîtriser pleinement le système ou alors qu'il ne répondait pas correctement aux besoins de l'entreprise, souvent suite à une croissance importante. La méconnaissance des systèmes ERP et du rôle associé aux différentes technologies semblait également affecter le sentiment que les

technologies répondaient ou non aux besoins. Par exemple, plusieurs entreprises cherchaient parmi les fournisseurs de systèmes ERP, la solution qui allait permettre de gérer la production en temps réel, consommer la matière sans intervention humaine, suivre le flux de matière, planifier en capacité finie et gérer les retards, erreurs et imprévus. Autrement dit, elles cherchaient une solution qui combine les fonctionnalités des systèmes ERP et des systèmes MES. C'est pourquoi les résultats montrent que 12 des 21 entreprises étudiées, ressentaient le besoin d'intégrer leurs données dans un système ERP. La Figure 6.7 montre toutefois que les besoins les plus critiques dans les entreprises de l'échantillon étaient davantage liés à l'exécution en temps réel de la production, besoin répondu, selon la littérature, par les systèmes MES. Ce constat suggère alors que les capacités des systèmes ERP sont limitées lorsque vient le moment de gérer une production manufacturière en temps réel. Les systèmes MES semblent en effet répondre davantage à cette facette de l'entreprise manufacturière. Les tests d'hypothèses valident par ailleurs cette idée puisque les entreprises qui possèdent des systèmes MES ont vu leur score de performance numérique augmenter de 20 % par rapport aux entreprises ne possédant pas de tel système. La recommandation associée à la mise en place de tableaux de bords et d'outils associés à l'intelligence d'affaires reprend l'idée que les entreprises possèdent des données (pratique d'affaires « Acquisition de données (COL) »), mais n'ont pas la capacité de transformer ces données en informations pertinentes (pratiques d'affaires « Livraison (LIV) et Qualité de la donnée (QLT) »). Les entreprises cherchent alors des moyens d'être plus proactives grâce à la donnée et moins réactives aux situations imprévues et urgences via entre autres, la mise en place d'indicateurs de performance significatifs et de tableaux de bord en temps réel.

Les résultats présentés à la Figure 6.7 montrent également que neuf des 21 entreprises cherchent des moyens efficaces de gestion des connaissances et de collaboration interne pour améliorer leur performance numérique. Dû à une difficulté à recruter la main-d'œuvre et développer les compétences des employés, plusieurs entreprises cherchent en effet à améliorer leur système de formation et de partage d'information. Des outils

comme Poka ou des chaînes Youtube privées pour partager des vidéos de formation ainsi que des médias sociaux internes tels que Workplace de Facebook, Slack, Sharepoint et Microsoft Team, sont des recommandations qui répondent à un besoin très présent dans les entreprises. Ensuite, la Figure 6.7 montre que les outils liés à la traçabilité et l'Internet des Objets ont été recommandés dans huit entreprises sur 21. Les besoins de contrôler des équipements à distance, gérer et tracer les mouvements d'inventaires, optimiser la logistique, les réceptions et les expéditions en temps réel et collecter et transmettre ces informations dans les autres systèmes de l'entreprise ont sorti comme prioritaires dans près de 40 % des entreprises de l'échantillon. Ce constat nous amène alors à croire que les entreprises veulent contrôler plus finement chaque pièce, assemblage et composante par rapport à ce que permet les systèmes typiques de gestion et cherchent à connecter leurs systèmes pour limiter les manipulations de données. Dans cette même lignée, près de 25 % des entreprises cherchent également à bâtir des ponts entre leurs logiciels ou à revoir leur architecture numérique et les relations entre les systèmes afin d'améliorer la connectivité et l'intégrité des données.

La planification de la production est également sortie comme un besoin prioritaire dans neuf entreprises de l'échantillon. Plusieurs de ces entreprises possèdent un module de planification dans leur système ERP, mais préféraient développer un outil sur Excel, car ce qui est offert dans les ERP ne répondait pas à leurs besoins en termes de planification de la production. De plus, les systèmes de gestion de la relation client ont été proposés dans près de 25 % des cas démontrant un intérêt de plus en plus marqué au niveau de la satisfaction de la clientèle.

Enfin, les tests d'hypothèse sur les outils numériques n'ont pas permis de soulever suffisamment d'information pour les prioriser l'un par rapport à l'autre. L'étude des tendances à l'aide du partitionnement de données et la récurrence des besoins technologiques soulevés dans les entreprises ont toutefois permis de prioriser ces besoins.

6.6 Comparaison avec une étude similaire (MÉSI)

En juin 2017, le Ministère de l'Économie, de la Science et de l'Innovation a déposé un rapport intitulé « Enquête auprès des entreprises manufacturières du Québec ». Cette étude a été faite dans le but d'évaluer les intentions des entrepreneurs québécois quant au numérique ainsi que l'effet de l'Industrie 4.0 sur le développement des entreprises. À l'aide d'un sondage téléphonique impliquant 500 entreprises manufacturières, le MÉSI a évalué une maturité numérique moyenne de 1,87/4 pour l'ensemble des entreprises de l'échantillon. Plus spécifiquement, les entreprises de 10 à 19 employés ont reçu une valeur de maturité numérique de 1,62/4; les entreprises de 20 à 49 employés, un score de 1,82/4; et les entreprises de plus de 50 employés, un score de 2,22/4. La méthode de calcul de cet indicateur n'est pas démontrée dans le rapport du MÉSI, mais l'échelle utilisée pour l'étude est en quatre niveaux, à savoir :

1. manuel;
2. soutenu technologiquement mais non-intégré;
3. soutenu technologiquement et partiellement intégré;
4. complètement intégré.

Il est donc possible de constater la similarité avec l'échelle de la Figure 3.2. En effet, l'échelle de la Figure 3.2 provient principalement des études menées par le CEFRIO et c'est cette même organisation qui a été mandatée par le MÉSI pour conduire l'étude de ce rapport. Il est alors intéressant de constater que les valeurs de maturité numérique présentées par le MÉSI sont similaires aux valeurs de performance numérique mesurées dans l'étude actuelle (performance moyenne à 2,18/4).

Dans le jargon de la transformation numérique, il a été constaté qu'il existe une confusion entre les termes « maturité », « performance », « *readiness* » et « quotient » numériques. Cette confusion peut alors compliquer la comparaison entre les études tournant autour du sujet de la transformation numérique. La similarité entre l'échelle utilisée par le CEFRIO dans « l'Enquête auprès des entreprises manufacturières du

Québec » et celle utilisée dans cette thèse, de même que la ressemblance entre les résultats, tendent à démontrer qu'une comparaison, bien que limitée, puisse être effectuée entre les résultats des deux études. Dans cette optique et à la lumière des résultats des deux études, les entreprises manufacturières québécoises semblent à l'heure actuelle, posséder un niveau de performance numérique discipliné, de plus en plus intégré, mais avec peu d'utilisation des données en temps réel.

La différence entre les valeurs de performance numérique moyenne dans les deux études amène toutefois à se questionner sur la cause de la différence. En effet, l'étude actuelle exigeait aux entreprises d'avoir en main une planification stratégique récente et de démontrer un certain niveau de maturité organisationnelle. Dans le cas du MÉSI, cette exigence ne faisait pas nécessairement partie des critères de sélection, étant donné la taille de l'échantillon (500 entreprises). Il est donc possible de poser comme hypothèse que les critères de sélection employés dans cette thèse ont un impact sur la performance numérique des entreprises. Le Tableau 6.12 présente un comparatif de la performance et de la maturité numérique entre les expériences de cette thèse et l'étude du MÉSI.

Tableau 6.12 : Comparaison de la performance/maturité numérique

Groupe d'entreprise	Nombre d'entreprises	Maturité moyenne
Expériences Thèse	21	2,18
MÉSI < 19 employés	176	1,62
MÉSI [19;29] employés	175	1,82
MÉSI > 29 employés	148	2,22
MÉSI Total	499	1,87

En supposant que les 21 entreprises de la thèse actuelle possèdent un plan stratégique et que les 500 entreprises de l'étude du MÉSI n'en possèdent pas, il a été possible de faire un test d'hypothèse sur l'effet de la présence d'un plan stratégique sur la performance

numérique des entreprises[1]. L'étude est présentée au Tableau 6.13 et a été faite selon un degré de confiance de 95 %.

Tableau 6.13 : Test d'hypothèse sur la présence d'un plan stratégique

Source	Degré de liberté	Somme des carrés	Carrés moyens	F	p-value
Plan stratégique	1	1,9172	1,9172	33,60	0,0000
Erreur	518	29,5596	0,0571		
Total	519	31,4768			

```
Niveau N    Moy     e-type  ------+---------+---------+---------+---
1      499  1,8716  0,2436  (-*-)
2       21  2,1800  0,0000                    (--------*-------)
                            ------+---------+---------+---------+---
                                1,92      2,04      2,16      2,28
```

À la lumière des résultats présentés ici, il est possible de supposer que les critères exigés par le ministère pour être éligibles à l'évaluation de la performance numérique (plan stratégique et maturité organisationnelle) aident au passage des PME à l'Industrie 4.0. En effet, ces critères semblent avoir un impact positif sur la performance numérique des entreprises. Une étude plus détaillée à partir des questionnaires et du modèle de chaque étude permettrait de tirer davantage de conclusions, mais cette comparaison a néanmoins permis de mettre en perspective les résultats de la thèse avec une étude similaire dans un milieu similaire.

Les résultats présentés dans ce chapitre ont permis de faire ressortir les facteurs d'influence semblant offrir les bénéfices les plus importants pour une PME qui désire engager sa transformation numérique. Le prochain chapitre propose alors une stratégie efficiente de passage au 4.0 grâce à la priorisation des différents facteurs d'influence étudiés dans cette recherche.

[1] Cette supposition prend pour hypothèse que parmi les 500 entreprises sélectionnées aléatoirement par le CEFRIO, certaines ont possiblement un plan stratégique, mais l'échantillon comporte également plusieurs entreprises qui n'en possèdent pas. Ceci permet alors de déterminer deux niveaux de la variable indépendante, à savoir : (1) la présence d'un plan stratégique et (2) l'absence d'un tel plan.

CHAPITRE 7

PROPOSITION D'UNE STRATÉGIE DE PASSAGE AU 4.0

Les résultats présentés jusqu'à maintenant ont démontré que l'échantillon étudié dans cette thèse semble converger au niveau des besoins vécus au quotidien par les entreprises. Cette base commune permet alors de proposer une stratégie adaptée pour l'ensemble des entreprises et présente les pratiques minimales à mettre en place pour évoluer vers l'Industrie 4.0. Le Tableau 7.1 expose les priorités qui ont pu être soulevées à partir des résultats récoltés lors de l'étude. Quatre niveaux de priorités ont été déterminés :

1. **Essentiel** :

- la pratique ou le processus d'affaires a démontré avoir un **impact significatif** sur la performance numérique des entreprises et offre un **gain potentiel d'au moins 20 %** d'amélioration (colonne « %Écart » dans les Tableaux 6.3, 6.5 et 6.6);
- l'outil numérique a été signifié comme prioritaire dans près de **40 % entreprises** (Figure 6.7).

2. **Prioritaire** :

- la pratique ou le processus d'affaires a démontré avoir un **impact significatif** sur la performance numérique des entreprises et offre un **gain potentiel de 10 % à 20 %** d'amélioration;
- l'outil numérique a été signifié comme prioritaire chez près de **25 % des entreprises**.

3. **Non prioritaire** :

- la pratique d'affaires ou le processus d'affaires n'a **pas** démontré avoir d'**impact significatif** sur la performance numérique des entreprises, mais tend à améliorer la performance numérique de **plus de 10 %;**

- l'outil numérique a été signalé comme prioritaire dans près de **15 % des entreprises**.

4. **Cas particuliers** :

- la pratique d'affaires ou le processus d'affaires n'a **pas** démontré avoir d'**impact significatif** sur la performance des entreprises et augmente, en moyenne, la performance numérique de **moins de 10 %**;
- l'outil numérique a été soulevé comme prioritaire dans **moins de 15 % des entreprises**.

Tableau 7.1 : Priorités pour le passage à l'Industrie 4.0

Niveau d'importance	Pratiques d'affaires	Processus d'affaires	Outils numériques
Essentiel (Significatif et >20 % Gain)	Vision et Stratégie	Direction	ERP
	Écosystème et Architecture numérique	Gestion des TI	MES, IoT, WMS
	Engagement et Exemplarité		KPI et Tableaux de bord
	Maîtrise des outils numériques		IoT
	Automatisation		Planification de la prod.
	Qualité de la donnée		Gestion des connaissances
	Commerce électronique		
Prioritaire (Significatif et >10 % Gain)	Gestion du changement	Ventes	Pont numérique
	Agilité et Innovation	Développement	Automatisation
	Lean et Amélioration continue	Planification de la production	CRM
	Cybersécurité	Gestion de la production	
	Livraison de la donnée	Distribution	
	Personnalisation	Service client	
	Utilisation opérationnelle de la donnée	Comptabilité	
	Utilisation stratégique de la donnée		
Non-Prioritaire (Non-signif. mais >10 % Gain)	Nouveau Modèle d'Affaires	Approvisionnement	Configurateur de produit
	Ressources et Investissement	Maintenance	
	Acquisition et Développement des Compétences		
	Communication interne		
	Acquisition des données		
	Service et Fidélisation		
Cas particuliers (Non-signif. et Gain <10 %)	Veille technologique	Marketing	Cybersécurité
	Ouverture à l'externe	Gestion des RH	Simulation
	Cocréation	Qualité et Amélioration continue	Logiciels d'ingénierie
			Maintenance prédictive
			Marketing Web

À partir des priorités établies au Tableau 7.1 et des questions du questionnaire présenté au Tableau 5.1, il est possible d'établir une liste de recommandations préétablies pour répondre aux enjeux des entreprises. Les recommandations sont regroupées par priorité, par dimension et par pratiques d'affaires. Les outils numériques facilitant sont aussi intégrés aux recommandations. Ces recommandations pourront par la suite être utilisées lors de la stratégie de passage au 4.0. Les recommandations sont présentées au Tableau 7.2.

