



MÉMOIRE
PRÉSENTÉ À
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À CHICOUTIMI
COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN GESTION DES ORGANISATIONS

PAR
ELISABETH HARVEY TOUPIN

L'INDUSTRIE 4.0 AU SERVICE DE LA DURABILITÉ DES PRODUITS

DÉCEMBRE 2022

RÉSUMÉ

Dans un contexte de croissance exacerbée de la consommation à haut risque pour le climat et l'environnement, des enjeux importants se jouent en lien avec l'économie. Le développement durable se positionne comme un incontournable et avec lui, les stratégies d'économie circulaire. Sur un autre plan, les technologies d'information sont de plus en plus poussées et permettent des opportunités qui bouleversent les systèmes de production, on parle de 4^e révolution industrielle. Il est impératif de mettre en relation l'utilisation de l'électronique avec la réduction de la production de déchets et d'adresser les enjeux environnementaux à un niveau économique. Le concept de cycle de vie du produit est au centre de cette recherche qui se penche sur les contributions des technologies relatives à l'industrie 4.0 à l'augmentation de la durabilité des produits. Une étude exploratoire et empirique est élaborée à partir d'entretiens ouverts obtenus auprès de 20 répondants sur un échantillon de 8 entreprises québécoises qui se classent dans des modèles d'affaires d'extension de la durée de vie des produits (EDVP) dans le but d'établir ces apports. Il en résulte que les technologies de l'industrie 4.0 sont très prometteuses quant aux possibilités de prolongement de la durée de vie des produits et cela dans les différentes phases du cycle de vie du produit, au moment de sa conception, de sa fabrication et de son utilisation bien que certaines résistances existent quant à leur adoption. Quatre grands thèmes émergent donc de cette étude. Il s'agit d'abord du thème de l'*amélioration de la conception* comprenant les catégories « meilleure planification », « facilitation du prototypage » et « correspondance aux besoins du marché ». Ensuite vient le thème de l'*amélioration de la production* avec la catégorie « optimisation de la fabrication » qui comporte comme sous-catégorie « contrôle des opérations », « réduction des erreurs » et « gabarits de fabrication » et la catégorie « amélioration des produits ». Suit le thème de l'*entretien des produits* avec les catégories « actions correctives », « entretien préventif » et « mises à jour ». Enfin, se retrouve le thème de la *résistance à l'utilisation des technologies de l'industrie 4.0* comportant les catégories « propriétés de la matière », « consommation de renouvellement » et « barrières à l'entrée ». De surcroît, il émerge de ces thèmes trois grands axes transversaux. Ce sont en particulier des axes de soutien que fournissent les technologies de l'industrie 4.0 à la durabilité des produits. Ces axes de soutien sont l'*identification*, la *validation* et la *prédiction*. On voit en effet que les technologies offrent des opportunités pour identifier des facteurs et des informations pertinentes, pour valider les idées développées, les informations colligées et les concepts créés ainsi que pour prévoir les actions à réaliser ou les changements à venir dans l'environnement en fonction des informations déjà possédées ou des tendances qu'il est possible de déceler. La présente étude est discutée et les contributions théoriques et managériales sont soulignées, elles sont de l'ordre d'une meilleure intégration de l'industrie 4.0 dans le champ de recherche sur l'EDVP et les MAEDVP. Enfin, les limites et avenues de recherches sont évoquées.

REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer ma gratitude tout d'abord à Mme Myriam ERTZ, professeure au département des sciences économiques et administratives de l'Université du Québec à Chicoutimi. Elle m'a tout d'abord fait confiance en m'offrant la possibilité de travailler auprès d'elle en tant qu'assistante de recherche. Cette implication m'a permis d'être en contact avec ce domaine de la recherche qui se situe à la frontière entre le numérique et l'économie circulaire et d'arrêter un choix de sujet pour le présent mémoire. Sa guidance et son soutien m'ont été d'une grande aide, tout au long de mon processus de recherche et de rédaction. Je souhaite aussi adresser de sincères remerciements à toute l'équipe pédagogique de l'université et du département des sciences économiques et administratives qui m'a entouré et soutenu dans les démarches administratives comme dans celles relatives à la documentation ou la rédaction du présent document. Je désire également remercier M. Julien BOUSQUET, professeur agrégé du département des sciences administratives et économiques de l'Université du Québec à Chicoutimi, d'avoir tout d'abord cru en moi, en sa qualité de directeur du programme de maîtrise en gestion des organisations, en acceptant de m'y admettre en tant qu'étudiante. Il a aussi grandement contribué à mieux positionner ma méthodologie de recherche et à parfaire la rédaction de ma revue de littérature. Je tiens aussi à souligner mon appréciation à Messieurs Vincent MORIN et Brahim MEDDEB, également professeurs au département des sciences économiques et administratives de l'Université du Québec à Chicoutimi, de m'avoir prodigué de précieux conseils quant à mon choix de sujet et de direction de recherche ainsi qu'aux implications que ceux-ci pourraient avoir sur mon cheminement. Leurs conseils auront été des pierres angulaires de l'orientation qu'a prise ce mémoire. Je tiens aussi à évoquer ma reconnaissance envers mes parents et mon conjoint, qui m'ont soutenu moralement dans le processus rassemblant des moments de distanciation, d'autres moments de découragements, mais aussi qui ont partagé avec moi ma grande fierté et le sentiment d'accomplissement que me laisse ce mémoire maintenant achevé. Par leur amour et leur soutien inconditionnel, j'ai été accueillie dans toutes les étapes de mon travail et j'ai pu traverser toutes les épreuves que cela a représentées. Je souligne aussi la patience, les encouragements et les exemples de résilience dont ont fait preuve mes enfants tout au long du processus de rédaction. Tout comme je suis devenue un modèle de rigueur pour eux, ils étaient aussi un exemple pour moi de persévérance et de motivation.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ.....	II
REMERCIEMENTS	III
LISTE DES TABLEAUX.....	VI
LISTE DES FIGURES.....	VII
LISTE DES ABRÉVIATIONS	VIII
CHAPITRE 1 INTRODUCTION	1
1.1 CONTEXTE DE L'ÉTUDE ET PRÉSENTATION DU SUJET	1
1.2 EXPLICATION DÉTAILLÉE DE LA PROBLÉMATIQUE	5
1.3 PRÉSENTATION DES OBJECTIFS ET QUESTIONS DE RECHERCHE.....	7
1.4 IDENTIFICATION DES CONTRIBUTIONS DE L'ÉTUDE	7
CHAPITRE 2 REVUE DE LA LITTÉRATURE	9
2.1 LES STRATÉGIES D'EDVP	10
2.2 L'INDUSTRIE 4.0.....	16
2.3 L'INDUSTRIE 4.0 ET LES STRATÉGIES D'EDVP.....	17
CHAPITRE 3 CADRE THÉORIQUE	26
3.1 INDUSTRIE 4.0 - 4 TECHNOLOGIES	26
3.2 DURÉE DE VIE ET EXTENSION DE LA DURÉE DE VIE DES PRODUITS	28
3.3 MODÈLES D'AFFAIRES D'EXTENSION DE LA DURÉE DE VIE DES PRODUITS	29
CHAPITRE 4 DEVIS DE RECHERCHE.....	32
4.1 CADRE MÉTHODOLOGIQUE	32
4.2 ÉCHANTILLONNAGE	32
4.3 PROCÉDURE DE COLLECTE DE DONNÉES.....	35
4.4 ORGANISATION ET ANALYSE DES DONNÉES	36
4.5 CONSIDÉRATIONS ÉTHIQUES	38
CHAPITRE 5 RÉSULTATS.....	39
5.1 AMÉLIORATION DE LA CONCEPTION	39
5.1.1 MEILLEURE PLANIFICATION.....	39
5.1.2 FACILITATION DU PROTOTYPAGE.....	41