Tableau 7.2 : Recommandations selon les trois premiers niveaux de priorité

Priorité	Dimension	Pratique d'affaires	Recommandation	Outils numériques facilitants
Essentiel	**Leadership**	Développer une **Vision et Stratégie numérique**	Développer une vision 4.0 cohérente avec les objectifs d'affaires de l'entreprise	-
			Revisiter la vision numérique régulièrement	-
			Communiquer efficacement la vision et la stratégie 4.0 à toute l'équipe	-
			Développer une stratégie d'intégration des technologies numériques cohérente avec la vision 4.0	-
			Mettre en œuvre la stratégie d'intégration des outils numériques	-
			Amener les employés à intégrer la vision 4.0 dans leur travail	-
		Démontrer un **Engagement et une Exemplarité**	Mettre en place des plans de contingence en cas de difficulté lors des projets d'amélioration	-
			Impliquer les employés dans les processus d'innovation et d'adoption des technologies	-
			Amener les employés à saisir les opportunités du numérique pour améliorer leur travail	-
			Définir clairement le rôle des employés dans la stratégie d'intégration des technologies numériques	-
			Développer un plan numérique concret qui comprend des objectifs clairs, un responsable, des délais et des actions à poser	-
	Gestion des Technologies	Développer et clarifier **l'Écosystème et l'Architecture numérique**	Développer une cartographie de l'ensemble des systèmes, machines et logiciels utilisés et de leur interconnexion (architecture numérique)	-
			Mettre en place un langage standard de programmation et développer des ponts informatiques pour faire parler les systèmes ensemble	Ponts informatiques
			S'assurer que les technologies en place répondent aux besoins réels de l'entreprise	-
			Développer des interfaces pour faciliter l'usage des technologies numériques	-

Tableau 7.2 : Recommandations selon les trois premiers niveaux de priorité (suite)

Priorité	Dimension	Pratique d'affaires	Recommandation	Outils numériques facilitants
Essentiel	**Gestion des Technologies**	Développer et clarifier **l'Écosystème et l'Architecture numérique**	Mettre en place un réseau informatique suffisamment rapide pour supporter les technologies numériques utilisées	-
		Maîtriser les outils numériques	Former des équipes multidisciplinaires lors de projets d'implantation des technologies pour assurer l'appropriation	-
			Clarifier les objectifs auxquels les technologies numériques doivent répondre	-
			Prioriser les projets numériques en fonction de la stratégie en place et des objectifs	-
			Fournir du soutien technique adéquat pour l'utilisation des technologies numériques (Accès à un expert numérique, Programme de formation et suivi, formation périodique du fournisseur, etc.)	-
		Automatiser les processus	Mettre en place des systèmes de transfert numérique de l'information (connectivité)	**ERP**, **MES**, **IoT**
			Automatiser les tâches mécaniques et répétitives	**ERP**, **MES**, **IoT**, Robots, Cobots, IA
			Mettre en place un système de notification ou d'alerte en cas d'anomalie pour les processus critiques et éviter les erreurs	**MES**
	Gestion de la donnée	Assurer la **Qualité de la donnée**	Mettre en place des actions pour assurer que les données collectées sont intègres	-
			Développer des processus correctifs en cas d'altération ou de perte de données	-
			S'assurer qu'il n'y a qu'une seule entité pour chaque donnée	-
			Développer des alertes pour détecter les altérations de données	-

Tableau 7.2 : Recommandations selon les 3 premiers niveaux de priorité (suite)

Priorité	Dimension	Pratique d'affaires	Recommandation	Outils numériques facilitants
Essentiel	**Expérience client**	Bénéficier des avantages du **Commerce électronique**	Développer une plateforme d'achat en ligne et/ou de configuration de produit par les clients	Configurateur de produit, Site Web transactionnel
			Utiliser les médias électroniques pour échanger de l'information en temps réel avec les clients, fournisseurs et partenaires	-
			Créer une relation de proximité avec les clients grâce aux médias sociaux ou plateformes collaboratives	CRM
Prioritaire	**Culture et une Organisation**	Améliorer la **Gestion du changement**	Développer une procédure de gestion du changement pour faciliter l'implantation et l'acceptation des projets numériques	-
			Impliquer les employés dans les changements et les projets d'amélioration	-
			Mettre en place un système de formation et de suivi formel lors de changements majeurs	-
		Encourager **l'Agilité et l'Innovation**	Développer des méthodes agiles pour augmenter la rapidité, l'adaptabilité et la flexibilité de l'entreprise	-
			Mettre en place une culture d'innovation dans l'ensemble de l'entreprise	-
			Allouer des moments aux employés pour innover et revoir leurs façons de faire	-
		Mettre en œuvre le **Lean et l'Amélioration continue**	Mettre en place des indicateurs de performance pertinents pour mieux contrôler et générer des projets d'amélioration	**KPI**
			Mettre en place les principes lean et d'amélioration continue autant pour les processus physiques que numériques	-
	Gestion des Technologies	Assurer la **Cybersécurité**	Développer un plan de continuité pour des cas de sinistre informatique	-
			Limiter l'accès aux systèmes et logiciels pour réduire les risques et les erreurs	-
			Mettre en place un système de cybersécurité pour éviter le piratage, vol, virus, etc.	-

Tableau 7.2 : Recommandations selon les trois premiers niveaux de priorité (suite)

Priorité	Dimension	Pratique d'affaires	Recommandation	Outils numériques facilitants
Prioritaire	**Gestion des Technologies**	Assurer la **Cybersécurité**	Former les employés aux risques de la cybersécurité	-
	Gestion de la donnée	Optimiser la **Livraison de la donnée**	Acheminer l'information nécessaire à chaque employé, au bon moment et sans besoin de manipulation pour l'utiliser	**ERP**, **MES**
			Développer et mettre en place des tableaux de bord en temps réel avec des indicateurs pertinents pour faciliter la prise de décisions	Tableaux de bord dynamiques
	Expérience client	Mettre en place la **Personnalisation** de masse	Standardiser et modulariser les produits le plus possible et définir clairement ce qui est personnalisable et ce qui ne l'est pas	-
			Adapter la production pour qu'elle soit agile	-
			Personnaliser le service au client grâce à ses habitudes, données, préférences, historiques, etc.	CRM
	Utilisation de la donnée	Maximiser l'**Utilisation opérationnelle des données**	Développer des systèmes de mise à jour en temps réel des données de production, nécessaires à la prise de décision	**IoT**, **MES**
			Mettre à disposition des indicateurs de performance, tableaux de bord et rapports pour faciliter et accélérer la prise de décision aux opérations	Tableaux de bord dynamiques
			Mettre en place des systèmes de traitement de la donnée pour faciliter l'exécution des tâches opérationnelles	**Outils de Planification de la production**, **WMS**, **MES**, etc.
Non-prioritaire	**Leadership**	Développer de **nouveaux modèles d'Affaires**	Créer de nouveaux services grâce à l'exploitation de la donnée (location, maintenance prédictive, service à distance, paiement à l'usage, etc.)	-
	Culture et Organisation	Déployer des **ressources et investissements**	Faire l'acquisition de ressources (humaines, matérielles, logicielles) pour faciliter le passage au numérique	-

Tableau 7.2 : Recommandations selon les trois premiers niveaux de priorité (suite)

Priorité	Dimension	Pratique d'affaires	Recommandation	Outils numériques facilitants
Non-prioritaire	**Culture et Organisation**	Déployer des **Ressources et Investissements**	Allouer un budget clair pour les projets de transformation numérique	-
			Allouer le temps nécessaire aux employés pour mettre en œuvre et maintenir les projets numériques	-
		Optimiser l'**Acquisition et le Développement des Compétences**	Créer des programmes de formation au numérique et de suivi pour tous les employés	-
			Systématiser la gestion des connaissances et des compétences	Système intégré de ressources humaines (SIRH), **Système de Gestion des connaissances**, Programmes de formation par vidéos
		Maximiser la **Communication interne**	Mettre en place un système de communication interne en temps réel (plateforme de collaboration, intranet, messagerie instantanée, etc.)	Plateforme de collaboration
	Gestion de la donnée	Améliorer le système de **Collecte de données**	S'assurer que la donnée collectée répond à un objectif défini	-
			Automatiser la collecte des données pertinentes	RFID, Traçabilité, **IoT**, Capteurs
			Connecter les systèmes pour le partage des données	**IoT**, Infonuagique
	Expérience Client	Assurer la **Fidélisation** des clients	Classer les clients en fonction de la valeur qu'ils apportent à l'entreprise et créer des programmes de fidélisation	-
			Mesurer la satisfaction des clients selon différents critères d'amélioration (ex : délais, qualité du produit, qualité du service, etc.)	CRM

En considérant les recommandations listées dans le Tableau 7.2 et la méthodologie de transformation numérique proposée par le HUB Institute (section 2.4.3), la stratégie suivante peut alors être proposée pour amener les PME manufacturières québécoises à mettre en œuvre leur transformation numérique :

1. Étape préliminaire :
- développer une vision et une planification stratégique dans l'entreprise;
- cartographier la chaîne de valeur pour assurer le contrôle des processus.
2. Étape Audit :
- répondre au questionnaire proposé selon l'échelle de Likert de la Figure 3.2 pour chaque processus d'affaires (Tableau 5.1).
3. Étape Planifier :
- à partir des résultats du questionnaire, identifier les sources d'amélioration et prioriser les projets dans un plan numérique en fonction des niveaux de priorités et des recommandations du Tableau 7.2.
4. Étape Tester :
- mettre en place les recommandations numériques et non numériques, au départ dans les processus d'affaires jugés prioritaires et optimiser avant le déploiement.
5. Étape Déployer :
- déployer les solutions numériques et non-numériques dans l'ensemble des processus d'affaires.
6. Étape Optimiser :
- corriger, optimiser et mettre en œuvre le prochain projet sur la liste.

Pour démontrer la faisabilité de cette stratégie, la prochaine section présente une validation des étapes 2 et 3 en comparant les plans numériques initialement présentés aux entreprises et celui qui serait issu de la logique de la stratégie proposée. Les données utilisées pour cette comparaison proviennent des données récoltées lors des expériences dans les entreprises PME3 et PME8. Ces deux entreprises ont été sélectionnées au hasard parmi les 21.

7.1 Validation de la stratégie proposée

La Figure 7.1 présente les résultats de l'évaluation de la PME3. Cette dernière montre les forces et les opportunités d'amélioration spécifiques à cette entreprise. De cette figure, il est possible de noter que les faiblesses les plus grandes sont l'architecture numérique, le commerce électronique, la vision et la stratégie, la qualité des données, l'automatisation, la maîtrise des technologies, la gestion du changement, l'engagement et l'exemplarité et l'utilisation des données dans les opérations car chacune de ces pratiques d'affaires possède un score en-dessous de 2/4.

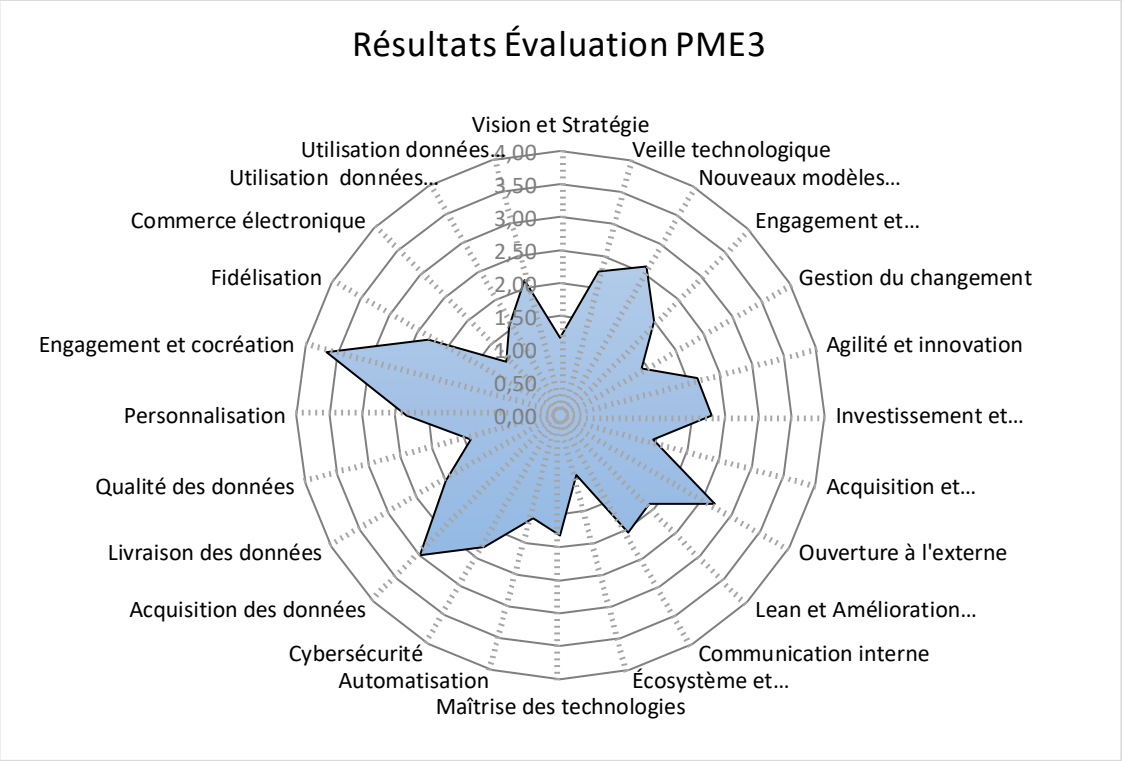


Figure 7.1 : Résultats de l'évaluation dans l'entreprise PME3

Après avoir pris connaissance de l'état actuel de l'entreprise étudiée, la stratégie proposée suggère de passer à l'étape de planification. Le Tableau 7.1 présente les priorités associées à chaque pratique d'affaires. Toutefois, afin de prioriser les projets numériques au sein d'un même niveau de priorité, il est nécessaire d'établir un lien entre

le niveau de priorité et la valeur de performance numérique reçue pour chaque pratique d'affaires.

Pour établir cette relation, une valeur située entre 1 et 4 est associée à chaque niveau de priorité du Tableau 7.1, où 1 est une priorité faible et 4 une priorité élevée. Ensuite, le rapport entre le niveau de priorité et la valeur de performance numérique associée à chaque pratique d'affaires fournit une valeur qui permet d'établir objectivement les priorités. À partir de ce calcul, le Tableau 7.3 présente les priorités des projets numériques de la PME3.

Tableau 7.3 : Priorités des projets numériques pour la PME3

Pratique d'affaires	**Score**	**Priorité**	**Priorité / Score**
Écosystème et architecture numérique	0,93	4	4,29
Commerce électronique	1,15	4	3,48
Vision et Stratégie	1,17	4	3,43
Qualité des données	1,40	4	2,86
Automatisation	1,62	4	2,47
Maîtrise des technologies	1,82	4	2,20
Gestion du changement	1,42	3	2,11
Engagement et exemplarité	2,00	4	2,00
Utilisation des données dans les opérations	1,55	3	1,94
Lean et Amélioration continue	1,90	3	1,58
Livraison des données	2,00	3	1,50
Utilisation données stratégiques	2,12	3	1,42
Agilité et innovation	2,15	3	1,40
Acquisition et développement de compétences	1,45	2	1,38
Cybersécurité	2,30	3	1,30
Personnalisation	2,33	3	1,29
Communication interne	2,05	2	0,98
Investissement et ressources disponibles	2,29	2	0,88
Orientation service et Fidélisation	2,30	2	0,87
Nouveaux modèles d'affaires	2,60	2	0,77
Acquisition des données	3,00	2	0,67
Veille technologique	2,25	1	0,44
Ouverture à l'externe	2,70	1	0,37
Engagement et cocréation	3,67	1	0,27

Le Tableau 7.4 présente ensuite une comparaison entre les projets proposés à la suite de l'intervention en entreprise et ceux qui seraient issus de la stratégie proposée, développée à partir des résultats du Tableau 7.3 et des recommandations du Tableau 7.2.

Tableau 7.4 : Comparaison des plans numériques PME3

Plan numérique présenté à l'entreprise			**Plan numérique de la stratégie proposée**			
No	Projet Numérique	Alternatives suggérées	No	Projet Numérique	Recommandations	Outils numériques
1	Centraliser les tâches et l'information dans un système **intégré** et approprié	Valider la pertinence et besoins associés au système ERP	1	Développer une architecture numérique	Valider la **pertinence des systèmes** Revoir les **besoins** technologiques Établir des **ponts** entre les systèmes Cartographier les systèmes utilisés	Ponts informatiques
2	Revoir la méthode de **communication**	**CRM**, Plateforme collaborative intégrée	2	Utiliser le commerce électronique	Développer une plateforme d'achat web Créer une relation de **proximité avec les clients**	e-Commerce, CRM
3	Automatiser la collecte de données pour assurer la **qualité de la donnée**	Système de traçabilité Automatisation de la consommation	3	Assurer la **Qualité de la donnée**	Assurer l'intégrité et l'**unicité** des données Développer des processus correctifs contre les altérations de données	
4	**Automatiser** le traitement de l'information	Système ERP Intelligence d'affaires Système MES	4	**Automatiser** les processus	Systèmes de transfert numérique de l'information Automatiser les tâches répétitives Système de notification en cas d'anomalie	ERP, MES, IoT, Robots, Cobots, IA
5	Mettre en place un système de **formation**	Système ERP, Système de gestion des connaissances, Plateforme collaborative	5	Maîtriser les technologies et Améliorer la Gestion du changement	Équipes lors de projets technologiques Fournir du soutien technique adéquat Développer une procédure de gestion du changement et un **système de formation**	
6	Restructurer les nomenclatures et la **connectivité** des systèmes	Restructuration des nomenclatures Revoir le système ERP	6	Démontrer un Engagement et une Exemplarité	Implanter des plans de contingence Impliquer les employés dans les processus d'innovation Définir le rôle des employés Développer un plan numérique concret	
7	Présenter l'information en temps réel	**Tableaux de bord en temps réel**	7	Maximiser l'Utilisation opérationnelle des données	Systèmes de mise à jour en **temps réel** Mettre à disposition des indicateurs de performance et **tableaux de bord** Mettre en place des systèmes de **traitement de la donnée** pour faciliter l'exécution des tâches opérationnelles	IoT, MES, Tableaux de bord, WMS, Planification

En premier lieu, lors des interventions, la vision et la stratégie étaient mises de l'avant avant même de présenter les projets numériques. Ceci explique alors pourquoi cette pratique d'affaires n'a pas été incluse dans le plan numérique.

Le Tableau 7.4 montre qu'il y a un niveau élevé de similitude entre les deux plans numériques. En effet, dans les deux plans, les projets suggérés touchent exactement les mêmes enjeux, à savoir ceux liés à l'intégration et la connectivité des systèmes (architecture numérique), à la relation client (commerce électronique et CRM), à la qualité des données, à l'automatisation des tâches administratives, de la collecte et du traitement des données, à la maîtrise des technologies et à l'exploitation des données.

Contrairement à ce qui a été dit plus tôt, il est possible de remarquer que sept projets sont proposés dans les plans numériques et non cinq. Ceci est dû au regroupement des projets 3, 4 et 6 (du plan de gauche) qui répondaient à un besoin prioritaire dans l'entreprise, soit *la collecte, le traitement et la diffusion de l'information en temps réel*. Ce projet s'appliquait notamment à plusieurs processus d'affaires tels que la gestion des ressources humaines, l'approvisionnement, la gestion de la production et la planification de la production. Du coup, au niveau de la mise en œuvre des projets, les priorités du Tableau 7.1 proposeraient de débuter les projets « collecte, traitement et diffusion de l'information » d'abord à la gestion et la planification de la production, puis à l'approvisionnement et ensuite, à la gestion de ressources humaines.

La similitude des résultats de ce premier exemple démontre bien la validité de la stratégie proposée. Il peut toutefois être intéressant d'utiliser un deuxième exemple pour assurer la robustesse de la démarche. La deuxième entreprise utilisée pour la validation de la stratégie est la PME8.

La Figure 7.2 présente les résultats de l'évaluation ainsi que les forces et les opportunités d'amélioration dans cette entreprise. De cette figure, il est possible de noter que les faiblesses les plus grandes (score < 2) sont la vision et la stratégie (VSN), la livraison des données (LIV), le commerce électronique (eCOM), la qualité des données (QLT),

l'orientation service et la fidélisation (FID), la personnalisation (PERS), l'architecture numérique (ÉCO), la cocréation (COCR), l'automatisation (AUTO), l'utilisation des données dans les opérations (UOP), l'acquisition et le développement de compétences (COMP), la gestion du changement (GCH), l'organisation du travail (LEAN) et l'utilisation des données dans la stratégie (UST).

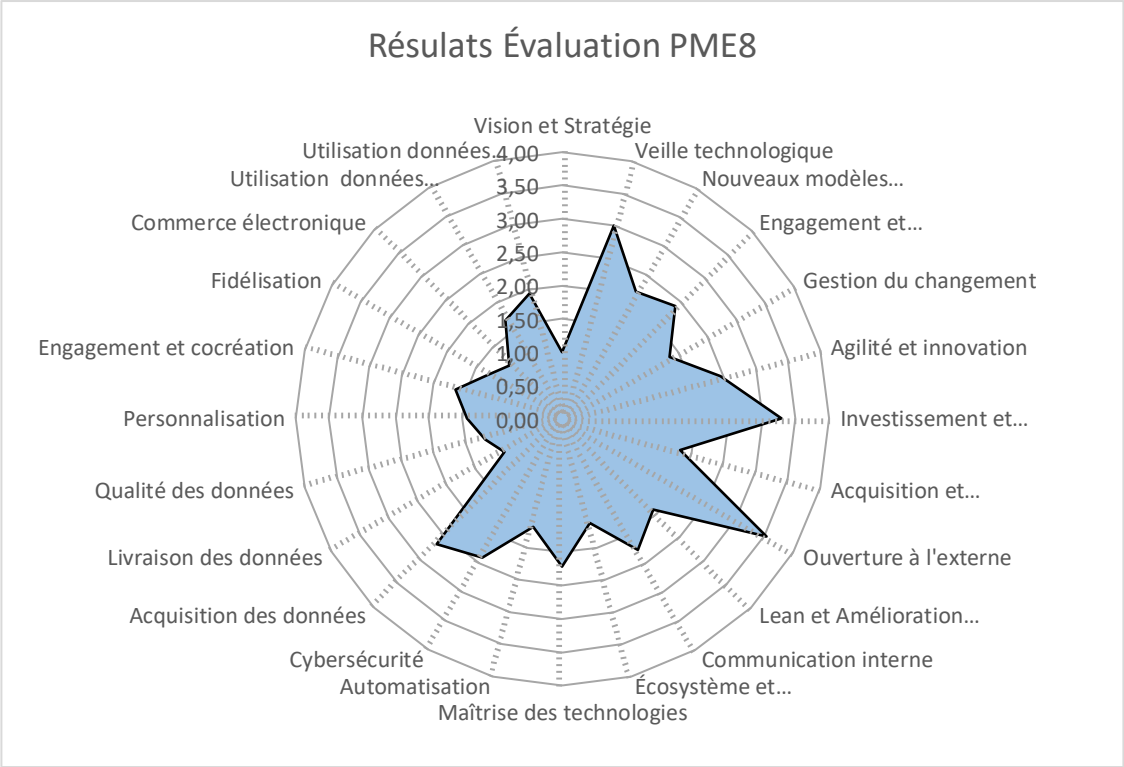


Figure 7.2 : Résultats de l'évaluation dans l'entreprise PME8

À partir de la méthode de priorisation présentée plus haut, le Tableau 7.5 présente les priorités des projets numériques de la PME8. Le Tableau 7.6 présente ensuite une comparaison entre les projets proposés à la suite de l'intervention en entreprise et ceux issus de la stratégie proposée.

Tableau 7.5 : Priorités des projets numériques pour la PME8

Pratique d'affaires	**Score**	**Priorité**	**Priorité / Score**
Vision et Stratégie	1,00	4	4,00
Commerce électronique*	1,13	4	3,56
Qualité des données	1,20	4	3,33
Livraison des données	1,00	3	3,00
Écosystème et architecture numérique	1,62	4	2,47
Automatisation	1,68	4	2,38
Personnalisation	1,43	3	2,11
Maîtrise des technologies	2,22	4	1,80
Utilisation des données dans les opérations	1,70	3	1,76
Engagement et exemplarité	2,40	4	1,67
Gestion du changement	1,86	3	1,61
Lean et Amélioration continue	1,93	3	1,55
Utilisation données stratégiques	1,94	3	1,55
Orientation service et Fidélisation	1,30	2	1,54
Cybersécurité	2,40	3	1,25
Agilité et innovation	2,45	3	1,22
Acquisition et développement de compétences	1,83	2	1,10
Nouveaux modèles d'affaires	2,20	2	0,91
Communication interne	2,28	2	0,88
Acquisition des données	2,67	2	0,75
Investissement et ressources disponibles	3,29	2	0,61
Cocréation	1,67	1	0,60
Veille technologique	3,00	1	0,33
Ouverture à l'externe	3,53	1	0,28

**Le commerce électronique avait été soulevé par l'entreprise comme non prioritaire et ne faisant pas partie du modèle d'affaires.*

Tableau 7.6 : Comparaison des plans numériques PME8

Plan numérique présenté à l'entreprise			**Plan numérique de la stratégie proposée**			
No	Projet Numérique	Alternatives suggérées	No	Projet Numérique	Recommandations	Outils numériques
1	Fluidifier l'information et assurer **l'intégrité de la donnée** par la revue / mise à jour du système ERP	Valider la pertinence du ERP Revoir les besoins technologiques Faire l'acquisition d'un nouveau système intégré	1	*Utiliser le commerce électronique*	*Développer une plateforme d'achat web* *Créer une relation de* ***proximité avec les clients***	*e-Commerce, CRM*
2	**Fournir l'information** pertinente à tous les départements	**Tableaux de bord** avec des KPI représentatifs Spécialiste en intelligence d'affaires (BI)	2	Assurer la **Qualité de la donnée**	Assurer l'intégrité des données Développer des processus correctifs contre les altérations de données Développer des alertes pour détecter les altérations de données	
3	Connecter les systèmes ensemble	Cartographier l'**architecture numérique** des systèmes utilisés Programmer des **ponts** informatiques Automatiser la collecte de données (IoT) Système d'exécution de la production (MES)	3	Optimiser la Livraison de la donnée	**Acheminer l'information** en temps réel et sans besoin de manipulation pour l'utiliser Développer et mettre en place des **tableaux de bord** en temps réel avec des indicateurs pertinents	ERP, MES Tableaux de bord dynamiques
4	*Synchroniser les activités de chaque département*	*Module de planification et d'ordonnancement dans le système ERP* *Revoir le calcul des charges* *Équilibrage des lignes*	4	Développer une **architecture numérique**	Valider la **pertinence des systèmes** Revoir les **besoins** technologiques Établir des **ponts** entre les systèmes Cartographier les systèmes utilisés	**Ponts** informatiques
5	Améliorer l'efficacité de l'atelier	**Automatiser** les tâches à non-valeur ajoutée (manipulation, manutention, entrée de données, inspections visuelles…) Utilisation de robots collaboratifs	5	**Automatiser** les processus	Systèmes de transfert numérique de l'information Automatiser les tâches répétitives Système de notification en cas d'anomalie	ERP, MES, IoT, Robots, Cobots, IA

Contrairement à ce qui a été démontré avec la PME3, il est possible de remarquer certaines différences entre les plans présentés au Tableau 7.6. La première différence touche le commerce électronique qui est présenté en première priorité au niveau du plan de droite alors que cette recommandation n'est pas du tout présente dans le plan de gauche. Ceci est principalement dû au fait que cette entreprise avait spécifié ne pas vouloir se lancer dans la vente en ligne. Cette dernière faisait affaires avec environ une vingtaine de gros clients et pour cette raison, ne cherchait pas à exploiter les bénéfices du commerce électronique. Dans une perspective où la mécanique de la stratégie proposée serait automatisée ou exploitée à l'aide d'une intelligence artificielle, il serait alors nécessaire de poser des questions préliminaires aux entreprises en relation à leur stratégie d'affaires.

Ensuite, le projet 4 du plan de gauche n'est lié à aucune pratique d'affaires à proprement parler. Cette recommandation était principalement issue d'une déconnexion entre les étapes de production causant des pertes de productivité importantes. Le désir de l'entreprise d'augmenter sa capacité de production a alors amené à cette recommandation. Ce besoin, bien qu'implicite, peut cependant être retrouvé dans le projet 5 du plan de droite, démontrant la cohérence entre les deux plans.

Pour les autres recommandations, il est possible de remarquer qu'il y a, encore une fois, un niveau élevé de similitude entre les deux plans numériques. Les projets suggérés touchent en effet les enjeux liés à l'intégration et la connectivité des systèmes (architecture numérique), à la qualité et la livraison des données et à l'automatisation des tâches, démontrant ainsi la robustesse de la stratégie proposée.

CHAPITRE 8
CONCLUSION

8.1 Synthèse et discussion

Il a été possible de voir dans cette thèse que le potentiel de l'Industrie 4.0 ne s'adresse pas uniquement à la grande entreprise, mais qu'une stratégie claire et le bon choix de pratiques d'affaires et d'outils numériques semblent mener à des gains de performance significatifs. La transformation numérique est aux portes de toutes les entreprises, petites, moyennes ou grandes. Les changements dans l'environnement concurrentiel et dans les habitudes et exigences des consommateurs forcent les entreprises à se revisiter et à révolutionner leurs paradigmes. La question de recherche, posée dès le premier chapitre, cherchait à comprendre la manière la plus efficiente d'amener les Petites et Moyennes Entreprises Manufacturières québécoises à transiger vers un environnement hautement numérique en fonction de leurs enjeux, leurs forces et leurs objectifs d'affaires. Pour répondre à cette question, il a été nécessaire de (1) démystifier la notion de l'Industrie 4.0 et y saisir son potentiel, (2) étudier la notion de PME pour identifier les forces, les faiblesses, les enjeux et les opportunités de ce type d'entreprise, (3) recenser les facteurs d'influence de la transformation numérique sous forme de pratiques d'affaires, de processus d'affaires et d'outils numériques et ce, dans l'objectif final (4) d'analyser l'effet de ces facteurs sur le succès de passage des PMEM au numérique.

Partant d'une logique liant la révolution étudiée, la cible, la méthode et l'indicateur de performance, il a été possible de proposer un modèle d'évaluation de la performance numérique, qui a par la suite pu être utilisé pour mener des expériences terrains. Comme il a été présenté en introduction, l'Industrie 4.0 représente la révolution étudiée; la PME manufacturière québécoise est la cible; la méthode de passage au 4.0 est la transformation numérique; et l'indicateur utilisé pour mesurer l'évolution des PMEM vers le 4.0 est la performance numérique. Cette logique a permis de développer une

structure de recherche claire qui lie de nombreuses notions autour du sujet de l'Industrie 4.0 et de comprendre les interrelations entre ces notions.

Tel que démontré au deuxième chapitre, l'Industrie 4.0 offre un potentiel intéressant grâce à la recherche d'interopérabilité, de virtualisation, de décentralisation, de capacité en temps réel, d'orientation service et de modularisation. Ces principes clés de l'Industrie 4.0, comme les nomment Hermann et al. (2015), peuvent être concrétisés à partir de technologies désormais intelligentes et connectées, ce qui leur permet de collecter, traiter, diffuser et échanger des données en temps réel. Grâce à ces technologies, de nouvelles capacités de surveillance, de contrôle, d'optimisation et d'automatisation sont maintenant accessibles aux entreprises. À la lumière de ces informations, l'Industrie 4.0 a pu être définie comme *l'utilisation des technologies numériques et des données en temps réel pour améliorer la prise de décision, l'efficacité et l'agilité dans les processus administratifs et opérationnels, tout en permettant la personnalisation de masse, tant au niveau des produits et des services offerts*.

L'étude des Petites et Moyennes Entreprises a ensuite montré qu'il existe plusieurs définitions dans la littérature, autant en termes quantitatifs que qualitatifs. Le manque de ressources financières et humaines, le manque de connaissances techniques et technologiques et l'absence de stratégie à long terme ont montré être les risques les plus répandus dans ce type d'entreprise. Leur flexibilité organisationnelle et opérationnelle, la proximité avec les clients, l'engagement de la direction, la culture familiale et la créativité omniprésente représentent néanmoins les forces à exploiter pour évoluer dans un environnement numérique. La revue des quelques études faites sur l'état des PMEM québécoises a permis de confirmer que ces entreprises sont bien à l'aube de la transformation numérique entre autres, en raison de l'absence de technologies numériques, de maîtrise de ces technologies et de considération du numérique dans la stratégie des entreprises. De nombreuses PME cherchent en effet à identifier le premier pas et les actions les plus payantes le plus rapidement possible dans leur réalité pour entreprendre les démarches de transformation numérique. Beaucoup d'études ont été

faites sur ce qu'est l'Industrie 4.0 mais peu ont néanmoins étudier comment mettre en œuvre cette révolution et quelles actions sont les plus pertinentes dans un contexte de PME.

La transformation numérique a alors été soulevée comme méthode d'introduction de l'Industrie 4.0 dans une entreprise. Il a été démontré que cette dernière est issue de deux catégories principales d'éléments à savoir : les outils numériques et les pratiques d'affaires. Les outils numériques représentent tout ce qui est technologique comme l'IoT, le Big Data et l'infonuagique. Les pratiques d'affaires quant à elles, représentent les moyens mis en œuvre par les entreprises pour améliorer leurs performances. Parmi ces moyens, il est possible de rappeler l'acquisition des compétences, la définition de la vision et de la stratégie, l'agilité, l'innovation, la mise en place d'un écosystème numérique, l'exploitation des données, etc. La mise en perspective des outils et des pratiques d'affaires a montré que tous ces éléments sont intimement liés, rappelant ainsi la difficulté des entreprises à identifier les éléments qui offriront les bénéfices les plus significatifs. Le HUB Institute propose une formule en cinq étapes pour exécuter une transformation numérique. Ces étapes sont l'audit, la planification, le test, le déploiement et le contrôle. Cet institut de recherche suggère également que (1) le leadership, (2) la culture et l'organisation, (3) la gestion des technologies, (4) la gestion des données, (5) le système de mesure et (6) l'expérience client soient les leviers les plus importants à considérer dans une telle démarche. À partir de la notion de performance organisationnelle, la performance numérique a pu être jumelée avec les idées du Hub Institute et de plusieurs autres auteurs de la littérature afin de proposer un modèle d'évaluation de la performance numérique. Ce modèle a donc été l'outil utilisé pour mesurer l'état d'avancement des entreprises vers le numérique et vérifier l'effet des différents facteurs d'influence sur cette performance. Finalement, afin d'éviter de noyer l'étude de la performance numérique dans différentes réalités, l'utilisation de la notion de chaîne de valeur de Porter a permis de proposer une démarche d'évaluation de la performance numérique en fonction des principaux processus d'affaires dans les entreprises. La prochaine étape était donc de tester le modèle directement sur le terrain.