5.1.3	CORRESPONDANCE AUX BESOINS DU MARCHÉ	44
5.2	AMÉLIORATION DE LA PRODUCTION	61
5.2.1	OPTIMISATION DE LA FABRICATION	62
5.2.1.1	CONTRÔLE DES OPÉRATIONS	62
5.2.1.2	RÉDUCTION DES ERREURS	64
5.2.1.3	GABARITS DE FABRICATION	67
5.2.2	AMÉLIORATION DES PRODUITS	68
5.3	ENTRETIEN DES PRODUITS	81
5.3.1	ACTIONS CORRECTIVES	81
5.3.2	ENTRETIEN PRÉVENTIF	82
5.3.3	MISES À JOUR	84
5.4	RÉSISTANCES À L'UTILISATION DES TECHNOLOGIES DE L'INDUSTRIE	
		4.0 94
5.4.1	PROPRIÉTÉS DE LA MATIÈRE	94
5.4.2	CONSOMMATION DE RENOUVELLEMENT	95
5.4.3	BARRIÈRES À L'ENTRÉE	97
5.5	CADRE CONCEPTUEL	104
5.5.1	IDENTIFICATION	104
5.5.2	VALIDATION	105
5.5.3	PRÉVISION	106
	CHAPITRE 6 DISCUSSION	108
6.1	ANALYSE DES RÉSULTATS	108
6.2	EMPHASE SUR LA CONCEPTION	111
	CHAPITRE 7 CONTRIBUTIONS THÉORIQUES	113
7.1	CONTRIBUTIONS THÉORIQUES DE L'ÉTUDE	113
	CHAPITRE 8 CONTRIBUTIONS MANAGÉRIALES	118
8.1	CONTRIBUTIONS MANAGÉRIALES DE L'ÉTUDE	118
	CHAPITRE 9 LIMITES, CONSÉQUENCES ET AVENUES DE RECHERCHE	122
9.1	LIMITES, CONSÉQUENCES ET AVENUES DE RECHERCHE	122
	CONCLUSION	124

LES RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	126
ANNEXE 1.....	134
ANNEXE 2.....	137

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1.0: RÉSUMÉ DE LA REVUE DE LITTÉRATURE.....	21
TABLEAU 2.0 : CARACTÉRISTIQUES DES ENTREPRISES COMPRISES DANS L'ÉCHANTILLON34	
TABLEAU 3.0 : EXTRAITS D'ENTREVUES PORTANT SUR L'AMÉLIORATION DE LA CONCEPTION	47
TABLEAU 4.0 : EXTRAITS D'ENTREVUES PORTANT SUR L'AMÉLIORATION DE LA PRODUCTION.....	70
TABLEAU 5.0 : EXTRAITS D'ENTREVUES PORTANTS SUR LA MAINTENANCE ET L'ENTRETIEN DES PRODUITS	85
TABLEAU 6.0 : EXTRAITS D'ENTREVUES PORTANT SUR LA RÉSISTANCE À L'UTILISATION DE L'INDUSTRIE 4.0.....	98

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1: CATÉGORIES HYBRIDES REGROUPANT L'ÉCONOMIE CIRCULAIRE ET L'I4.0 (ROSA ET AL., 2020, PAGE 1678).....	18
FIGURE 2 : MODÈLE D'AFFAIRE D'EXTENSION DE LA DURÉE DE VIE DES PRODUITS (TRADUCTION LIBRE DE ERTZ ET AL., 2019A, PAGE 874)	31
FIGURE 3 : SCHÉMATISATION DES AXES DE SOUTIEN DE L'INDUSTRIE 4.0 À L'EXTENSION DE LA DURÉE DE VIE DES PRODUITS À TRAVERS LES ACTIVITÉS DE L'ENTREPRISE.....	85

LISTE DES ABRÉVIATIONS

3D	Trois dimensions
CQP	Certitude de la qualité du produit
EDVP	Extension de la durée de vie des produits
FA	Fabrication additive
I4.0	Industrie 4.0
IA	Intelligence artificielle
IdO	Internet des objets
LaboNFC	Laboratoire sur les nouvelles façons de consommer
MAEDVP	Modèle d'affaires de l'extension de la durée de vie des produits
R&D	Recherche et développement
UN	Nations unies
WEF	Forum économique mondial

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

1.1 CONTEXTE DE L'ÉTUDE ET PRÉSENTATION DU SUJET

L'augmentation de la production de déchets est alarmante et n'est pas étrangère à celle de la population mondiale, de son urbanisation et de son industrialisation (Han et al., 2019, Rotich et al., 2005). Le contexte de mondialisation de l'économie favorisant l'émergence de pays en développement, où les niveaux de vie augmentent, crée un essor de la demande de biens et donc une augmentation exponentielle de la quantité de produits en fin de vie (Minghua et al., 2009). De surcroît, notre mode de vie et de consommation repose encore aujourd'hui essentiellement sur le type d'économie linéaire qui part du postulat que les ressources sont infinies et qui consiste à les extraire pour fabriquer des biens qui, une fois utilisés, seront jetés (Le Moigne, 2014). L'obsolescence programmée des produits est, de surcroît, une stratégie utilisée par les entreprises consistant à faire en sorte que les consommateurs devront renouveler leurs biens de manière précipitée (Rivera et Lallmahomed, 2016). Les biens produits sont souvent de courte durée ce qui a pour effet de propulser les ventes, mais aussi la quantité de déchets (Solczak, 2013, WEF, 2020). Or, nous constatons que la quantité de déchets est maintenant alarmante et le deviendra encore plus si nous ne changeons rien. En effet, selon la Banque mondiale (2018) la quantité annuelle de déchets au niveau mondial en 2016 était de 2,01 milliards de tonnes mais pourrait augmenter de 70% d'ici 2050 si rien n'est fait pour la réduire.

D'autre part, l'internet et la numérisation permettent aujourd'hui aux technologies de l'information et de la communication de gérer des systèmes cyber physiques qui supportent la collecte et le partage d'informations en temps réel, on parle d'une nouvelle révolution

industrielle. Cette révolution, appelée aussi « industrie 4.0 », propulse de nouveaux modèles d'affaires et génère de la valeur à travers de grandes chaînes d'approvisionnement (Götz et Jankowska, 2017). À l'ère où le changement est quotidien et les enjeux environnementaux sont d'actualité, il est impératif de se pencher sur les « éco-opportunités » que recèlent les innovations. Afin de promouvoir un type de consommation qui a un impact environnemental plus faible, il est pertinent de mettre en lumière des stratégies et des technologies qui permettent de créer de la valeur de manière durable. Au-delà du recyclage et du compostage de la matière, le prolongement de la durée de vie des produits durables et semi-durables comporte un ensemble de stratégies qui fait en sorte d'allonger la vie utile des produits et répond à ce besoin de durabilité (Khan et al., 2018). Les technologies de l'industrie 4.0 ont le potentiel de participer à l'extension de la durée de vie des produits. Ce champ d'études doit être nourri afin d'outiller les acteurs influant et de participer à la promotion du mouvement nécessaire et crucial qu'est le développement durable.