Après avoir proposé un modèle d'évaluation de la performance numérique, un questionnaire initial a été développé en collaboration avec le MÉSI et quatre organisations partenaires (Productique Québec, STIQ, CRIQ et CEFRIO) à partir des sous-dimensions du modèle. Ce dernier a ensuite été testé dans 15 PMEM du Québec. Les commentaires recueillis ont permis de valider puis de finaliser le questionnaire et la démarche d'exécution des expériences. Les expériences finales ont par la suite été menées dans 21 autres PMEM. Ces 21 entreprises devaient, pour être sélectionnées, avoir en main une planification stratégique récente et démontrer un certain niveau de maturité organisationnelle pour être éligibles et bénéficier de la subvention du MÉSI. Par la suite, les expériences étaient menées en deux temps. La première étape consistait à envoyer les questionnaires directement aux entreprises, puis ensuite, des rencontres en personne ont été menées afin de nuancer les réponses aux questions. La démarche utilisée pour la deuxième partie était basée sur la méthode FIPEC. Ultimement, les données recueillies visaient à étudier trois hypothèses, soit que : (1) les pratiques d'affaires, (2) les processus d'affaires et (3) les outils numériques, ont un impact sur la performance numérique des entreprises et donc, sur le succès de leur transformation numérique.

À la suite des expériences, les informations récoltées ont été analysées en trois temps. La première analyse était de forme descriptive. Celle-ci a permis de dresser un portrait de la réalité des entreprises de l'échantillon et de comprendre leur état quant au numérique. Quatre niveaux ont permis d'illustrer la signification des valeurs de performance numérique, soit que les entreprises fonctionnent de façon (1) artisanale, (2) disciplinée, (3) intégrée ou (4) en temps réel. Cette analyse a d'abord démontré que les entreprises étudiées ont un niveau de performance numérique moyen de 2,18/4, les situant à un niveau discipliné, en voie d'atteindre un niveau intégré. La culture des entreprises est sortie comme la dimension la plus forte chez la plupart des entreprises. La gestion des données et l'expérience client sont, quant à eux, les dimensions les plus faibles chez les entreprises de l'échantillon. La veille technologique, l'agilité organisationnelle, l'innovation, le déploiement de ressources, l'ouverture à l'externe, la communication

interne, la sécurité informatique et l'acquisition des données, sont les pratiques d'affaires qui ont en moyenne, reçu des scores de performance numérique les plus élevés. Chacune de ces pratiques n'a toutefois pas reçu une valeur moyenne supérieure à 3/4 (niveau intégré), démontrant la distance séparant actuellement les entreprises de l'échantillon à un environnement complètement 4.0. D'un autre côté, les pratiques d'affaires les plus faibles numériquement dans les entreprises étudiées sont la vision et la stratégie, le développement d'une architecture numérique, l'automatisation, la livraison et la qualité des données et l'utilisation du commerce électronique. Par processus d'affaires, l'étude a montré que les processus de ventes, de gestion des TI et la qualité et l'amélioration continue sont les processus d'affaires les plus performants numériquement, alors que la gestion de la production, le service client, la maintenance et la gestion des RH sont les processus d'affaires les moins supportés par les technologies numériques. Enfin, l'analyse descriptive a montré que peu d'outils associés à l'Industrie 4.0 sont actuellement utilisés et maîtrisés dans les entreprises de l'échantillon. En effet, les logiciels de conception et fabrication assistés par ordinateur, les technologies de cybersécurité, les systèmes ERP et les médias sociaux sont utilisés dans environ 50 % des cas alors que les autres technologies numériques telles que l'Internet des Objets, l'infonuagique, le Big Data, l'Intelligence artificielle et la robotique collaborative sont très peu utilisées dans les entreprises de l'échantillon.

Une analyse statistique a par la suite permis d'étudier les trois hypothèses de la recherche selon que les pratiques d'affaires, les processus d'affaires et les outils numériques semblent avoir des impacts positifs sur le passage au numérique des entreprises. Des tests d'hypothèse sur des moyennes ont montré que la vision et la stratégie, l'engagement et l'exemplarité de toute l'entreprise, la gestion du changement, l'agilité et l'innovation, l'usage du *lean* et de l'amélioration continue, le développement d'une architecture numérique, la maîtrise des outils numériques en place, l'automatisation, la sécurité informatique, la livraison et la qualité des données, la capacité de personnalisation, le commerce électronique et l'exploitation des données sont les pratiques d'affaires qui tendent à offrir un réel potentiel significatif pour la mise

en œuvre d'une transformation numérique. Les résultats des tests d'hypothèse ont également démontré que les processus de direction, ventes, développement et ingénierie, planification de la production, gestion de la production, distribution, service client, gestion des TI et comptabilité sont les processus d'affaires qui, lorsque supportés numériquement, tendent à offrir le plus grand potentiel d'amélioration de la performance numérique. Enfin, l'analyse statistique de l'effet des outils numériques a démontré que l'utilisation de systèmes ERP, de systèmes de gestion de la production et le commerce électronique semblent améliorer significativement le passage au numérique des entreprises. Les autres outils étudiés n'ont pas montré avoir d'impact significatif, surtout en raison de leur faible présence dans les entreprises de l'échantillon.

Ensuite, une analyse comparative par partitionnement de données a permis de générer trois groupes d'entreprises distincts. Des tests d'hypothèses sur les pratiques d'affaires, sur les processus d'affaires et sur les outils numériques utilisés, ont démontré plusieurs différences significatives et tendances qui distinguent ces trois groupes. L'étude du coefficient de variation a également permis de montrer les similitudes à l'intérieur des groupes. De plus, une étude sur les corrélations entre les pratiques d'affaires a permis de générer quatre groupements. Le premier groupement semblait être composé des pratiques d'affaires liées à la direction, à la stratégie et à la personnalisation de masse. Le second groupement était quant à lui, composé de pratiques d'affaires liées à la culture interne, aux méthodes de travail et à l'utilisation des données. Le troisième était principalement composé de pratiques d'affaires liées à la bonne gestion des données et finalement, le quatrième groupement était composé de la pratique d'affaires nommée « cocréation ». Parmi les trois groupes d'entreprises formés par le partitionnement de données, le premier groupe a montré ne pas se concentrer sur aucun des quatre groupements de pratiques d'affaires. Le deuxième groupe quant à lui, était composé d'entreprises relativement avancées au niveau de la transformation numérique et était performant dans les trois premiers groupements de pratiques d'affaires. Enfin, le troisième groupe d'entreprises a montré avoir tendance à se concentrer davantage sur le deuxième groupement.

Une étude sur la récurrence des besoins numériques exprimés par les entreprises a permis de faire ressortir que les systèmes ERP, les systèmes de gestion de la production et les tableaux de bord semblent représenter les outils numériques avec des gains espérés les plus élevés selon les enjeux et objectifs d'affaires des entreprises. Les plateformes de collaboration et de gestion de connaissances, les modules de planification de la production, les technologies de l'Internet des Objets et les systèmes de la gestion de la relation client, ont également ressorti comme des besoins dans plus de 25 % des entreprises rencontrées. Ces résultats ont donc amené à la constatation que les entreprises semblent vivre des besoins davantage orientés vers la collecte, le traitement et la diffusion de la donnée, bien plus que vers l'automatisation des processus de production, ramenant alors à l'idée que l'Industrie 4.0 dans la PME est principalement orientée vers la gestion et la valorisation de la donnée en temps réel afin d'améliorer la prise de décision et la performance des entreprises.

Enfin, le développement d'une stratégie efficiente de passage à l'Industrie 4.0 a été proposée à partir des résultats des tests d'hypothèse et de la récurrence des recommandations et a permis de répondre à l'objectif de la recherche. Quatre niveaux de priorités ont été déterminés, soit : essentiel, prioritaire, non prioritaire et cas particulier. Cette stratégie s'exécute en six étapes, commençant par (1) le développement d'une planification stratégique et l'exécution d'une cartographie de la chaîne de valeur, suivi de (2) l'évaluation de la performance numérique, puis de (3) la planification des projets numériques, (4) de la mise en œuvre à petite échelle, (5) du déploiement et (6) de l'optimisation. La comparaison des plans numériques issus de la stratégie proposée et de ceux présentés aux entreprises lors des interventions (expériences) a permis de valider la mécanique et la robustesse de la stratégie.

8.2 Principales contributions scientifiques

La contribution majeure de cette recherche exploratoire (Theory building) est de mettre la base d'une nouvelle théorie concernant la migration des PMEM vers l'industrie 4.0. Les PME manufacturières québécoises ne semblent être qu'au début de leur démarche

de transformation numérique, surtout expliqué par des ressources et connaissances limitées, l'absence d'une architecture numérique intégrée – menant à des pertes d'information, manque de temps d'analyse, duplication de données et multiplication des erreurs, l'abondance de données et l'absence d'information pertinente due au manque d'indicateurs de performance et de système de communication en temps réel. Elles réalisent néanmoins l'importance associée à l'exploitation et la valorisation de la donnée. La planification stratégique, l'organisation du travail, l'agilité organisationnelle et l'innovation ont également démontré être prioritaires pour réussir sa transformation numérique. De ce fait, à la question : « *Comment les PME manufacturières québécoises peuvent-elles évoluer vers un environnement « 4.0 » de façon efficiente ?* », les variables démontrées significatives ont permis de développer la stratégie proposée au chapitre 7 et présente ainsi une démarche claire pour aider les PME manufacturières à atteindre le niveau de l'Industrie 4.0.

De plus, les résultats et les tendances présentés dans l'analyse ont montré avoir une pertinence élevée tant au niveau académique que pratique. La recherche a permis d'expliquer l'état des entreprises québécoises quant à leur transformation numérique, de présenter des tendances et des différences entre les entreprises et de proposer une stratégie de passage à l'Industrie 4.0 en fonction de tests statistiques et d'une démarche par recherche-action effectuée dans un domaine en pleine émergence. La structure de la revue de littérature, le modèle de performance numérique proposé, l'étude terrain dans 21 entreprises, les résultats des tests d'hypothèses et la stratégie proposée pourraient éventuellement être utilisés pour développer une intelligence artificielle qui exploiterait les données de la performance numérique des entreprises et proposerait un plan sur mesure pour chaque entreprise. Ayant été démontrés significatifs, ces plans pourraient aider de nombreuses PME québécoises à engager la transformation numérique de la manière la plus efficiente possible. Au début de cette recherche, les PME se demandaient ce qu'était l'Industrie 4.0. Trois ans plus tard, ces mêmes PME se demandent maintenant comment aller vers l'Industrie 4.0. Ce constat montre alors l'impact majeur qu'a amené cette thèse au niveau de l'industrie québécoise.

8.3 Limitations de la recherche, perspectives et conclusion

En conclusion, l'objectif de la recherche a été atteint. La stratégie de passage au 4.0 a été validée et permettra d'aider les PME manufacturières québécoises à entamer leur transformation numérique.

Au niveau des limitations de la recherche, il est important de noter que cette étude a été faite dans une période où les PME manufacturières québécoises entraient dans l'ère de l'Industrie 4.0, d'où l'absence de l'utilisation de plusieurs technologies et pratiques d'affaires associées à cette révolution. L'expertise autour de ce sujet émergent croît de jour en jour et une extension de l'exercice avec plus d'entreprises, désormais plus familières avec l'Industrie 4.0, permettrait par exemple d'étendre la méthodologie dans d'autres secteurs d'activités tels que la logistique et les services et éventuellement de comparer des régions administratives, des pays et autres. Il pourrait également être possible d'augmenter l'analyse par partitionnement de données et générer des stratégies adaptées à différents groupes en fonction de leurs similitudes. Ensuite, une comparaison entre les résultats du modèle utilisé et les autres modèles de la littérature, serait également pertinente afin de faire ressortir les forces et les faiblesses de chaque modèle et possiblement, proposer un modèle encore plus adapté pour l'industrie. L'étude des 21 entreprises a toutefois démontré une pertinence élevée, une convergence au niveau de nombreux éléments et représente assez bien ce qui était attendu des résultats.

Dû au contexte dans lequel la recherche a été faite (Theory Building) les critères de sélection des entreprises exigés par le ministère, représentent une limite dans la recherche puisqu'elle a forcé une certaine homogénéité entre les entreprises. Les résultats ont néanmoins montré une grande pertinence, surtout au niveau des plans numériques qui ont été fournis aux entreprises. Maintenant que ces plans ont été mis en place, la prochaine étape pourrait être d'aller évaluer l'impact des plans numériques dans les entreprises qui ont participé à l'étude par une étude longitudinale. Ceci permettrait d'offrir une compréhension encore plus complète de la transformation numérique dans la

PME manufacturière et de l'effet des outils du 4.0 sur la performance numérique de ces entreprises.

Pour rappeler les dires de Sommer (2015) qui affirmait que les PME n'étaient pas prêtes à aller vers l'Industrie 4.0 et que cette révolution ne fait qu'encourager la grande entreprise certes, les PME manufacturières québécoises ne sont qu'au début de la transition numérique. Leur volonté à comprendre et maîtriser le 4.0 offre néanmoins un espoir pour le futur de ces entreprises. Leur flexibilité, leur agilité, leur créativité et leur culture sont des forces qui leur offrent un avantage significatif.

L'étude actuelle a permis d'identifier une méthode claire de passage au 4.0 à partir d'actions qui semblent offrir un impact significatif sur la performance des entreprises, ciblant les pratiques d'affaires, les processus d'affaires et les outils numériques les plus pertinents en fonction des différentes réalités. Cette hiérarchisation permettra en ce sens aux entrepreneurs ainsi qu'aux chercheurs d'orienter les efforts là où les gains sont les plus intéressants et permettra ainsi d'avancer de façon plus efficiente vers l'Industrie 4.0.

Les perspectives qui ressortent de ce travail semblent offrir des solutions pertinentes et adaptées tant pour l'industrie que pour le milieu académique. Il sera intéressant d'approfondir cette démarche afin de continuellement bonifier le modèle proposé et le rendre toujours plus pertinent et toujours plus adapté pour un marché en continuel mouvement.

« *Aujourd'hui, dans un Québec de plus en plus numérique, ce ne sont plus les gros qui mangent les petits; ce sont les vites qui mangent les lents*[2]. »

[2] Un merci spécial à mon nouvel employeur pour cette phrase accrocheuse qui exprime rapidement et simplement l'essence de l'Industrie 4.0 et l'importance de l'agilité et de l'adaptabilité dans un monde en continuel mouvement. C'est celui qui s'adapte qui survie, pas le plus fort ni le plus grand.

LISTE DES RÉFÉRENCES

Abdul-Nour, G., Drolet, J. et Lambert, S. (1999) *Mixed production, flexibility and SME.* Computers & Industrial Engineering 37 (1999) 429-432

AFUL (2017) Définition de l'interopérabilité. [En ligne], consulté le 27 mars 2017, <http://definition-interoperabilite.info/>

Avasant (2016) *Digital Enterprise Transformation: Rebooting Business Services for the New Global Economy*. CreateSpace Independent Publishing Platform. ISBN 978-1514704066

Bagheri, B., Yang, S., Kao, H.-A. et Lee, J. (2015) *Cyber-physical Systems Architecture for Self-aware machines in industry 4.0 environment*. IFAC- PapersOnLine 48-3 (2015) 1622–1627 <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896315005571>

Barney, J. B., (1991) *Firm Resources and Sustained Competitive Advantage*. Journal of Management, Vol. 17, No. 1, 1991, pp. 99–120

Barney, J.B. (2001). *Is the Resource-Based View a Useful Perspective for Strategic Management Research?* Academy of Management Review. **26** (1): 101. doi:10.5465/AMR.2001.4011938

Barrett, J. (2015) *The Internet of Things - Where the Web and the Physical world will meet* https://www.youtube.com/watch?v=QaTIt1C5R-M. *Based on Jain et Jain (2015)*

Barzi, R. (2011). *PME et agilité organisationnelle : étude exploratoire.* Innovations, 35, (2), 29-45. doi:10.3917/inno.035.0029.