Les organismes internationaux émettent d'ailleurs des recommandations qui vont dans le sens du développement durable et de l'économie circulaire pour résoudre les enjeux ainsi créés. Yamaguchi (2018) ainsi que les Nations Unies (UN) promeuvent aussi ces concepts entre autres à travers les 17 cibles pour un développement durable et par l'émission de recommandations pour l'établissement de « modes de consommation et de productions durables » (UN, 2015). Le développement durable est donc la réponse actuellement largement diffusée et promulguée (UN, 2015) aux problématiques environnementales, particulièrement à celles concernant les quantités exponentielles de déchets générées par une consommation internationale effrénée et grandissante (Kaza et al., 2018). L'économie circulaire est une branche de ce développement durable et implique plusieurs acteurs qui permettront d'en faire un nouveau mode de production et de consommation. D'un autre côté, les technologies numériques sont identifiées comme ayant le potentiel de favoriser le développement durable (UN, 2015) tout en générant aussi une quantité grandissante et alarmante de déchets chaque année (WEF, 2020). Ces technologies numériques sont citées comme levier puissant pour l'industrie par Kagerman et al. (2013) et leurs attributs donne lieu à une nouvelle révolution industrielle, maintenant en cours, souvent nommée « industrie 4.0 ».

Or, il existe actuellement un manque dans la littérature scientifique en ce qui a trait à l'exploration des mécanismes qui pourraient permettre à l'industrie 4.0 de réduire l'obsolescence des produits. Le présent mémoire s'intéresse aux bénéfices que peuvent fournir les technologies issues de l'industrie 4.0 à la durabilité des produits, plus particulièrement à l'extension de la durée de vie des produits (EDVP), dans les industries de fabrication. Le concept d'extension de la durée de vie des produits englobé par l'économie circulaire se limite aux activités qui permettent l'utilisation d'un produit en conservant la fonction pour laquelle il a été fabriqué (Cooper dans Ertz et al., 2019a). Le présent mémoire prend en compte certaines technologies qui y sont incluses soit la fabrication additive, l'Internet des Objets, les mégadonnées et l'intelligence artificielle. Plus spécifiquement, il s'agit ici d'explorer les impacts de chacune des technologies sur les stratégies d'EDVP. Le présent document répond donc à la question suivante : de quelle manière les technologies de l'I4.0 contribuent-elles aux stratégies d'extension de la durée de vie des biens durables et semi-durables produits par les entreprises manufacturières?

La présente recherche se différencie des autres, dans le domaine du numérique et de l'économie circulaire, en ce qu'elle se concentre sur la fabrication et l'extension de la durée de vie des produits. Elle s'inspire et poursuit les recherches de Ertz et al. (2019 a, 2019 b) qui s'intéressent aux modèles d'affaires du domaine particulier de l'extension de la durée de vie des produits. Elle s'inscrit dans ceux de Rosa et al. (2020) qui ont déterminés que les relations qui unissent les technologies à l'économie circulaire semblent si fortes qu'il est possible de parler « d'économie circulaire numérique » ou « d'industrie 4.0 circulaire ». Enfin, les résultats de cette recherche offrent des arguments que pourront utiliser les institutions et organismes de soutien au développement économique afin de stimuler les entreprises à acquérir ou utiliser les technologies numériques en vue de l'extension de la durée de vie de leurs produits. Un état des lieux plus exhaustif quant au niveau d'adoption des technologies numériques des entreprises, par région, par industrie ou à des niveaux plus macroéconomiques, permettrait d'identifier les actions à poser envers les entreprises. L'étude des retombées possibles de la mise en place de politiques, de programmes ou de

législations favorisant ou contraignant les organisations à agir stimulerait le mouvement vers l'économie circulaire. La présente étude espère donc servir à approfondir les bénéfices que l'industrie 4.0 peut apporter à la durabilité des objets que les entreprises produisent afin de défricher ce domaine de recherche prometteur pour une concrétisation du développement durable.

C'est donc une étude qualitative exploratoire de type inductive qui est présentée ici, ayant pour données des verbatims de 20 entretiens tenus auprès de différents acteurs, tous au fait de la technologie au sein de leur organisation, œuvrant dans 8 entreprises manufacturières québécoises de la région du Saguenay Lac St-Jean. Une analyse des données méthodique par codage axial, ouvert et sélectif a permis de déterminer quatre grands thèmes. Trois de ces thèmes démontrent l'apport de l'industrie 4.0 à l'extension de la durée de vie des produits et un thème identifie les résistances des entreprises à l'adoption des technologies numériques.

Le document présente d'abord le sujet à l'étude, son contexte, la problématique qui est adressée, les objectifs qu'elle compte réaliser et les contributions de l'étude. Une revue de littérature est ensuite présentée, divisée entre les stratégies d'EDVP et l'industrie 4.0. Le contexte théorique est ensuite dressé, exprimant les concepts de base concernant les technologies englobées par celui d'industrie 4.0, l'EDVP ainsi que les modèles d'affaires d'EDVP. La méthodologie est ensuite présentée et détaillée. Suivent ensuite les résultats divisés selon les 4 grands thèmes qui sont ressortis de l'analyse des données. Une discussion des résultats, une analyse de ces derniers ainsi que le modèle théorique émergent de l'étude sont enfin exposés. Les implications théoriques et managériales sont présentées et sont suivies des limites, conséquences et avenues de recherches futures

1.2 EXPLICATION DÉTAILLÉE DE LA PROBLÉMATIQUE

Selon Kaza et al. (2018) de la Banque Mondiale, la quantité globale de déchets générée annuellement est passée de 1,3 milliard de tonnes annuellement en 2012 à une estimation de 2 milliards de tonnes en 2016. Une augmentation de plus de 150% en 4 ans. Cette fluctuation est principalement due à l'urbanisation ainsi qu'à l'augmentation de la population et la croissance de sa prospérité (Kaza et al., 2018). Le stade de fin de vie des produits, propulsé par l'obsolescence programmée en tant que « stratégie pour raccourcir la durée de vie des produits », est aussi en cause dans la quantité de produits se retrouvant dans les sites d'enfouissements ou dans l'écosystème (Rivera et Lallmahomed, 2016, p.119).

Le développement durable ainsi que la « consommation et la production responsables » sont d'ailleurs des buts fixés par les Nations Unies en (2015). L'imputabilité et les possibles solutions à ce problème grandissant reposent principalement sur les entreprises, mais les chercheurs, les consommateurs et les autorités ont aussi un rôle à jouer (Rivera et Lallmahomed, 2016). La recherche et les organismes internationaux se penchent sur le développement durable et, de manière plus concrète, l'économie circulaire pour tenter de transiter entre le modèle traditionnel de production linéaire (matière première-production-utilisation-rebut) qui génère une grande quantité de déchets et un « modèle plus intégré : un écosystème industriel » d'utilisation et de valorisation des ressources (Frosch et Gallopoulos, 1989, p.1).

L'économie circulaire, concept émergent en réponse aux problèmes écologiques adressés par différents acteurs, a pour but de conserver une valeur économique et environnementale aux produits le plus longtemps possible par des stratégies qui permettent d'étendre leur cycle de vie ou par d'autres permettant leur réutilisation (den Hollander & al. 2017). Par ailleurs, les pratiques qui permettent de prolonger le cycle de vie d'un produit seraient moins énergivores et consommatrices de matières premières que celles qui permettent de fermer la boucle comme le recyclage ou le compostage (Mihelcic et al., 2003). Les stratégies

d'extension de la durée de vie des produits sont d'un intérêt majeur, mais la littérature scientifique les concernant est peu étayée (Ertz et al., 2019b).