BCG The Boston Consulting Group (2015) *Industry 4.0. The future of productivity and growth in manufacturing industries*. Avril 2015. [En ligne], consulté le 4 juin 2018 <https://www.zvw.de/media.media.72e472fb-1698-4a15-8858-344351c8902f.original.pdf>

BDC, *Planification stratégique*, [En ligne], consulté le 4 juin 2018, <https://www.bdc.ca/fr/consultation/pages/planification-strategique.aspx>

Bendis, R.A. (2004) *Technology-based economic development*. Defense Related SME's: Analysis and description of current conditions. F.D. Carvalho (Ed.) IOS Press, 2004

Blanchet, M. (2016) *Industrie 4.0, Nouvelle donne industrielle, nouveau modèle économique*. Lignes de repères. ISBN 978-2-36609-043-7

Caggiano, A., Caiazzo, F. et Teti, R. (2015) *Digital Factory Approach for Flexible and Efficient Manufacturing Systems in the Aerospace Industry*. Procedia CIRP 37: 122–127. doi:10.1016/j.procir.2015.08.015

Caggiano, A., et R. Teti, R. 2013. *Modelling, Analysis and Improvement of Mass and Small Batch Production through Advanced Simulation Tools*. Procedia CIRP 12: 426–431. doi:10.1016/j.procir.2013.09.073

Caldeira, M. M. et Ward, J. M. (2003) *Using resource-based theory to interpret the successful adoption and use of information systems and technology in manufacturing small and medium-sidez enterprises*. European Journal of Information System. Volume 12, pp. 127-141

CEFRIO (2011) *De la formation à l'amélioration continue : Une approche pour la PME manufacturière*. Rapport de recherche, Mars 2011

CEFRIO (2016) *Prendre part à la révolution manufacturière? Du rattrapage technologique à l'industrie 4.0 chez les PME*. Numérique et Entreprise. [En ligne] consulté le 11 mars 2017, <http://www.cefrio.qc.ca/publications/numerique-entreprise/industrie4-0-chez-les-pme-du-quebec/>

CEFRIO (2017) *Portrait des pratiques numériques des entreprises manufacturières de la région de la capitale-nationale*. Québec International. ISBN : 978-2-923852-75-1

CGI (2016) *Industrie 4.0. Pour une entreprise hautement concurrentielle*. [En ligne], consulté le 4 juin 2018, <https://www.cgi.com/sites/default/files/white-papers/manufacturing_industry-4_white-paper-fr.pdf>

Chelli H. (2003), *Urbaniser l'entreprise et son système d'information – Guide des entreprise agiles*, Ed. Vuibert.

Cigref (2015) *L'agilité dans l'entreprise. Modèle de maturité*. Octobre 2015. [En ligne], consulté le 4 juin 2018, <http://www.cigref.fr/wp/wp-content/uploads/2015/11/CIGREF-2015-Agilite-dans-l-entreprise-Modele-de-Maturite.pdf>

Club MES (2017) *Livre blanc. Le MES au cœur du processus de planification.* [En ligne], consulté le 2 mai 2019, <https://www.club-mes.org/antoine/supports/Club_MES_Le_MES_et_planification.pdf>

Crocitto, M. et Youssef, M. (2003). *The human side of organizational agility*. Industrial Management & Data Systems, 103(6): 388.

Cyber-Physical Systems. (2012). [En ligne] <http://cyberphysicalsystems.org>

Douglas, L. (2012) *The Importance of 'Big Data': A Definition*. Gartner. Retrieved 21 June 2012

Ducrey, V. et Vivier, E. (HUB Institute) (2017) *Le guide de la transformation digitale*. Eyrolles, Hub Management, pp. 328.

Dworscak, B. et Zaiser, H. (2014) *Competences for Cyber physical Systems in Manufacturing First Findings and Scenarios*. Procedia CIRP, Volume 25, pp. 345-350

Eisenhardt, K. M. (1989). *Making fast strategic decisions in high-velocity environments.* Academy of Management Journal, 32(3): 543-576.

Ferrante, G. (2006) *25 ans d'agilité organisationnelle : clarification et opérationnalisation du construit*. Thèse de doctorat, Université Grenoble Alpes. Sciences de la gestion, 7 août 2006.

Fritscher, M., Lilge, C., Heider, S., Rivera, D. L., Krauss, M. et Schilling, K. (2018) *QoS for industriel telemaintenance*. Proceedings of IFAC, 51-10 (2018), 181-186.

Gamache, S., Abdulnour, G. et Baril, C. (2016) Industrie 4.0 dans les PME québécoises : Bilan et premiers constats. 12th International Conference on Industrial Engineering

Gamache, S. et Abdul-Nour, G. (2018) *Étude du potentiel de l'Industrie 4.0 quant à la transformation de la PME manufacturière québécoise : Une analyse littéraire et expérimentale*

Gamache, S., Abdul-Nour, G. et Baril, C. (2017) *Toward Industry 4.0: Studies and practices in Quebec SMEs*. CIE47 Proceedings, 11-13 October 2017, Lisbon / Portugal

Gartner Press Release (2011). *Gartner Says Solving 'Big Data' Challenge Involves More Than Just Managing Volumes of Data,* Retrieve June 27, 2011 from http://www.gartner.com/newsroom/id/1731916Ghobakhloo, M. (2018) The future of manufacturing industry: a strategic roadmap toward Industry 4.0. Journal of Manufacturing Technology Management, Vol. 29, Numéro 6. pp. 910-936

Gimélec (2014) *Industrie 4.0. Les leviers de la transformation*. [En ligne], consulté le 4 juin 2018 <http://www.gospi.fr/IMG/pdf/industrie_4.0_les_leviers _de_la_transformation2014-gimelec-min.pdf>

Goldman, S. L. (1994), *Agile competition and virtual corporations*, National Forum, 74 (2), 43-49.

Hao, Y. et Helo, P. (2015) *The role of wearable devices in meeting the needs of cloud manufacturing A case study.* Robotics and Computer-Integrated Manufacturing

Hermann, M., Pentek, T. et Otto, B. (2015) *Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios*, Business Engineering Institute St. Gallen, Lukasstr. 4, CH-9008 St. Gallen. accessed on 4 May 2016

Herterich, M., Uebernickel, F. et Brenner, W. (2015) *The Impact of Cyber physical Systems on Industrial Services in Manufacturing.* Procedia CIRP, Volume 30, pp. 323-328

Hess et al. (2016) Options for formulating a Digital Transformation Strategy. MIS Quaterly Executive. Juin 2016. 15,2.

Hilbert, M. (2015) *Big Data for Development: A Review of Promises and Challenges.* Development Policy Review. http://onlinelibrary.wiley.com/journal/10.1111/%28ISSN %291467-7679

Huang, H. et Cullen, J. B. (2001) *Labour flexibility and related HRM practices : A study of large Taiwanese manufacturers*. Revue Canadienne des sciences de l'administration, vol. 18, no. 1. P. 33-39

Impuls (2016) *Industry 4.0 Readiness.* [En ligne], consulté le 11 mars 2017, <https://www.industrie40-readiness.de/?lang=en>

Institut de la Statistique du Québec (2018) *Résultat de l'Enquête sur la population active du Québec* [En ligne], consulté le 17 septembre 2018. <http://www.stat.gouv.qc.ca/statistiques/travail-remuneration/resultats-epa-201808.pdf>

Jacquet, S. (2011) *Management de la performance: des concepts aux outils*, GREG, http:// www.creg.ac-versailles.fr/des-concepts-aux-outils

Jain, V. et Jain, R. (2015) *The Internet of things – Where the Web and the Physical world will meet*. International Journal of Computer Science and Information Technologies. Vol. 6 (1), pp 724-727. ISSN : 0975-9646

Jobin, M.-H. et Lagacé, D. (2014) L*a démarche lean en santé et services sociaux au Québec : Comment mesurer la maturité?* Dans Gestion, Automne 2014, Volume 39, Numéro 3. pp. 116

Kagermann, H., Wahlster, W. et Helbig, J. (2013) *Recommendations for implementing the strategic initiative Industrie 4.0: Final report of the Industrie 4.0 Working Group*

Khodkari, H. et Maghrebi, S.G. (2016) *Neccessity of the integration of Internet of Things and Clous services with quality of service assurance approach*. Bulletin de la Société Royale des Sciences de Liège, Vol. 85, 2016, p. 434 - 445

Kohler, D. et Weisz, J.-D. (2016) *Industrie 4.0 – Les défis de la transformation numérique du modèle industriel allemand.* La documentation française, France, ISBN : 978-2-11-010210-2

Kohli, R. et Grover, V. (2008) *Business value of IT : An essay on expanding research directions ton keep up with the Times*. Journal of the Association for Information Systems. Volume 9, no. 1. Article 2. Pp. 23-29, Janvier 2008

Lawell, M. (2015) *Industry 4.0 vs. the Industrial Internet. A Primer* <http://www.industryweek.com/information-technology/industry-40-vs-industrial-internet-primer>

LeBigData.fr 2016. *Définition. Qu'est-ce que le Big Data* <http://www.lebigdata.fr/definition-big-data>

Lee, J. (2014) S*ervice Innovation and Smart Analytics for Industry 4-0 and Big Data Environment.* Procedia CIRP, Volume 16, pp. 3-8

Little, A. D. (2017) *Digital Lean Management – Unlock potential and achieve next performance levels* <www.adl.com/digitallean>

Lin, C.-T., Chiu, H., et Tseng, Y.-H. (2006) *Agility evaluation using fuzzy logic*. International Journal of Production Economics, 101(2): 353-368

Liu, J. W. S. (2000) *Real-Time Systems.* Prentice Hall, 1ère Édition. ISBN : 0130996513

Lueth, K.L. (2015) *Will the industrial internet disrupt the smart factory of the future?* <https://iot-analytics.com/industrial-internet-disrupt-smart-factory/>

Luo, X., Li, W, Tu, Y. Xue, D. et Tang, J. (2011) *Operator Allocation Planning for Reconfigurable Production Line in One-of-a-Kind Production.* International Journal of Production Research 49: 689–705. doi:10.1080/00207540903555486.

Man, T.W.Y., Lau, T. et Chan, K.F. (2002) *The competitiveness of small and medium enterprises a conceptualization with focus on entrepreneurial competencies*, Journal of Business Venturing 17, pp. 123–142.

Mattern, F. et Floerkemeier, C. (2010) *From the Internet of Computers to the Internet of Things*, Systems Group, Institute of Pervasive Computing <http://www.vs.inf.ethz.ch/publ/papers/Internet-of-things.pdf>

Mattern, F. et Florkemeier, C. (2010) *Vom Internet der Computer*. Haubtbeitrag / Internet Der Dinge

McKinsey Digital (2015) I*ndustry 4.0. How to navigate digitization of the manufacturing sector*. McKinsey&Compagny

Miles, R. E. and Snow, C. C. (1978) *Organizational Strategy, Structure, and Process*. New York: McGraw-Hill, 1978.

Ministère de l'Économie, de la Science et de l'Innovation (MESI) (2017) *Industrie 4.0. Enquête auprès des entreprises manufacturières du Québec*. Juin 2017. Gouvernement du Québec.

Ministère de l'Économie, de la Science et de l'Innovation (MESI) (2016) *Plan d'action en économie numérique.* Stratégie numérique du Québec. Gouvernement du Québec 2016. Bibliothèque et Archives nationales du Québec. ISBN : 978-2-550-75695-8 (PDF)

Mœuf A. (2018) *The industrial management of SMEs in the era of Industry 4.* International Journal of Production Research. Volume 56. Numéro 3

Moeuf, A. (2018) *Identification des risques, opportunités et facteurs critiques de succès de l'industrie 4.0 pour la performance industrielle des PME*. Thèse de doctorat de l'Université Paris-Saclay, avril 2018.

Nagel, R. N. et Dove, R. (1991. *21st Century Manufacturing Enterprise Strategy: An Industry-Led View*, Vol. 1: 58.

Nature (2008) *Community cleverness required*. Nature. Vol. 455, No. 7209 doi: 10.1038 / 455001a.

Nijssen, M. et Paauwe, J. (2012) *HRM in turbulent times: how to achieve organizational agility?*The International Journal of Human Resource Management. Vol. 23, No. 16, Septembre 2012, 3315-3335

Oliver, C. 1991. *Strategic responses to institutional processes*. Academy of Management Review, 16(1): 145-179.

Ooreka (2017) *Définition traçabilité*, [En ligne], consulté le 14 août 2018. <https://rfid.ooreka.fr/comprendre/definition-tracabilite>

Organisation de Coopération et de Développement Économiques (OCDE) (2004) *Les statistiques sur les PME : Vers une mesure statistique plus systématique du comportement des PME*. 2ème conférence de l'OCDE des ministres en charges des petites et moyennes entreprises *(PME)*. Istanbul, Turquie, juin 2004

Pelletier, C. (2018) *Présentation sur l'industrie 4.0*. Travaux fondés sur Baltzan et Welsh (2015) et Laudon et Laudon (2016). Chambre de commerces et d'industries de Trois-Rivières. Mars 2018.

Pinel, M. (2013) *L'introduction de la gestion du cycle de vie produit dans les entreprises de sous-traitance comme vecteur d'agilité opérationnelle et de maîtrise du produit.* Gestion et management. Université de Grenoble, 2013. Français.

PLM Portal (2015) *PLM as enabler for industry 4.0*, [En ligne], consulté le 27 mars 2017, <http://www.plmportal.org/en/ntt-data-plm-as-enabler-for-industry-4-0.html>

Poka (2017) *Des outils modernes pour l'industrie modern*. [En ligne], consulté le 23 février 2017 <https://www.poka.io/fr>

Porter, M. E. (1979) *How Competitive Forces Shape Strategy*, Harvard Business Review, mars-avril 1979, p. 137-145

Porter, M. (2008) *Competitive Advantage: Creating and Sustaining Superior Performance.* Simon and Schuster, ISBN: 1416595848

Porter, M. E. et Heppelmann, J. L. (2014) *How smart, connected products are transforming competition*. Harvard Business Review, volume 65. Novembre 2014

Prahalad, C. K., et Hamel, G. (1990) *The Core Competence of the Corporation*. Harvard Business Review, 68(3): 79-91.

Productique Québec. 2016. *Feuille de route Industrie 4.0*. Québec, Canada

Qin, J., Liu, W. et Grosvenor, R. (2016) A categorical Framework of Manufacturing for Industry 4.0 and Beyond. Procedia CIRP 52. 173-178

Raymond, L. et Croteau, A.-M., (2009) *Manufacturing strategy and business strategy in medium-sized enterprises: Performance effects of strategic alignment*. IEEE Transactions on engineering management, Vol. 56. No. 2. Mai 2009.

Roy, M., Audet, M. (2002) *La transformation vers de nouvelles formes d'organisation plus flexibles : un cadre de référence*, Gestion 2002/4 (Vol. 27), p. 43-49. DOI 10.3917/riges.274.0043

Sangmahachai, K. (2015) *Revolution to Industry 4.0*. Kasetsart Energy and Technology Management Center

Schulza, L., Behling, S. et Buhrs, S. (2008) *Automated guided vehicle systems : a driver for increased business performance*. Proceedings of the International Multiconference of Engineers and computer scientists. Vol. 2, IMECS 2008, 19-21 March, 2008, Hong Kong

Schwab, K. (2016) The fourth industrial revolution. World Economic Forum. Portfolio Penguin

Sharifi, H., Colquhoun, G., Barclay, I., et Dann, Z. (2001) *Agile manufacturing: a management and operational framework*. Proceedings of the Institution of Mechanical

Engineers -- Part B -- Engineering Manufacture (Professional Engineering Publishing), 215(6): 857-869.

Sharifi, H., et Zhang, Z. (1999) *A methodology for achieving agility in manufacturing organisations: An introduction*. International Journal of Production Economics, 62(1/2): 7-22.

Simard, G., Chênevert, D. et Tremblay, M. (2000) *Les déterminants organisationnels et individuels de l'emploi atypique : le cas du cumul d'emplois et du travail autonome*. Cirano, Montréal, juillet 2000s-25.

Sommer, L. (2015) *Industrial Revolution - Industry 4.0. Are German Manufacturing SMEs.* Journal of Industrial Engineering and Management, Volume 8, Numéro 5, pp. 1512-1532

Statistique Canada (2015), *Registre des entreprises*, décembre 2015. https://www.ic.gc.ca/eic/site/061.nsf/fra/h_03018.html

Tan, L. et Wang, L. (2010) *Future Internet : The Internet of Things*. 3rd Conference on Advanced Computer Theory and Engineering (ICACTE)

Teece, D. J., Pisano, G., et Shuen, A. (1997) *Dynamic capabilities and strategic management*. Strategic Management Journal, 18(7): 509-533.

Tian, W. et Zhao, Y. (2014) *Big Data Technologies and Cloud Computing* (PDF). Optimized Cloud Resource Management and Scheduling. Elsevier SciTech Connect. ISBN: 978-0-12-801476-9

Tortorella, G. L. et Fettermann, D. (2018) *Implementation of Industry 4.0 and lean production in Brazilian manufacturing companies*, International Journal of Production Research, 56:8, 2975-2987, DOI: 10.1080/00207543.2017.1391420

Vermasen, O. et Friess, P. (2013) *Internet of Things - Converging Technologies for Smart Environment and integrated ecosystems*. River Publisher. http://www.internet-of-things-research.eu/pdf/Converging_Technologies_for_Smart_Environments_and_Integrated_Ecosystems_IERC_Book_Open_Access_2013.pdf

Veza, I., Mladineo, M. et Gjeldum, N. (2015) *Managing Innovative Production Network of Smart Factories.* IFAC-PapersOnLine 48: 555–560. doi:10.1016/j.ifacol.2015.06.139.

Weinman, F. (2015) *Digital Disciplines: Attaining Market Leadership via the Cloud, Big Data, Social, Mobile, and the Internet of Things*. Wiley. ISBN 978-1118995396

Weyer, S., Schmitt, M., Ohmer, M. et Gorecky, D. (2015) *Towards Industry 4.0 – Standardization as the crucial challenge for highly modular multi-vendor production systems*. Proceedings of IFAC 48-3, pp. 579-584

World Economic Forum (2019) Fourth Industrial Revolution. Beacons of Technology and Innovation in Manufacturing. White Paper. Janvier 2019.

Wu, D. Rosen, D.W., Wang, L. et Schaefer, D. (2014) *Cloud-Based Manufacturing: Old Wine in New Bottles?* Procedia CIRP 17 (2014) 94 – 99

Xu, X. (2011) *From Cloud Computing to Cloud Manufacturing*. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing 28 (2012) 75–86

Yu, C., Xu, C. et Lu, Y. (2015) *Computer-Integrated Manufacturing, Cyber-Physical Systems*. Manufacturing Letters, Volume 6, pp. 5-9

Zaheer, A., et Zaheer, S. (1997) *Catching the Wave: Alertness, Responsiveness, and the Market Influence in Global Electronic Networks*. Management Science, 43(11): 1493-1509.

Zaied, R. M B., Affes, H. et Hikkerova, L. (2015) *Sources externes de connaissances, Innovation organisationnelle et Performance organisationnelle*, Gestion 2000 2015/5 (Volume 32), p. 81-98. DOI 10.3917/g2000.325.0081

Zellner, G., (2011) *A structured evaluation of business process improvement approaches*. Business Process Management Journal. 17, 203–237. doi:10.1108/14637151111122329

ANNEXE 1 : HYPOTHÈSES DE LA RECHERCHE

L'ensemble des hypothèses étudiées sont les suivantes :

- Hypothèse 1 : les dimensions et les pratiques d'affaires ont un impact sur la performance numérique des PMEM.
    - Hypothèse 1.1 : le leadership a un impact sur la performance numérique des PMEM.
        - Hypothèse 1.1.1 : la vision et la stratégie ont un impact sur la performance numérique des PMEM.
        - Hypothèse 1.1.2 : la veille technologique a un impact sur la performance numérique des PMEM.
        - Hypothèse 1.1.3: l'engagement et l'exemplarité de la direction ont un impact sur la performance numérique des PMEM.
        - Hypothèse 1.1.4 : la présence de nouveaux modèles d'affaires a un impact sur la performance numérique des PMEM.
    - Hypothèse 1.2 : la culture et l'organisation ont un impact sur la performance numérique des PMEM.
        - Hypothèse 1.2.1 : l'ouverture à l'externe a un impact sur la performance numérique des PMEM.
        - Hypothèse 1.2.2 : l'investissement et la disponibilité des ressources ont un impact sur la performance numérique des PMEM.
        - Hypothèse 1.2.3 : l'agilité et l'innovation ont un impact sur la performance numérique des PMEM.
        - Hypothèse 1.2.4 : la communication interne a un impact sur la performance numérique des PMEM.
        - Hypothèse 1.2.5 : la gestion du changement a un impact sur la performance numérique des PMEM.

        - Hypothèse 1.2.6 : l'acquisition et le développement des compétences ont un impact sur la performance numérique des PMEM.
        - Hypothèse 1.2.7 : l'organisation du travail (*lean*) a un impact sur la performance numérique des PMEM.
    - Hypothèse 1.3 : la gestion des technologies a un impact sur la performance numérique des PMEM.
        - Hypothèse 1.3.1 : la maîtrise des technologies a un impact sur la performance numérique des PMEM.
        - Hypothèse 1.3.2 : la sécurité informatique a un impact sur la performance numérique des PMEM.
        - Hypothèse 1.3.3 : l'automatisation des systèmes a un impact sur la performance numérique des PMEM.
        - Hypothèse 1.3.4 : l'écosystème et l'architecture numérique ont un impact sur la performance numérique des PMEM.
    - Hypothèse 1.4 : la gestion des données a un impact sur la performance numérique des PMEM.
        - Hypothèse 1.4.1 : la collecte de données a un impact sur la performance numérique des PMEM.
        - Hypothèse 1.4.2 : l'intégrité et la qualité des données ont un impact sur la performance numérique des PMEM.
        - Hypothèse 1.4.3 : la livraison des données a un impact sur la performance numérique des PMEM.
    - Hypothèse 1.5 : le système de mesure a un impact sur la performance numérique des PMEM.
        - Hypothèse 1.5.1 : l'utilisation opérationnelle des données a un impact sur la performance numérique des PMEM.
        - Hypothèse 1.5.2 : l'utilisation stratégique des données a un impact sur la performance numérique des PMEM.

- Hypothèse 1.6 : l'expérience client a un impact sur la performance numérique des PMEM.
    - Hypothèse 1.6.1 : la cocréation ont un impact sur la performance numérique des PMEM.
    - Hypothèse 1.6.2 : la personnalisation a un impact sur la performance numérique des PMEM.
    - Hypothèse 1.6.3 : l'orientation service et la fidélisation ont un impact sur la performance numérique des PMEM.
    - Hypothèse 1.6.4 : le commerce électronique (et le SMAC) ont un impact sur la performance numérique des PMEM.

- Hypothèse 2 : les processus d'affaires ont un impact sur la performance numérique des PMEM.
    - Hypothèse 2.1 : le processus de Direction a un impact sur la performance numérique des PMEM.
    - Hypothèse 2.2 : le processus de Marketing et Communication a un impact sur la performance numérique des PMEM.
    - Hypothèse 2.3 : le processus de Ventes a un impact sur la performance numérique des PMEM.
    - Hypothèse 2.4 : le processus de Développement et Ingénierie a un impact sur la performance numérique des PMEM.
    - Hypothèse 2.5 : le processus de Planification de la production a un impact sur la performance numérique des PMEM.
    - Hypothèse 2.6 : le processus de Gestion de la production a un impact sur la performance numérique des PMEM.
    - Hypothèse 2.7 : le processus de Service client a un impact sur la performance numérique des PMEM.
    - Hypothèse 2.8 : le processus de Distribution a un impact sur la performance numérique des PMEM.

- Hypothèse 2.9 : le processus d'Approvisionnement a un impact sur la performance numérique des PMEM.
- Hypothèse 2.10 : le processus de Maintenance a un impact sur la performance numérique des PMEM.
- Hypothèse 2.11 : le processus de Gestion des Technologies de l'Information (TI) a un impact sur la performance numérique des PMEM.
- Hypothèse 2.12 : le processus de Gestion des Ressources Humaines (RH) a un impact sur la performance numérique des PMEM.
- Hypothèse 2.13 : le processus de Comptabilité a un impact sur la performance numérique des PMEM.
- Hypothèse 2.14 : le processus de Qualité et Amélioration continue a un impact sur la performance numérique des PMEM.

- Hypothèse 3 : les outils numériques ont un impact sur la performance numérique des PMEM.
  - Hypothèse 3.1 : l'usage de la fabrication additive a un impact sur la performance numérique des PMEM.
  - Hypothèse 3.2 : l'usage de logiciels de simulation a un impact sur la performance numérique des PMEM.
  - Hypothèse 3.3 : l'usage de logiciels de conception et fabrication assisté par ordinateur a un impact sur la performance numérique des PMEM.
  - Hypothèse 3.4 : l'usage des technologies de foules (crowd) a un impact sur la performance numérique des PMEM.
  - Hypothèse 3.5 : l'usage du Big Data, de l'Analytique et/ou de l'intelligence d'affaires a un impact sur la performance numérique des PMEM.
  - Hypothèse 3.6 : l'usage de l'Internet des Objets a un impact sur la performance numérique des PMEM.
  - Hypothèse 3.7 : l'usage de l'Infonuagique a un impact sur la performance numérique des PMEM.

- Hypothèse 3.8 : l'usage de systèmes de chaîne d'approvisionnement intelligents a un impact sur la performance numérique des PMEM.
- Hypothèse 3.9 : l'usage de Systèmes Cyber-Physiques (CPS) a un impact sur la performance numérique des PMEM.
- Hypothèse 3.10 : l'usage de système de gestion de la production (WMS, MES, DMS, etc.) a un impact sur la performance numérique des PMEM.
- Hypothèse 3.11 : l'usage de système ERP a un impact sur la performance numérique des PMEM.
- Hypothèse 3.12 : l'usage de véhicules guidés automatiquement a un impact sur la performance numérique des PMEM.
- Hypothèse 3.13 : l'usage des technologies mobiles a un impact sur la performance numérique des PMEM.
- Hypothèse 3.14 : l'usage de robots a un impact sur la performance numérique des PMEM.
- Hypothèse 3.15 : l'usage de robots collaboratifs a un impact sur la performance numérique des PMEM.
- Hypothèse 3.16 : l'usage de la communication M2M a un impact sur la performance numérique des PMEM.
- Hypothèse 3.17 : l'usage de l'intelligence artificielle a un impact sur la performance numérique des PMEM.
- Hypothèse 3.18 : l'usage de la cybersécurité a un impact sur la performance numérique des PMEM.
- Hypothèse 3.19 : l'usage de la maintenance prédictive a un impact sur la performance numérique des PMEM.
- Hypothèse 3.20 : l'usage de systèmes de gestion de la relation client a un impact sur la performance numérique des PMEM.
- Hypothèse 3.21 : l'usage des médias sociaux a un impact sur la performance numérique des PMEM.

- Hypothèse 3.22 : l’usage du commerce électronique a un impact sur la performance numérique des PMEM.
- Hypothèse 3.23 : l’usage de la réalité virtuelle et/ou augmentée a un impact sur la performance numérique des PMEM.

ANNEXE 2 : RÉPONSE AU QUESTIONNAIRE

Dimension	Sous-dimension	Question	PME1	PME2	PME3	PME4	PME5	PME6	PME7	PME8	PME9
Leadership	Vision et Stratégie	Q1	1,0	2,0	1,0	3,0	3,0	3,0	3,0	1,0	4,0
		Q2	0,0	1,0	1,0	0,0	1,0	0,0	3,0	1,0	0,0
		Q3	1,0	2,0	1,0	0,0	2,0	1,0	3,0	1,0	1,0
		Q4	1,0	2,0	2,0	0,0	2,0	1,0	3,0	1,0	3,0
		Q5	0,0	2,0	1,0	0,0	3,0	1,0	3,0	1,0	0,0
		Q6	2,0	0,0	1,0	0,0	1,0	1,0	3,0	1,0	2,0
	Veille technologique	Q7	1,0	2,0	2,0	2,0	3,0	1,0	3,0	2,0	1,0
		Q8	3,0	1,0	2,0	0,0	1,0	1,0	3,0	2,0	0,0
		Q9	3,0	4,0	3,0	2,0	3,0	3,0	4,0	4,0	3,0
		Q10	3,0	4,0	2,0	3,0	4,0	3,0	4,0	4,0	4,0
	Nouveaux modèles d'affaires	Q11	3,0	4,0	3,0	2,0	4,0	2,0	4,0	4,0	4,0
		Q12	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	2,0	4,0	1,0	0,0
		Q13	3,0	4,0	4,0	3,0	4,0	1,0	4,0	4,0	4,0
		Q14	0,0	0,0	3,0	3,0	2,0	2,0	4,0	1,0	2,0
		Q15	1,0	3,0	2,0	3,0	3,0	3,0	4,0	1,0	2,0
	Engagement et exemplarité	Q16	3,0	2,0	2,0	3,0	3,0	3,0	4,0	4,0	4,0
		Q17	3,0	3,0	3,0	2,0	4,0	3,0	4,0	3,0	4,0
		Q18	1,0	2,0	2,0	1,0	3,0	1,0	4,0	2,0	3,0
		Q19	1,0	1,0	2,0	1,0	3,0	2,0	3,0	2,0	0,0
		Q20	0,0	0,0	1,0	0,0	1,0	0,0	3,0	1,0	0,0
Culture et organisation	Gestion du changement	Q21	3,4	2,7	1,4	3,0	3,3	1,9	3,3	1,1	3,0
		Q22	2,7	2,4	1,5	3,0	3,3	3,0	2,8	2,0	1,9
		Q23	3,2	2,8	1,4	3,4	3,3	3,0	3,5	2,3	3,0
		Q24	3,1	2,6	2,0	3,0	2,7	1,7	3,4	2,0	2,9
		Q25	1,4	2,0	0,8	2,5	3,3	0,6	2,6	1,9	2,0
	Agilité et innovation	Q26	1,8	1,8	2,0	2,7	3,0	2,8	2,9	2,6	2,5
		Q27	2,9	3,0	2,7	2,7	3,0	2,9	3,4	2,8	3,5
		Q28	3,1	2,5	2,4	3,1	3,0	2,1	3,5	3,1	3,3
		Q29	1,8	2,6	1,5	2,5	2,7	1,9	2,8	1,3	2,5
	Investissement et ressources disponibles	Q30	3,0	2,0	1,0	0,0	4,0	0,0	4,0	4,0	4,0
		Q31	3,0	3,0	2,0	1,0	3,0	2,0	4,0	3,0	4,0
		Q32	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	1,0	4,0	1,0	4,0
		Q33	3,0	3,0	3,0	2,0	3,0	1,0	4,0	3,0	4,0
		Q34	3,0	3,0	3,0	3,0	4,0	3,0	4,0	4,0	4,0
		Q35	3,0	3,0	2,0	3,0	4,0	3,0	4,0	4,0	4,0
		Q36	3,0	3,0	2,0	3,0	4,0	3,0	4,0	4,0	4,0