Pour parler d'extension de la durée de vie des produits (EDVP), le concept de durée de vie d'un produit doit être introduit. La durée de vie d'un produit est reliée à sa vie utile soit à la "période durant laquelle le produit reste intègre et réutilisable afin d'exécuter la fonction principale pour laquelle il a été manufacturé" (traduction libre de Cooper, 2016 et Cooper 2018 cités dans Ertz et al., 2019b p. 1). Il est pertinent de distinguer le concept de durée de vie des concepts de vie utile, référant à l'intégrité des fonctions initiales (van Nes et Cramer, 2003) et de vie technique, référant au potentiel de fonctionnalité physique du produit (Cooper, 2010). La durée de vie d'un produit "commence donc avec le début de son usage suite à sa fabrication et se termine lorsqu'il devient obsolète et qu'aucune récupération ou reprise n'est possible", ceci excluant son recyclage ou son compostage (traduction libre de den Hollander et al., 2017 p.3). Un produit n'a donc qu'une seule durée de vie, mais pourrait avoir plusieurs cycles de vie s'il est réutilisé plusieurs fois. Den Hollander et al. (2017) définissent le cycle de vie du produit comme étant une "période débutant soit au moment de sa fabrication ou après sa récupération puis se terminant lorsqu'il devient obsolète" (traduction libre de den Hollander et al., 2017, p.3). L'obsolescence fait référence ici à une perte de perception de valeur provenant parfois d'une réduction de la fonction du produit (Box, 1983 cité dans den Hollander et al., 2017). La rétention et la conservation de la valeur des produits sont d'ailleurs les fondements de l'économie circulaire selon Stahel (1998, cité dans Bakker et al., 2014). Il est donc possible d'augmenter la durée de vie d'un produit en ralentissant son cycle de vie ou en multipliant ses cycles de vie (den Hollander et al., 2017).

D'autre part, le développement durable pourrait bénéficier de la technologie, puissant levier contribuant à l'augmentation de la productivité des entreprises et à la croissance économique. Le concept d'industrie 4.0 (I4.0) représente un nouveau courant technologique depuis 2011, certains parlent d'une 4^e révolution industrielle (Kagermann et al., 2013). L'I4.0 représente à la fois les technologies de l'information ainsi que les technologies virtuelles tout en favorisant une orientation vers les services et la flexibilité de fabrication (Jabbour et al.,

2018). L'I4.0 permet encore une fois de nouvelles possibilités autant pour les organisations, pour les consommateurs que pour les autorités (Ghobakhloo, 2020). Il est entendu que les innovations numériques auraient le potentiel de faire le lien entre le développement industriel et les objectifs environnementaux de développement durable (Beier et al., 2020 et Ghobakhloo, 2020). Les mégadonnées, partagées par connectivité en temps réel et analysées par intelligence artificielle, ainsi que la fabrication additive, pourraient servir à utiliser les ressources plus efficacement et judicieusement à travers toute la chaîne de valeur (Jabbour et al., 2018). De surcroît, il est impératif de faire en sorte que les équipements électroniques, de plus en plus utilisés, servent au développement durable alors que les déchets qu'ils génèrent représentent une menace par leur augmentation alarmante de plus de deux millions de tonnes par année (Forti et al., 2020, Beier et al., 2020 et Ghobakhloo, 2020).

1.3 PRÉSENTATION DES OBJECTIFS ET QUESTIONS DE RECHERCHE

Cette recherche a pour objectif d'explorer les relations actuelles qui existent dans les entreprises québécoises entre les technologies de l'I4.0 et le prolongement du cycle de vie des produits en prenant la perspective de leur positionnement dans des modèles d'affaires d'extension de la durée de vie des produits. Plus spécifiquement, il s'agit d'explorer les impacts de chaque technologie sur les stratégies d'EDVP. La question de recherche suivante est donc l'objet de cette étude : de quelle manière les technologies de l'I4.0 contribuent-elles aux stratégies d'extension de la durée de vie des biens durables et semi-durables produits par les entreprises manufacturières?

1.4 IDENTIFICATION DES CONTRIBUTIONS DE L'ÉTUDE

Alors que l'I4.0 est la composante principale du progrès dans la durabilité des produits et services selon Tariq (2021), la présente étude participe à établir l'état des lieux concernant l'utilisation des technologies de l'I4.0 et les incidences qui en découlent sur les activités d'extension de la durée de vie des produits. Elle est d'une utilité différente pour les divers

acteurs intéressés par l'économie circulaire et le développement durable. Elle permet de constater quelles sont les retombées directes et indirectes de l'utilisation des technologies de l'I4.0. Certaines études empiriques ont été menées sur des technologies précises auprès de secteurs ou d'industries circonscrites dans les domaines de l'économie circulaire. C'est le cas de la recherche de Charnley et al. (2019) portant sur l'intelligence artificielle et le réusinage des pièces d'occasion dans l'industrie automobile. C'est aussi le cas de la recherche de Ingemarsdotter et al. (2019) qui est circonscrite à l'Internet des Objets et ses liens avec l'économie circulaire ainsi que celui de Sun (2021) qui, toujours en lien avec l'Internet des Objets, est circonscrite à une plateforme de partage de vélos à Pékin. La présente étude se démarque, car elle prend en compte un ensemble de technologies et d'activités d'extension de la durée de vie des produits, ce qui mène à une analyse holistique. Cela permet de démontrer les opportunités à exploiter pour les entreprises désireuses de s'y investir.

Les modes de vie et de travail sont en transformation majeure depuis que la 4^e révolution industrielle est en route et les changements dans le domaine du numérique progressent très rapidement (Ghobakhloo, 2020). Le rapport sur les risques mondiaux du Forum économique mondial WEF (2021) met au premier rang les risques climatiques et identifie les possibles inégalités numériques à venir. La crise sanitaire actuelle a propulsé l'utilisation des technologies de l'information tout en fragilisant plusieurs entreprises. Un risque de « stagnation dans les économies avancées » (traduction libre, WEF, 2021, p.9) met de la pression sur les autorités et gouvernements, qui ont tout avantage à être informés des impacts et des applications des nouvelles technologies afin de prendre les bonnes décisions en matière de résilience organisationnelle, ce qui inclut des orientations en termes d'éducation, de législation et d'investissements. Une telle recherche empirique permet de préciser les éléments à privilégier pour les recherches subséquentes dans le domaine scientifique et favorise l'identification des éléments à promouvoir ou à contraindre par les autorités en droit de légiférer afin de créer un terrain fertile à l'établissement d'une économie circulaire.

CHAPITRE 2

REVUE DE LA LITTÉRATURE

La notion d'industrie 4.0 ou de 4^e révolution industrielle est évoquée pour la première fois par le gouvernement allemand en 2011 (Rupp et al., 2021). Le concept I4.0 est d'abord l'étendard du développement des technologies numériques et de l'information et est présenté comme une vision de développement impliquant le « réseautage des ressources, des informations, des objets et des gens pour créer un Internet des Objets et des services » (traduction libre, Kagermann et al., 2013, p.13). Elle est depuis devenue une tendance d'importance dans le système de production (den Hollander et al., 2017). L'économie circulaire est, pour sa part, apparue dans le langage scientifique dans les années 80 et faisait déjà la distinction entre le prolongement de la durée d'utilisation des produits et la transformation de biens d'occasions en ressource par des opérations de recyclage (Stahel, 2016). Ensuite, le concept a été utilisé comme une suite logique aux recommandations du rapport Brundtland de la Commission mondiale sur l'environnement et le développement (1987) qui évoquent le concept de « développement durable » pour lier les enjeux environnementaux au développement économique. Depuis, la littérature scientifique augmente autour des thèmes liant ces deux courants que sont l'économie circulaire et l'I4.0. Le concept d'extension de la durée de vie des produits, en réponse à l'obsolescence programmée, est un concept plus précis qui est exploré plus récemment dans la littérature scientifique (Ertz et al., 2019a). Les liens qui l'unissent à l'I4.0 et les recherches empiriques restent peu nombreux.

2.1 LES STRATÉGIES D'EDVP

L'extension de la durée de vie des produits (EDVP) est un concept qui a été davantage abordé par les chercheurs du point de vue des entreprises et de leur recherche de proposition de valeur comme en témoignent les recherches de Khan et al. (2021), de Nußholz (2018) et de Ertz et al (2019, 2019b). Les concepts primaires ont émergé des travaux de Stahel (1982) qui a proposé deux stratégies distinctes pour répondre aux besoins de durabilité. L'extension de la durée de vie des produits en était une et la fermeture de la boucle de vie des produits représentant les activités de recyclage et de compostage en étaient une autre. Il est donc important de rappeler que les activités de recyclage et de compostage servent à fermer la boucle de la vie des produits et n'entrent pas dans l'EDVP. Stahel (2016) a aussi identifié plusieurs activités permettant l'EDVP soit la réparation, la réutilisation et le réusinage. Toutes ces activités servent à prolonger l'emploi du produit pour la même utilisation que celle pour laquelle il a été fabriqué, ce que les activités de fin de vie comme le recyclage et le compostage ne font pas.

Les activités d'EDVP s'expriment dans les organisations par des modèles d'affaires différents. Le cadre traditionnel du modèle d'affaires décrivant de quelle manière les entreprises créent, livrent et captent la valeur (Osterwalder et al., 2005) a servi de base pour les chercheurs (Ertz et al., 2019a, 2019b; Whalen, 2019) qui ont classifié les modèles d'affaires circulaires et durables. Plus récemment, des articles ont paru sur la description plus précise de modèles d'affaires permettant le prolongement de la durée de vie des produits (Ertz et Patrick, 2020, Ertz et al. 2022). Les travaux de Nußholz (2018) ont permis d'identifier des outils et des interventions à privilégier pour développer de nouveaux modèles d'affaires circulaires. Cet outil de développement sert de base aux travaux subséquents sur les modèles d'affaires favorisant le prolongement de la durée de vie des produits.

Les travaux de Nußholz (2018) se basent sur trois stratégies principales axées sur la valeur ainsi que sur quatre types d'activités au cours de la durée de vie du produit, pour développer un outil permettant d'identifier les interventions à privilégier lors du développement de

nouveaux modèles d'affaires circulaires. Les stratégies exposées sont donc celles de *proposition de valeur* c'est-à-dire l'offre et la clientèle cible, de *création et livraison de valeur* soient les méthodes utilisées (partenaires, activités...) et de *capture de la valeur* du produit soit les coûts et les flux de revenus. Les interventions d'affaires identifiées sont les suivantes : celles afférentes à la vente initiale qui permettent une *utilisation prolongée du produit* par la qualité élevée, l'accès à des pièces de remplacement ou à un guide de réparation, celles afférentes à la *récupération et la réintégration des produits* après leur utilisation comme la facilitation des retours par la gratuité de l'expédition et l'information aux utilisateurs quant à la possibilité de retourner leurs produits en lien avec l'état de leur produit, celles en lien avec la *vente de pièces de rechange ou de produits usagés* comme la conception facilitant la réparation et la revente des produits et enfin, celles permettant la *récupération des matériaux* comme la collaboration avec des partenaires qui font le recyclage des matières et la conception facilitant le désassemblage des produits. Cet outil de développement sert de base aux travaux poursuivis sur les modèles d'affaires favorisant le prolongement de la durée de vie des produits.

Whalen (2019) publie ensuite une recherche qui a pour but de définir des archétypes de modèles d'affaires qui favorisent l'extension de la valeur des produits (MAEVP) et de déceler le potentiel de contribution que chacun de ces archétypes recèle pour augmenter l'efficacité énergétique. Trois archétypes de modèles d'affaires ressortent de cette étude et se basent sur le cadre de modèles d'affaires développé par Nußholz (2018). Ces trois archétypes de modèles d'affaires sont les *facilitateurs*, qui ne comportent que peu ou pas du tout d'interaction avec les produits (c'est le cas des réseaux d'interaction de courtage pour relier virtuellement les fournisseurs et les consommateurs), les *redistributeurs*, qui comportent un peu ou plus d'interactions physiques avec les produits (les entreprises qui rassemblent, inspectent et réemballent les produits de seconde main) et les *faiseurs*, qui œuvrent directement en interaction avec les produits (les activités de réparation ou de remise à neuf de produits par exemple). Ils sont décrits de manière théorique et conceptuelle. Les activités des entreprises sont organisées selon leur degré d'interaction physique avec le produit. Le potentiel d'efficacité énergétique est présenté sous forme d'éléments à considérer et de recommandations et ne se fonde pas sur des bases quantitatives, mais sur diverses recherches

relatives à la littérature sur ce sujet. Davantage d'études doivent être menées pour approfondir et rendre plus concrète la contribution des MAEDVP choisis par les entreprises à l'efficacité énergétique. La présente recherche est plutôt théorique et conceptuelle et offre un premier défrichage dans la classification des modèles d'affaires de prolongement de la valeur des produits. Il est pertinent d'adresser ces questions dans l'état des recherches actuelles et surtout d'y inclure la notion d'impact environnemental, considérant le contexte mondial et les enjeux de pollution.

Un cadre de référence de modèles d'affaires de l'extension de la durée de vie des produits (MAEDVP) est développé par Ertz et al. (2019a). Une revue systématique de 150 organisations est réalisée pour établir une taxonomie, basée sur le canevas développé par Osterwalder et Pigneur (2010), des modèles d'affaires qu'ont développés ces entreprises utilisant des activités d'EDVP pour créer de la valeur. Sept regroupements sont faits à partir de deux variables clés, soit les partenaires centraux (pairs et organisations) et les activités clés (de conception améliorée soit un design permettant une meilleure qualité, de réparation des produits ou leur mise à jour pour une plus longue utilisation, d'accessibilité soit la location et la mise en commun de produits, de maintenance par la réparation, de services-conseils, de consultation ou de formation, de redistribution par les dons, les échanges ou les marchés de biens de seconde main et de reprise incluant le réusinage, la remise à neuf ou le réemballage) desquels sept types de modèles d'affaires émergent. Le type A, *produit relationnel en tant que service*, consiste à offrir des services d'entretien, de soutien technique, de récupération et de réparation. C'est le cas de l'entreprise Blackburn et Blackburn à Ville Saguenay, qui vend des produits de bureau et offre le service de soutien technique et de réparation sur les équipements vendus tels les caisses enregistreuses. Le type B, *produits de cultivation brick & click*, fournit systématiquement des services d'entretien et de récupération tout en favorisant parfois aussi la redistribution, l'accessibilité et le réusinage. Ce sont des entreprises comme les concessionnaires automobiles qui offrent le service d'entretien mais aussi de reprise des véhicules d'occasion pour les réparer et les offrir à leur clientèle par la suite. Le type C, *concepteurs de produits de qualité*, représente des entreprises qui se centrent sur une conception de haute qualité ainsi que parfois sur l'entretien et la récupération par la réparation des produits. Il peut s'agir de d'entreprises offrant des produits de luxe comme