	Acquisition et développement de compétences	Q37	2,9	3,1	1,9	3,1	3,7	1,9	2,9	1,9	3,0
		Q38	1,1	1,6	0,7	2,1	1,7	0,6	1,7	1,2	1,1
		Q39	2,4	2,5	1,5	2,5	2,3	2,0	2,2	1,7	1,5
		Q40	2,6	2,3	1,7	3,1	2,7	2,8	2,7	2,5	2,0
	Ouverture à l'externe, collaboration et innovation ouverte	Q41	2,7	3,0	2,9	2,6	3,7	3,2	3,2	3,5	3,1
		Q42	2,4	2,5	2,4	2,6	2,7	2,7	3,3	3,4	2,3
		Q43	2,9	3,5	2,8	2,7	2,7	3,1	3,2	3,7	3,0
	Lean et Amélioration continue	Q44	1,5	0,8	1,3	1,9	3,3	0,5	2,6	1,3	1,5
		Q45	2,8	2,6	1,8	2,6	3,3	1,1	2,7	1,5	2,7
		Q46	3,1	2,6	2,6	3,0	3,7	1,9	3,5	3,0	3,6
	Communication interne	Q47	2,9	2,7	2,3	2,8	3,0	1,4	3,1	2,8	2,9
		Q48	3,1	2,7	2,3	2,8	3,3	3,2	3,5	3,0	3,3
		Q49	2,7	1,5	1,9	2,6	2,7	1,6	2,9	1,6	2,3
		Q50	2,1	2,2	1,7	2,3	1,7	0,4	2,2	1,7	2,0
Technologies	Écosystème et architecture	Q51	0,0	4,0	0,0	0,0	1,0	0,0	2,0	1,0	2,0
		Q52	0,0	1,0	1,0	0,0	1,0	0,0	2,0	1,0	2,0
		Q53	1,2	1,8	1,1	1,9	2,7	1,1	2,3	1,5	1,2
		Q54	2,2	1,8	1,7	2,3	2,7	1,6	2,0	2,5	2,4
		Q55	1,1	1,4	0,7	1,8	2,7	0,2	2,1	1,8	1,1
		Q56	1,6	1,6	1,1	2,3	2,7	0,9	1,9	1,9	1,9
	Intégration, connexion et maîtrise	Q57	2,6	2,1	1,5	1,7	2,7	1,9	3,1	1,8	1,8
		Q58	2,7	2,5	1,5	2,5	3,0	1,3	2,6	1,8	3,0
		Q59	1,9	2,2	1,5	2,4	2,7	1,5	2,4	1,5	3,0
		Q60	2,4	2,5	2,1	2,3	2,7	2,9	3,3	2,7	2,5
		Q61	2,1	2,8	2,3	2,7	2,7	2,7	2,6	2,7	3,0
		Q62	2,8	2,5	2,0	2,6	3,3	2,6	2,6	2,8	2,4
	Automatisation, autonomie et intelligence	Q63	1,9	1,5	2,2	2,5	2,3	1,9	2,9	2,0	2,4
		Q64	1,6	1,7	1,9	2,6	2,3	1,4	2,8	1,9	2,2
		Q65	1,9	1,5	1,6	1,3	1,3	1,0	1,9	1,8	2,0
		Q66	0,9	0,6	0,9	1,6	2,0	0,8	1,9	1,1	0,4
		Q67	2,2	1,1	1,8	2,1	2,0	0,8	2,1	1,9	1,9
		Q68	1,8	1,6	1,3	2,1	2,0	0,4	2,3	1,4	1,5
	Sécurité informatique	Q69	3,0	3,0	3,0	1,5	3,5	2,5	2,5	1,0	2,0
		Q70	3,0	3,5	1,5	2,5	3,0	1,0	2,0	4,0	2,5
		Q71	2,0	2,5	1,5	2,0	3,5	1,0	2,0	3,0	2,5
		Q72	3,0	3,5	3,5	3,5	4,0	3,5	1,5	3,0	2,5
		Q73	1,0	3,0	2,0	1,5	2,0	1,5	1,5	1,0	2,5
Gestion des données	Acquisition des données	Q74	3,0	2,0	4,0	2,0	3,0	2,0	3,0	3,0	2,0
		Q75	1,0	4,0	2,0	1,0	3,0	3,0	3,0	3,0	2,0
		Q76	2,0	3,0	3,0	2,0	3,0	3,0	3,0	2,0	2,0

	Livraison des données	Q77	1,0	2,0	2,0	0,0	1,0	1,0	1,0	1,0	2,0
		Q78	1,0	2,0	2,0	0,0	1,0	1,0	0,0	1,0	2,0
		Q79	2,0	4,0	2,0	1,0	1,0	1,0	3,0	1,0	2,0
	Qualité des données	Q80	2,0	3,0	3,0	0,0	3,0	3,0	2,0	0,0	2,0
		Q81	2,0	3,0	1,0	0,0	2,0	0,0	2,0	2,0	2,0
		Q82	2,0	1,0	1,0	0,0	1,0	0,0	3,0	1,0	2,0
		Q83	2,0	3,0	1,0	0,0	1,0	1,0	2,0	0,0	2,0
		Q84	3,0	1,0	1,0	0,0	1,0	1,0	2,0	3,0	2,0
Expérience client	Personnalisation	Q85	1,0	2,7	3,0	2,2	2,0	1,7	3,3	1,7	2,3
		Q86	1,7	3,0	2,0	2,0	3,0	2,7	3,3	1,3	2,8
		Q87	0,7	3,0	1,3	1,2	1,0	0,0	0,7	1,0	0,5
		Q88	3,0	3,7	3,0	2,3	4,0	3,0	2,7	1,7	4,0
	Engagement et cocréation	Q89	3,0	2,0	4,0	0,0	2,0	2,0	3,0	3,0	3,0
		Q90	2,0	1,0	3,0	0,0	3,0	2,0	3,0	1,0	3,0
		Q91	3,0	1,0	4,0	0,0	3,0	2,0	4,0	1,0	3,0
	Orientation service et Fidélisation	Q92	3,0	3,0	2,5	2,3	1,0	0,5	4,0	2,5	2,0
		Q93	1,0	3,0	2,5	1,5	1,0	0,0	2,0	1,0	3,0
		Q94	1,0	3,0	2,0	1,8	1,0	0,5	1,5	1,0	3,0
		Q95	1,0	1,0	2,0	2,0	1,0	0,5	1,5	1,0	0,0
		Q96	1,0	2,0	2,5	2,0	2,0	0,0	1,5	1,0	3,5
	Commerce électronique et SMAC	Q97	0,0	4,0	0,0	1,0	1,0	0,0	4,0	1,0	0,0
		Q98	2,0	2,0	2,0	3,1	2,0	1,3	1,8	1,5	2,0
		Q99	2,5	0,0	1,3	2,1	2,0	0,5	0,8	1,0	2,5
		Q100	2,0	0,0	1,3	3,0	2,0	1,5	0,8	1,0	2,8
Utilisation des données	Utilisation des données dans les opérations	Q101	1,5	1,0	0,6	1,7	2,7	0,5	1,9	1,3	0,9
		Q102	2,1	1,0	1,6	1,7	3,0	0,9	2,3	1,6	1,5
		Q103	1,9	2,3	1,7	2,4	3,0	1,7	2,4	2,1	1,6
		Q104	1,3	1,6	2,3	2,4	2,3	1,0	2,6	1,8	1,5
	Utilisation des données dans les décisions stratégiques	Q105	3,0	1,5	1,5	2,0	2,7	1,1	3,0	1,7	1,7
		Q106	1,0	2,1	2,3	2,4	2,7	1,1	3,1	2,1	2,3
		Q107	3,0	2,1	2,3	2,0	3,0	1,6	3,1	2,0	2,5
		Q108	3,0	1,8	2,0	2,4	3,0	2,1	2,4	1,9	2,5
		Q109	3,0	2,1	2,5	2,2	2,3	1,5	3,0	2,0	2,5
	Performance numérique		2,0	2,2	1,9	1,9	2,5	1,6	2,8	2,0	2,3

Dimension	Sous-dimension	Question	PME10	PME11	PME12	PME13	PME14	PME15	PME16
Leadership	Vision et Stratégie	Q1	1,0	3,0	1,0	3,0	3,0	2,0	1,0
		Q2	1,0	1,0	1,0	2,0	1,0	1,0	1,0
		Q3	1,0	2,5	1,0	3,0	1,0	2,0	1,0
		Q4	1,0	1,5	1,0	3,0	2,0	2,0	1,0
		Q5	1,0	1,0	1,0	3,0	1,0	2,0	1,0
		Q6	1,0	1,5	1,0	2,0	1,0	2,0	1,0
	Veille technologique	Q7	2,0	2,0	2,0	3,0	2,0	2,0	2,0
		Q8	0,0	1,5	2,0	3,0	2,0	1,0	1,0
		Q9	2,0	2,5	3,0	3,0	2,0	4,0	3,0
		Q10	3,0	3,0	3,0	4,0	3,0	4,0	3,0
	Nouveaux modèles d'affaires	Q11	0,0	2,0	1,0	3,0	3,0	1,0	2,0
		Q12	0,0	2,5	2,0	3,0	2,0	1,0	1,0
		Q13	4,0	3,0	4,0	4,0	3,0	3,0	2,0
		Q14	0,0	3,0	1,0	1,0	2,0	1,0	2,0
		Q15	0,0	2,5	4,0	1,0	3,0	1,0	2,0
	Engagement et exemplarité	Q16	2,0	2,5	1,0	3,0	3,0	3,0	1,0
		Q17	2,0	3,0	3,0	4,0	3,0	4,0	3,0
		Q18	2,0	2,5	1,0	3,0	2,0	3,0	3,0
		Q19	2,0	2,5	1,0	3,0	2,0	3,0	2,0
		Q20	0,0	2,0	1,0	2,0	3,0	3,0	1,0
Culture et organisation	Gestion du changement	Q21	1,0	2,7	2,1	3,5	2,1	1,8	3,5
		Q22	1,1	1,8	2,0	3,2	2,2	2,3	2,9
		Q23	1,9	2,4	2,1	3,6	2,7	2,8	3,4
		Q24	2,1	2,6	1,8	3,0	2,3	2,6	2,8
		Q25	1,5	1,6	1,7	3,3	1,8	2,4	2,7
	Agilité et innovation	Q26	2,9	2,0	2,4	3,2	2,8	1,2	2,3
		Q27	2,9	2,4	3,3	3,3	2,8	3,2	3,3
		Q28	2,4	2,5	2,5	3,4	2,6	3,4	3,6
		Q29	2,4	1,6	2,3	2,6	2,4	2,5	2,3
	Investissement et ressources disponibles	Q30	2,0	1,0	4,0	4,0	1,0	3,0	2,0
		Q31	3,0	3,0	2,0	4,0	3,0	4,0	2,0
		Q32	3,0	3,0	1,0	4,0	3,0	4,0	3,0
		Q33	3,0	3,0	2,0	4,0	3,0	4,0	2,0
		Q34	4,0	3,0	3,0	4,0	3,0	4,0	2,0
		Q35	3,0	3,0	1,0	4,0	3,0	3,0	3,0
		Q36	3,0	3,0	3,0	4,0	3,0	3,0	3,0
	Acquisition et développement de compétences	Q37	2,9	2,8	2,2	3,2	2,8	3,2	2,8
		Q38	0,9	1,2	1,4	2,5	1,3	1,0	1,7
		Q39	2,2	2,2	1,9	3,2	1,9	2,5	2,9

		Q40	2,6	2,1	2,0	3,2	2,7	3,1	3,1
	Ouverture à l'externe, collaboration et innovation ouverte	Q41	2,9	3,0	2,7	3,5	2,9	2,5	3,1
		Q42	1,8	2,4	2,9	3,4	3,3	1,5	2,9
		Q43	2,8	2,6	2,9	3,7	3,4	2,4	3,2
	Lean et Amélioration continue	Q44	1,3	1,1	2,1	2,7	1,9	2,0	2,0
		Q45	1,2	2,1	2,4	3,1	2,4	2,4	2,4
		Q46	1,6	2,5	2,9	3,6	2,9	3,3	3,0
	Communication interne	Q47	2,5	1,8	2,8	3,2	2,5	2,5	2,9
		Q48	1,8	2,4	2,8	3,6	3,0	3,2	3,4
		Q49	1,7	2,4	2,6	3,2	2,4	2,2	2,7
		Q50	1,9	1,7	1,8	2,4	1,6	2,3	2,4
Technologies	Écosystème et architecture	Q51	2,0	2,0	3,5	3,0	0,0	1,0	1,0
		Q52	1,0	2,5	3,0	3,0	0,0	1,0	3,0
		Q53	1,4	1,7	1,5	2,2	2,1	3,0	2,4
		Q54	1,9	1,7	1,8	2,2	2,4	2,8	2,9
		Q55	1,1	1,7	1,6	1,7	2,2	1,4	2,4
		Q56	1,5	1,5	1,8	2,3	2,1	2,5	2,6
	Intégration, connexion et maîtrise	Q57	2,1	2,7	2,4	2,8	2,3	1,7	1,6
		Q58	0,5	2,5	2,3	3,1	2,9	2,2	2,6
		Q59	1,6	2,4	1,8	2,8	2,8	1,8	2,1
		Q60	2,7	2,7	1,8	3,0	2,8	3,1	2,9
		Q61	2,3	3,0	2,5	2,4	2,6	2,9	2,6
		Q62	2,5	2,7	2,2	2,9	2,7	3,0	2,6
	Automatisation, autonomie et intelligence	Q63	1,6	2,3	2,6	2,5	2,8	2,4	2,9
		Q64	1,7	2,1	2,2	2,4	2,8	2,0	2,5
		Q65	0,2	1,7	1,6	1,5	1,9	2,4	2,1
		Q66	0,1	1,0	0,9	1,0	1,8	1,2	1,4
		Q67	1,0	2,3	2,1	2,0	3,0	2,7	2,5
		Q68	0,5	2,0	1,8	1,9	2,8	2,4	2,3
	Sécurité informatique	Q69	1,0	2,3	3,5	2,5	2,0	3,5	2,0
		Q70	4,0	3,0	3,5	3,0	3,5	3,0	3,0
		Q71	4,0	2,8	3,5	2,5	3,5	2,0	2,5
		Q72	1,0	3,3	3,5	4,0	3,5	3,0	3,5
		Q73	2,0	2,3	3,0	3,0	2,0	2,0	2,0
Gestion des données	Acquisition des données	Q74	3,0	2,0	3,5	3,0	4,0	1,0	2,0
		Q75	3,0	2,5	3,0	4,0	4,0	3,0	3,0
		Q76	2,0	2,5	3,5	3,0	3,0	1,0	3,0
	Livraison des données	Q77	3,0	2,0	1,5	2,0	3,0	1,0	2,0
		Q78	1,0	2,0	1,5	2,0	3,0	1,0	2,0
		Q79	1,0	3,0	2,0	3,0	3,0	3,0	4,0