Rolex ou des entreprises offrant des produits de consommation de masse de qualité supérieure comme Arcteryx. Le type D, *vendeurs de seconde main*, se concentre sur la redistribution. C'est le cas des entreprises comme Ebay ou les friperies du Groupe Coderr. Le type E, *commerces de systèmes d'accès*, représente des entreprises qui promeuvent l'accès uniquement aux organisations via des plateformes transactionnelles de réseautage, par des magasins ou par des points de chute fixes. On peut y retrouver les entreprises de partage de véhicule Communauto ou celles de partage de vélo comme Bixi à Montréal. Le type F, *courtier d'accès entre pairs*, représente principalement des plateformes interactives permettant autant aux consommateurs qu'aux organisations de faire l'échange de produits entre eux. On peut retrouver dans ce type l'entreprise Airbnb permettant de louer son appartement pour les particuliers mais aussi pour les entreprises hôtelières et les investisseurs immobiliers de ce secteur. Le type G, *marchés de redistribution des consommateurs*, ne fait que de la redistribution, en s'approvisionnant uniquement par les pairs et en impliquant principalement ceux-ci ainsi que parfois les entreprises dans les échanges. C'est enfin le cas des plateformes comme Kijiji et Marketplace, permettant d'offrir ou de trouver des objets de seconde main sans offrir la possibilité de transaction en ligne. La précision des concepts de base, des variables utilisées, l'approche quantitative nouvelle dans ce champ d'études et l'étendue de l'échantillon favorisent l'émergence d'un cadre de référence systématique, holistique, intégrateur et généralisable qui est utile comme fondement à de plus amples recherches. De plus, il met en lumière le rôle important des consommateurs, qui est souvent ignoré par la littérature, dans le développement de stratégies d'EDVP. Il est intéressant de souligner que les modèles d'affaires les plus larges et impliquant davantage les consommateurs sont utilisés majoritairement par les grandes entreprises, ce qui laisse sous-entendre l'ampleur des ressources nécessaires à leur mise en œuvre. Enfin, il ressort de cette recherche que les entreprises favorisent davantage les stratégies de cultivation (*nurture*) des produits, c'est-à-dire celles relatives à l'utilisation au cours de la durée de vie du produit comme la maintenance, l'accessibilité, la redistribution et la reprise, plutôt que celles centrées sur la nature (*nature*), c'est-à-dire centrées sur l'utilité du produit par une conception améliorée des produits et des processus de production (Cox et al., 2013 et Ertz et al., 2019a).

La méthodologie proposée dans le précédent article, soit le cadre des MAEDVP, est présentée plus en détail par Ertz et al. (2019b). De plus, une analyse du même échantillon est faite, cette fois, en couplant les variables d'activités clés et de sources de revenus (frais de courtage, d'usage et d'abonnement, location et vente de produits). De cette analyse ressortent 5 groupes de modèles d'affaires différents. Le groupe V regroupe des manufacturiers et est le plus répandu. Les entreprises le composant ont des activités d'entretien, de récupération et, dans une moindre mesure, d'amélioration de la conception. Il est question d'entreprises telles Cisco et IBM. Le groupe W est bien représenté par les manufacturiers automobiles, ils réalisent presque toutes les activités d'EDVP sauf l'amélioration de la conception et font des affaires entre entreprises ou avec les consommateurs. Le groupe X réalise des activités de redistribution et de revente tout en favorisant l'accessibilité et en participant à l'amélioration de la conception. Les organisations de ce type favorisent les affaires entre consommateurs, par exemple Kijiji et LesPAC. Le groupe Y focalise sur l'accessibilité par la location ou l'abonnement en favorisant les échanges entre entreprises et consommateurs. On y retrouve les entreprises d'autopartage comme FLEX et Communauto. Le groupe Z se spécialise dans l'accessibilité en permettant la mise en place de marchés où les consommateurs peuvent partager entre eux des biens. Ces résultats permettent à la fois aux entreprises de se positionner par rapport à la concurrence et de déterminer leurs opportunités ou les besoins qui ne sont pas comblés. De plus, la méthodologie utilisée démontre la flexibilité du MAEDVP. En effet, il est donc possible de partir de différentes variables pour créer des regroupements, démontrant le potentiel que cet outil recèle pour de futures recherches innovantes tout en étant rigoureux dans les relations qu'il permet d'établir entre la théorie et les données.

Trois études de cas sont ensuite réalisées par Ertz et Patrick (2020) pour explorer les opportunités d'EDVP par les contractants tiers qui approvisionnent le secteur médical en produits dans les institutions de santé. Le but est de savoir « comment l'EDVP peut contribuer à la durabilité dans le secteur de la santé » (traduction libre, Ertz et Patrick, 2019c, p.2). Les analyses de cas démontrent que l'EDVP peut être un outil précieux pour le modèle d'affaires principal des entreprises tierces. Elle se divise en deux stratégies maîtresses soit celles de nature et celles de cultivation bien qu'aucune entreprise étudiée n'utilise les deux

stratégies simultanément. Enfin, cette étude démontre que les entreprises de toutes tailles sont en mesure de tirer avantage d'un MAEDVP. D'autres parties prenantes du système de santé pourraient être explorées plus en détail en lien avec le MAEDVP ainsi que les systèmes de santé dans d'autres pays et régions.

Laitala et Klepp (2020) ont réalisé une étude quantitative concernant la durée de vie des vêtements, et ce sur un large échantillon étendu à plusieurs pays. La durée de vie est établie selon le nombre d'utilisations, le nombre d'utilisateurs et le nombre d'années d'utilisation. Cette étude démontre qu'il est possible de déterminer les facteurs contribuant au prolongement de la durée de vie des vêtements. Certains facteurs faisant varier la durée de vie sont des conditions sur lesquelles les entreprises n'ont pas de contrôle, comme la démographie ou la nationalité, mais il est alors possible d'identifier quelles mesures auront une plus grande influence. D'autres variables sont influençables par des actions organisationnelles, c'est le cas du prix de vente ou des habitudes envers la mode. Cette étude arrive à expliquer entre 11% et 43% la variation de la durée de vie des vêtements, ce qui suggère que d'autres éléments restent à identifier pour soutenir l'extension de la durée de vie dans le domaine du textile et du prêt-à-porter.

Une étude empirique quantitative est réalisée par Sun (2021) qui exploite la dynamique des systèmes permettant l'évaluation de l'impact des programmes de flottes de vélos partagés sur la durée de vie des vélos et sur le potentiel transitionnel qu'il recèle à diriger un système global de vélos urbain vers la durabilité. Le cas de la plateforme de vélos partagés « *Beijing (Pékin) free-floating sharing* » est au cœur de cette analyse. Cette organisation se retrouve dans chacune des cinq activités principales du MAEDVP et utilise à la fois des stratégies de nature et de cultivation. Bien que ce ne soit pas l'objet de l'étude, il est à noter qu'elle utilise des technologies relatives à l'I4.0 dans ses pratiques comme les mégadonnées et l'Internet des Objets. Il apparaît que ce type de plateforme et de modèle d'affaires permet d'augmenter la durée de vie des vélos ainsi que leur utilisation quotidienne. La quantité de données limitée à cette seule organisation et la courte période analysée laisse place à d'autres études plus étendues afin de valider ces résultats, semblant conclure à un potentiel pour ces types

d'organisation à promouvoir la transition vers une économie circulaire dans le domaine des vélos partagés.

2.2 L'INDUSTRIE 4.0

L'appellation « industrie 4.0 » est introduite en 2011 pour promouvoir un projet stratégique de développement du secteur industriel par le gouvernement allemand et le concept fait alors référence à la numérisation de la production (Rupp et al. 2021). Selon cette vision, il sera dans l'avenir possible d'intégrer les technologies dans toute la chaîne d'approvisionnement et de créer des « systèmes de production cyber physiques », aussi appelées « usines intelligentes » (Kagermann et al., 2013).

Bien que, dès son introduction, il y ait eu beaucoup d'intérêt pour le concept, il n'y a pas de consensus sur la définition de l'I4.0 dans le domaine de la recherche (Hofmann et Rüsçh, 2017). Nosalka et al. (2020) offrent une revue de littérature récente et une cartographie pour définir le concept d'I4.0, ou ce que d'autres appellent la 4^e révolution industrielle. Ils constatent que l'I4.0 contient plusieurs enjeux ainsi que plusieurs opportunités, qu'elle est souvent énoncée par une description de ses éléments constitutants et que sa définition diffère selon les perspectives prises pour la décrire. Peu d'auteurs en offrent une définition concise. Les études ne convergent pas toutes sur les technologies qui sont comprises dans la notion d'I4.0. Notons par exemple que Jabbour et al. (2018) identifient les systèmes cyber-physiques, la fabrication connectée, l'Internet des Objets et la fabrication additive (impression 3D) comme les technologies relatives à l'I4.0 alors que Rupp et al. (2021) y incluent aussi l'usine intelligente, les mégadonnées, l'informatique en nuage, l'intelligence artificielle ainsi que les technologies de communication et d'information en temps réel.

Maintenant que l'extension de la durée de vie des produits et l'industrie 4.0 ont été cernés, la littérature démontre aussi que certains auteurs traitent du sujet émergent que représente la synergie entre ces deux thèmes. Plusieurs revues systématiques de littératures mettent en

relation l'économie circulaire et certaines technologies qui réfèrent à l'industrie 4.0. C'est le cas de celles de Rosa et al. (2020) et de Ingemarsdotter et al. (2019). Pour leur part, Charnely et al. (2019) et Aziz et al. (2021) démontrent que les mégadonnées et les algorithmes de calcul peuvent favoriser la réparation de produits. Enfin, Ertz et al. (2021) confirment le lien entre l'I4.0 et l'EDVP tandis que Ertz et al. (2022) poursuivent en regroupant les articles traitant d'I4.0 et d'EDVP dans une revue de littérature.

2.3 L'INDUSTRIE 4.0 ET LES STRATÉGIES D'EDVP

Plus largement, de grands espoirs sont fondés sur l'I4.0 pour soutenir les objectifs de développement durable. Il est démontré par Beier (2017) que les entreprises du secteur manufacturier considèrent l'I4.0 comme ayant un grand potentiel pour utiliser plus efficacement les ressources et l'énergie, voire une possible synergie permettant la « fabrication environnementalement durable » (de Sousa Jabour et al., 2018). L'I4.0 est un concept très étudié, et ce à partir de plusieurs perspectives. Une cartographie récente de la littérature concernant le développement durable et l'I4.0 est publiée par Khan (2021) et démontre que les recherches plus précises concernant l'économie circulaire et l'I4.0 ne sont pas les plus nombreuses et que ce champ aurait avantage à être mieux étudié.

Le lien entre l'économie circulaire et l'I4.0 a été démontré et confirmé par Rosa et al. (2020) dans une revue de littérature systématique qui avait pour but de découvrir de quelle manière l'I4.0 influence l'économie circulaire et de classer les relations identifiées. Elle révèle combien ce champ d'études est récent puisque 96% du nombre de documents relatés proviennent des 5 dernières années. Le quart des articles trouvés traitent en tout ou en partie de la gestion du cycle de vie et suivent, pour la grande majorité, une perspective théorique. Les documents utilisés prennent en considération toutes les technologies étudiées par la présente étude, mais en plus grande majorité la fabrication additive, l'Internet des Objets puis la simulation, suivent dans une moindre mesure les mégadonnées et leur analyse. D'une perspective technologique, les systèmes cyber physiques sont perçus comme des facilitateurs pour améliorer la gestion du cycle de vie des produits. Dans l'ensemble, l'I4.0 est considéré

comme un facilitateur de l'économie circulaire mais des études restent à réaliser pour identifier les contributions technologiques précises qu'elle peut y apporter. Enfin, les relations décrites entre l'I4.0 et l'économie circulaire sont si fortes et nombreuses que les termes « Circular I4.0 » et « Digital CE » sont énoncés pour les adresser.

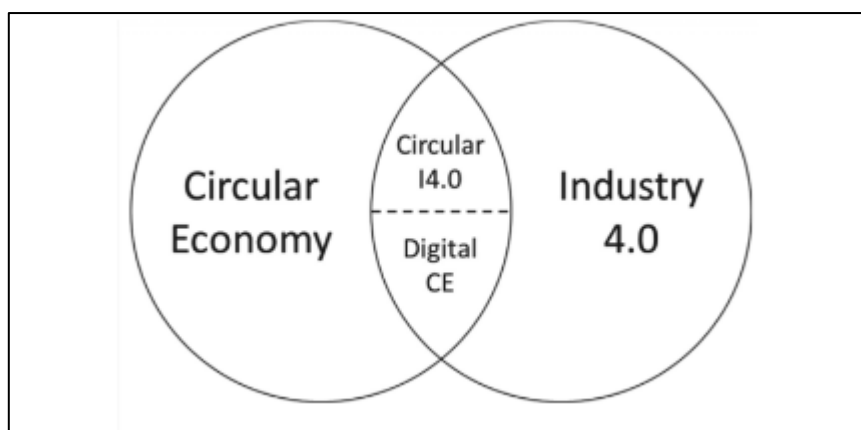


Figure 1: Catégories hybrides regroupant l'économie circulaire et l'I4.0

(Rosa et al., 2020, p. 1678) Utilisation permise sous licence CC-BY-NC-ND 4.0

Dans un article publié par Charnley et al. (2019), la simulation, rendue possible par les mégadonnées, est mise en relation avec l'économie circulaire. Il s'agit d'une étude qualitative et quantitative auprès de 5 entreprises qui font du réusinage de pièces d'automobile. Le réusinage est une activité d'EDVP (Ertz et al., 2019a) et consiste à remettre une pièce dans une condition qui permet de lui garantir une qualité aussi haute que le produit neuf, prolongeant son cycle de vie de manière considérable. Il implique plusieurs étapes et sa complexité est influencée par l'état du produit retourné. La « Certitude de la qualité du produit » (CQP) est le concept proposé par Charnley et al. (2019) pour évaluer cet état. Parmi les éléments utilisés pour calculer l'indice CQP, soit la condition physique du produit, l'historique de pièces réusinées et de celles remplacées, ce sont les données provenant de capteurs qui étudient l'état des pièces qui sont déterminantes. Il apparaît que l'indice CQP permet de prévoir le temps que passera une pièce dans le processus de réusinage et le nombre de produits qui pourront être réusinés. Cette certitude de qualité du produit devient ainsi un outil de prise de décision. Éventuellement, la technologie *blockchain* deviendrait-elle

nécessaire pour sécuriser les données ainsi colligées? Le concept CQP, basé sur des mégadonnées, servirait donc à estimer le cycle de vie d'un produit et à déterminer la stratégie circulaire optimale.

La nature des liens entre l'Internet des Objets et l'économie circulaire est explorée par Ingemarsdotter et al. (2019) afin de découvrir comment les entreprises utilisent l'Internet des Objets et dans quelles stratégies circulaires cette utilisation se situe. Une structure d'analyse est développée selon deux dimensions, soit celle des opportunités offertes par l'Internet des Objets et celle des stratégies d'économie circulaire. L'EDVP est ici distincte de la réutilisation et du réusinage. Une analyse et une catégorisation de 40 entreprises de diverses industries utilisant toutes l'Internet des Objets est réalisée et entrée dans une cartographie de structure d'analyse. Il en ressort tout d'abord que l'utilisation de l'Internet des Objets supporte significativement plus les stratégies d'efficacité durant l'usage et l'EDVP qu'au cours de la réutilisation, du réusinage, du recyclage ou de l'amélioration de la conception. Ces découvertes participent aux conclusions de Ertz et al. (2021) qui observent que les technologies de l'I4.0 contribuent actuellement plutôt aux activités de maintenance, d'accès et de mutualisation ainsi que de redistribution puis dans une moindre mesure, à promouvoir la récupération et la conception améliorée des produits.