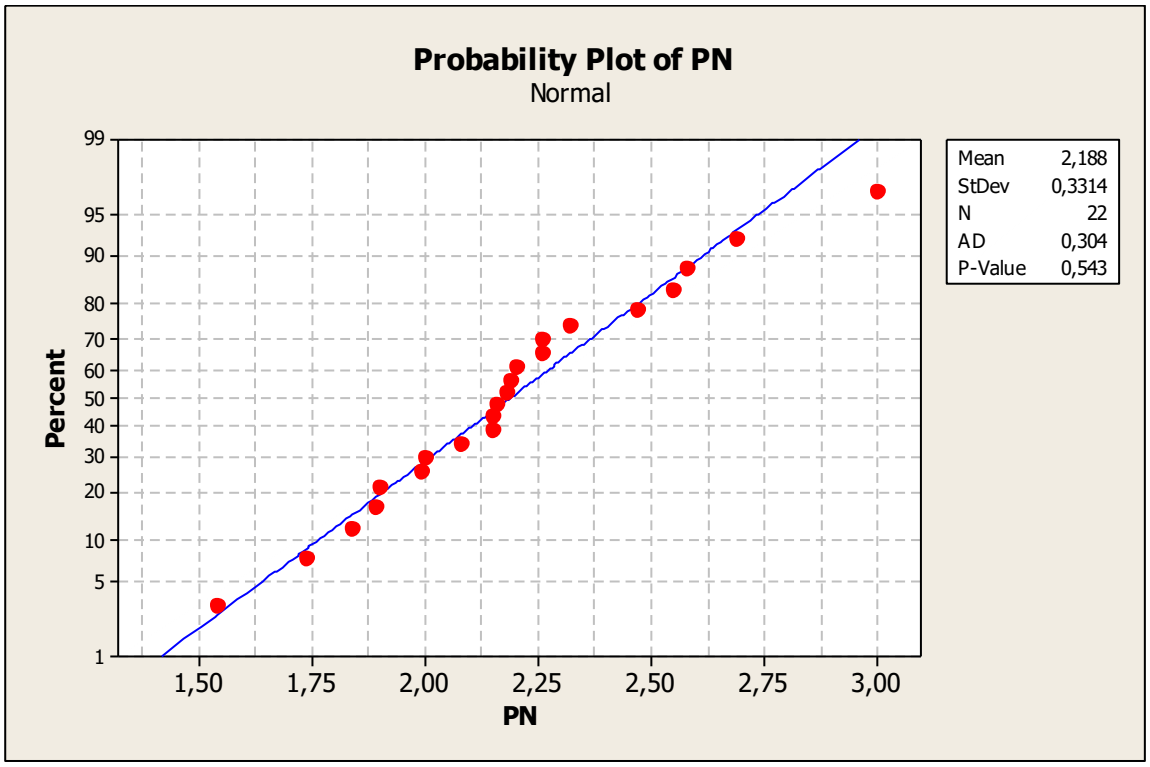
	Qualité des données	Q80	0,0	3,0	2,0	1,0	4,0	3,0	2,0
		Q81	0,0	2,5	1,0	1,0	3,0	1,0	1,0
		Q82	2,0	2,0	1,5	2,0	4,0	3,0	3,0
		Q83	3,0	2,5	2,5	2,0	3,0	0,0	2,0
		Q84	4,0	2,0	2,5	2,0	3,0	1,0	1,0
Expérience client	Personnalisation	Q85	2,3	1,5	1,8	2,5	3,0	2,3	2,3
		Q86	2,0	2,3	1,6	2,0	2,0	0,7	2,7
		Q87	0,0	1,7	0,2	0,8	4,0	0,0	1,0
		Q88	0,7	3,0	1,8	2,7	4,0	1,0	3,0
	Engagement et cocréation	Q89	3,0	2,5	3,0	3,0	0,0	3,0	2,0
		Q90	2,0	2,0	2,0	0,0	0,0	2,0	2,0
		Q91	1,0	3,0	3,0	3,0	0,0	3,0	2,0
	Orientation service et Fidélisation	Q92	3,5	2,5	3,0	3,0	4,0	3,0	3,0
		Q93	1,5	2,5	3,5	1,0	2,5	1,5	2,5
		Q94	1,5	1,8	3,0	2,5	2,0	2,0	2,0
		Q95	1,5	1,3	3,0	1,0	2,0	1,5	1,5
		Q96	2,0	1,8	3,0	2,0	2,0	1,5	2,0
	Commerce électronique et SMAC	Q97	1,0	0,5	0,5	1,0	4,0	0,0	0,0
		Q98	0,0	3,0	1,8	2,3	3,4	1,7	2,0
		Q99	2,7	2,0	1,3	2,3	2,8	1,7	1,5
		Q100	2,7	2,0	1,0	2,5	2,8	2,0	1,8
Utilisation des données	Utilisation des données dans les opérations	Q101	1,7	1,2	2,2	1,9	2,3	1,5	2,1
		Q102	1,3	1,4	1,8	2,6	2,3	1,9	2,4
		Q103	2,5	1,9	1,9	2,6	2,8	2,8	2,8
		Q104	2,0	1,9	2,2	2,7	2,4	2,8	2,9
	Utilisation des données dans les décisions stratégiques	Q105	2,0	1,4	2,0	2,4	2,7	4,0	2,6
		Q106	4,0	2,0	2,0	2,6	2,6	3,0	2,0
		Q107	3,0	1,8	1,0	2,3	2,8	3,0	3,0
		Q108	3,0	1,6	1,0	2,1	2,6	1,0	3,0
		Q109	3,0	2,1	3,0	2,4	2,6	1,0	3,0
	Performance numérique		1,9	2,2	2,1	2,7	2,5	2,2	2,3

Dimension	Sous-dimension	Question	PME17	PME18	PME19	PME20	PME21
Leadership	Vision et Stratégie	Q1	1,0	1,0	4,0	2,0	0,0
		Q2	1,0	1,0	2,0	1,0	0,0
		Q3	1,0	1,0	1,0	2,0	0,0
		Q4	1,0	1,0	3,0	2,0	0,0
		Q5	1,0	1,0	3,0	1,0	0,0
		Q6	1,0	1,0	1,0	2,0	0,0
	Veille technologique	Q7	2,0	2,0	3,0	2,0	3,0
		Q8	1,0	2,0	3,0	2,0	1,0
		Q9	3,0	3,0	3,0	3,0	4,0
		Q10	3,0	3,0	3,0	3,0	4,0
	Nouveaux modèles d'affaires	Q11	2,0	3,0	4,0	2,0	2,0
		Q12	1,0	2,0	2,0	3,0	0,0
		Q13	2,0	3,0	4,0	3,0	4,0
		Q14	2,0	3,0	4,0	3,0	0,0
		Q15	2,0	3,0	4,0	3,0	1,0
	Engagement et exemplarité	Q16	1,0	2,0	3,0	1,0	0,0
		Q17	3,0	3,0	4,0	3,0	4,0
		Q18	3,0	2,0	3,0	2,0	3,0
		Q19	2,0	1,0	3,0	2,0	0,0
		Q20	1,0	1,0	1,0	0,0	0,0
Culture et organisation	Gestion du changement	Q21	3,3	1,4	3,2	2,5	3,4
		Q22	3,5	1,4	3,0	2,1	2,6
		Q23	3,4	2,4	3,4	3,1	2,6
		Q24	2,5	2,1	3,1	2,2	2,5
		Q25	2,3	1,6	2,7	1,5	2,4
	Agilité et innovation	Q26	2,5	2,4	2,6	2,7	2,4
		Q27	3,3	2,9	3,4	3,1	2,9
		Q28	3,3	3,1	3,4	2,8	2,5
		Q29	2,4	2,3	2,9	1,3	1,9
	Investissement et ressources disponibles	Q30	2,0	3,0	4,0	2,0	1,0
		Q31	2,0	3,0	4,0	2,0	1,0
		Q32	3,0	3,0	4,0	2,0	2,0
		Q33	2,0	3,0	4,0	2,0	3,0
		Q34	2,0	3,0	4,0	2,0	2,0
		Q35	3,0	2,0	4,0	2,0	1,0
		Q36	3,0	3,0	4,0	2,0	4,0
	Acquisition et développement de compétences	Q37	2,7	2,4	3,4	2,8	1,9
		Q38	1,5	1,3	2,2	1,5	1,2
		Q39	2,8	1,9	3,1	2,3	1,8

		Q40	2,9	2,2	3,2	2,9	2,8
	Ouverture à l'externe, collaboration et innovation ouverte	Q41	3,3	3,0	3,4	2,8	2,6
		Q42	2,8	2,6	3,2	2,8	2,6
		Q43	3,1	2,5	3,4	3,0	3,1
	Lean et Amélioration continue	Q44	2,3	2,2	2,8	1,8	2,5
		Q45	2,1	2,5	3,2	1,6	2,4
		Q46	3,3	3,2	3,6	2,8	2,6
	Communication interne	Q47	2,9	2,6	3,2	2,3	2,5
		Q48	3,0	3,3	3,4	3,1	3,0
		Q49	2,7	2,5	2,8	2,0	3,0
		Q50	2,8	1,8	2,7	2,2	2,8
Technologies	Écosystème et architecture	Q51	1,0	0,0	2,5	3,0	3,0
		Q52	3,0	1,0	3,0	1,0	4,0
		Q53	2,4	1,6	2,9	1,1	1,4
		Q54	2,7	2,1	3,0	1,5	1,5
		Q55	2,2	1,7	2,9	1,8	1,9
		Q56	2,4	1,9	2,8	1,5	2,1
	Intégration, connexion et maîtrise	Q57	1,8	2,1	2,6	2,1	2,5
		Q58	2,8	2,1	3,3	2,1	2,3
		Q59	2,1	2,0	3,2	2,3	1,9
		Q60	2,8	2,4	3,1	2,0	2,5
		Q61	2,9	2,1	2,8	2,5	2,6
		Q62	2,8	2,8	3,1	2,5	2,5
	Automatisation, autonomie et intelligence	Q63	2,5	3,0	3,2	2,0	2,4
		Q64	2,4	2,3	2,9	1,7	2,2
		Q65	2,4	2,1	2,4	1,7	1,2
		Q66	1,9	1,4	2,4	1,2	1,9
		Q67	2,5	2,4	2,8	1,3	2,0
		Q68	2,6	1,7	2,7	1,3	1,9
	Sécurité informatique	Q69	2,0	1,0	3,7	1,5	4,0
		Q70	3,0	2,0	3,7	1,5	3,0
		Q71	2,5	2,0	3,0	1,0	3,5
		Q72	3,5	2,0	4,0	2,0	4,0
		Q73	2,0	1,5	2,3	1,0	3,5
Gestion des données	Acquisition des données	Q74	2,0	2,0	3,5	2,0	3,0
		Q75	3,0	1,0	4,0	3,0	3,0
		Q76	3,0	2,0	3,5	1,0	3,0
	Livraison des données	Q77	2,0	3,0	3,0	2,0	3,0
		Q78	2,0	2,0	3,0	0,0	2,0
		Q79	4,0	2,0	3,0	1,0	3,0

	Qualité des données	Q80	2,0	2,0	3,5	3,0	2,0
		Q81	1,0	2,0	2,5	1,0	2,0
		Q82	3,0	1,0	2,5	0,0	2,0
		Q83	2,0	1,0	3,5	0,0	2,0
		Q84	1,0	2,0	2,5	0,0	2,0
Expérience client	Personnalisation	Q85	1,3	2,5	3,3	3,0	2,6
		Q86	1,0	2,3	3,8	2,5	2,4
		Q87	0,0	0,0	3,5	1,3	0,1
		Q88	1,3	3,3	2,8	3,5	2,9
	Engagement et cocréation	Q89	2,0	3,0	3,0	3,5	3,7
		Q90	3,0	1,0	1,0	2,5	3,0
		Q91	2,0	3,0	1,0	3,5	3,3
	Orientation service et Fidélisation	Q92	3,0	3,5	3,3	2,0	3,0
		Q93	2,0	3,0	3,0	1,5	3,0
		Q94	2,0	3,0	3,3	1,5	3,0
		Q95	2,0	3,0	3,0	1,5	3,0
		Q96	1,5	3,0	3,0	1,5	3,0
	Commerce électronique et SMAC	Q97	0,0	0,0	4,0	0,0	1,0
		Q98	1,8	2,3	2,7	1,3	2,7
		Q99	1,0	2,7	2,7	0,0	1,7
		Q100	1,3	1,7	1,5	0,3	1,0
Utilisation des données	Utilisation des données dans les opérations	Q101	1,7	1,4	3,2	1,3	1,6
		Q102	2,7	2,1	2,9	1,8	1,6
		Q103	2,8	2,6	2,9	1,5	1,7
		Q104	2,8	2,2	2,8	1,9	2,4
	Utilisation des données dans les décisions stratégiques	Q105	2,6	2,2	3,3	1,0	2,5
		Q106	2,0	1,9	2,7	2,0	2,6
		Q107	3,0	1,9	3,3	2,0	2,3
		Q108	3,0	2,1	3,0	1,0	1,9
		Q109	3,0	1,6	2,4	2,0	2,4
Performance numérique			2,3	2,1	3,0	1,9	2,2

ANNEXE 3 : TEST DE NORMALITÉ



Comme p-value < 0,005, il est possible de conclure que les données suivent une loi normale.

ANNEXE 4 : CALCUL DE PARTITIONNEMENT DE DONNÉES SUR LES DIMENSIONS DE LA PERFORMANCE NUMÉRIQUE

Cluster Analysis of Observations: LDS; CLT; TEC; DNE; EXP; MSR

Standardized Variables, Euclidean Distance, Complete Linkage

Amalgamation Steps

Step	Number of clusters	Similarity level	Distance level	Clusters joined		New cluster	Number of obs. in new cluster
1	20	88,9480	0,92537	2	11	2	2
2	19	88,8560	0,93308	16	17	16	2
3	18	87,0311	1,08587	2	12	2	3
4	17	85,2672	1,23357	9	18	9	2
5	16	82,4388	1,47038	5	13	5	2
6	15	80,0398	1,67125	1	10	1	2
7	14	78,5983	1,79194	8	15	8	2
8	13	78,4107	1,80765	2	9	2	5
9	12	74,4503	2,13925	3	20	3	2
10	11	72,7230	2,28388	5	7	5	3
11	10	71,4618	2,38948	14	21	14	2
12	9	70,7814	2,44645	4	8	4	3
13	8	67,7648	2,69902	2	3	2	7
14	7	66,0443	2,84308	14	16	14	4
15	6	65,2985	2,90552	1	4	1	5
16	5	61,7383	3,20362	5	19	5	4
17	4	53,0266	3,93304	1	2	1	12
18	3	47,4006	4,40410	1	6	1	13
19	2	45,5443	4,55953	5	14	5	8
20	1	0,0000	8,37290	1	5	1	21

Final Partition

Number of clusters: 3

	Number of observations	Within cluster sum of squares	Average distance from centroid	Maximum distance from centroid
Cluster1	13	42,0883	1,72912	2,92697
Cluster2	4	9,8300	1,52626	2,10365
Cluster3	4	7,7097	1,34870	1,65554

Cluster Centroids

Variable	Cluster1	Cluster2	Cluster3	Grand centroid
LDS	-0,329691	1,62925	-0,557758	-0,0000000
CLT	-0,526135	1,60911	0,100830	-0,0000000
TEC	-0,553465	1,06359	0,735169	0,0000000
DNE	-0,442052	0,50885	0,927817	0,0000000
EXP	-0,282256	0,75451	0,162825	-0,0000000
MSR	-0,581971	1,17900	0,712409	-0,0000000

Distances Between Cluster Centroids

	Cluster1	Cluster2	Cluster3
Cluster1	0,00000	4,01144	2,41986

Cluster2	4,01144	0,00000	2,81231
Cluster3	2,41986	2,81231	0,00000

ANNEXE 5 : CALCUL DE PARTITIONNEMENT DE DONNÉES ENTRE LES PRATIQUES D'AFFAIRES

Cluster Analysis of Variables: VSN; VLE; NMA; ENG; AGI; GCH; RES; COMP; ...

Correlation Coefficient Distance, Complete Linkage
Amalgamation Steps

Step	Number of clusters	Similarity level	Distance level	Clusters joined		New cluster	Number of obs. in new cluster
1	23	94,4346	0,11131	10	11	10	2
2	22	91,8021	0,16396	1	4	1	2
3	21	90,2234	0,19553	6	8	6	2
4	20	88,5870	0,22826	14	23	14	2
5	19	87,2953	0,25409	17	18	17	2
6	18	86,8844	0,26231	1	7	1	3
7	17	85,7503	0,28499	10	14	10	4
8	16	84,5334	0,30933	6	13	6	3
9	15	82,8287	0,34343	3	19	3	2
10	14	82,1601	0,35680	9	16	9	2
11	13	81,5332	0,36934	5	6	5	4
12	12	80,8920	0,38216	12	15	12	2
13	11	75,6044	0,48791	1	2	1	4
14	10	75,2943	0,49411	22	24	22	2
15	9	72,8379	0,54324	17	21	17	3
16	8	72,2093	0,55581	5	10	5	8
17	7	67,7097	0,64581	12	17	12	5
18	6	65,7467	0,68507	5	22	5	10
19	5	64,0833	0,71833	3	9	3	4
20	4	57,1657	0,85669	1	3	1	8
21	3	48,9027	1,02195	1	5	1	18
22	2	44,2579	1,11484	12	20	12	6
23	1	21,5992	1,56802	1	12	1	24

Final Partition

Cluster 1
VSN VLE NMA ENG RES OUV COL PERS
Cluster 2
AGI GCH COMP LEAN COMM MAÎT AUTO eCOM UOP UST
Cluster 3
ÉCO SÉCU LIV QLT FID
Cluster 4
COCR