L'intelligence artificielle au service de la conception de produits pour qu'ils soient plus facilement réparables ou restaurables à l'aide de la fabrication additive est un concept qui est exploré récemment par Aziz et al., (2021). Leur recherche se situe dans le domaine de la reprise (réparation, restauration), une activité efficace d'extension de la durée de vie des produits (Ertz et al., 2019a). Elle compare les méthodes conventionnelles aux méthodes automatisées à l'aide de la fabrication additive. Ces dernières ont avantage à être soutenues au stade de développement de produit par une conception optimisée prévoyant le réusinage pour favoriser le succès de sa récupération et de son retour dans un nouveau cycle de vie. L'intelligence artificielle est une technologie apte à traiter une grande quantité de données qualitatives et quantitatives. Plusieurs techniques d'intelligence artificielle sont analysées afin de découvrir celles qui sont les plus pertinentes pour la conception en vue de réusiner un

produit par fabrication additive. Les conclusions de cette étude démontrent que l'utilisation de la fabrication additive est plus performante et efficace que les méthodes conventionnelles et manuelles pour les activités de réparation et de restauration, et ce, si elle est supportée par une conception basée sur son utilisation. Pour ce faire, une approche intégrée utilisant des méthodes hybrides combinant l'algorithme génétique à d'autres techniques d'intelligence artificielle est nécessaire. Selon ces auteurs, le réusinage réalisé à l'aide de la fabrication additive pourrait se révéler être la stratégie circulaire la plus efficace, mais encore beaucoup de recherches doivent se faire sur le sujet en ce qui concerne les techniques et les approches en intelligence artificielle.

Ertz et al. (2021) démontrent le lien entre l'I4.0 et la durée de vie des produits dans une perspective de marketing. Ils décrivent l'I4.0 selon 4 technologies soient la fabrication additive et l'Internet des Objets (composantes physiques) et les mégadonnées et l'intelligence artificielle (composantes analytiques). Les 5 activités d'EDVP identifiées dans le MAEDVP de Ertz et al. (2019a) (amélioration de la conception des produits, accessibilité, maintenance, redistribution et reprise) servent de bases pour démontrer dans quelle mesure les éléments se conjuguent pour favoriser une « consommation durable ». La fabrication additive est représentée au centre et supportée par le réseau que forment les relations entre les mégadonnées, l'Internet des Objets et l'intelligence artificielle. Les auteurs remarquent que les activités d'EDVP les plus supportées par l'industrie 4.0 sont l'accès, la maintenance et la redistribution tandis que la récupération et la conception améliorée reçoivent moins d'apports. Ce constat soutiendrait « quoiqu'indirectement, la thèse d'une obsolescence programmée » (Ertz et al., 2019a, p. 295).

Ertz et al. (2022) réalisent une revue systématique de littérature regroupant des articles liant l'Industrie 4.0 et l'EDVP. Cette revue de littérature est fondée sur 131 articles, conceptuels et empiriques et se base sur quatre technologies clés pour définir l'industrie 4.0 soit : la fabrication additive, l'Internet des Objets, les mégadonnées et l'intelligence artificielle. Les conclusions suggèrent que les technologies numériques promeuvent l'EDVP et ce, pour ses cinq activités clés que sont l'amélioration de la conception, l'accessibilité,

l'entretien, la redistribution et la reprise. Il est aussi démontré que les technologies interagissent synergiquement et non de manière isolée les unes des autres. Les données récoltées par l'Internet des Objets fournissent des mégadonnées qui, forées par l'intelligence artificielle, permettent de tirer des informations pertinentes pour la conception, l'amélioration et la prise de décision alors que la fabrication additive enrichie les scénarios ainsi identifiés et augmente les possibilités par l'adaptation et la personnalisation. Enfin, les auteurs établissent une planification des recherches qui pourraient être menées afin de vérifier les conclusions de cette recherche et d'approfondir les liens qui unissent l'industrie 4.0 et l'EDVP.

Tableau 1.0: Résumé de la revue de littérature

Stratégies d'EDVP			
Référence	Stratégie EDVP	Méthodologie	Résultats
Nußholz (2018)	Stratégies : proposition de valeur, création et livraison de valeur et capture de valeur. Activités : rassemblement et intégration des matières, première vente, ventes supplémentaires et récupération de la matière.	Développement d'un cadre conceptuel et d'un outil d'identification à partir d'une revue de littérature. Expérimentation et analyse de l'outil par études de cas.	Développement d'un outil visuel permettant de représenter les modèles d'affaires circulaires, les éléments qui les composent et les cycles de vie du produit sur lesquels il est possible de cibler les modèles d'affaires afin de prolonger la vie utile des produits et des pièces. Une étude de cas pilote est présentée pour démontrer les opportunités que fournit l'outil.
Whalen (2019)	Classification des MAEDVP en fonction de trois archétypes soit: facilitateurs, redistributeurs et faiseurs.	Exploratoire, empirique, qualitative par analyse de revue de littérature.	Augmentation du potentiel d'efficacité énergétique en fonction de la proximité de l'interaction entre les produits et l'entreprise, celle-ci étant directe, indirecte ou sans interaction suivant les différentes stratégies afférentes aux archétypes faiseurs, redistributeurs ou facilitateurs.

Ertz et al. (2019)	Amélioration de la conception des produits, accessibilité, maintenance, redistribution et activités de reprise.	Élaboration d'une taxonomique à partir d'une revue de littérature systématique.	Élaboration d'une taxonomie des modèles d'affaires d'EDVP comportant sept dimensions (activités et partenaires clés, canaux, segments de clientèle, type de relation avec le consommateur, offre et source de revenus). Regroupements des dimensions d'activités et de partenaires clés pour découvrir sept modèles d'affaires avec prévalence pour les stratégies de cultivation.
Ertz et al. (2019)	Amélioration de la conception, accessibilité, maintenance, redistribution et activités de reprise.	Méthodologie mixte. Étude qualitative, empirique et inductive et analyse quantitative.	Validation quantitative du MAEDVP. Regroupements des dimensions activités clés et sources de revenus. Cinq stratégies d'affaires différentes et confirmation de l'utilité du MAEDVP.
Ertz et Patrick (2019)	Amélioration de la conception des produits, accessibilité, maintenance, redistribution et activités de reprise.	Recherche qualitative empirique exploratoire par études de cas.	Démonstration que les stratégies de MAEDVP s'adaptent à toutes les tailles d'entreprises. Les stratégies de nature semblent plus difficiles à mettre en œuvre dans les grandes organisations.
Laitala et Klepp (2021)	Conception, utilisation et accessibilité.	Approche quantitative, méthode statistique d'analyse de régression.	Identification des facteurs qui permettent l'EDVP des vêtements. Les variables principales qui influencent le nombre d'utilisations d'un produit réfèrent à la nature de l'utilisation de celui-ci, celles qui font varier le nombre d'utilisateurs réfèrent aux propriétés du vêtement alors que toutes les variables étudiées contribuent à influencer la longévité du vêtement soit le vêtement, son utilisation, l'utilisateur et les pratiques vestimentaires.
Sun (2021)	Système d'accès géré par le commerçant.	Analyse quantitative, empirique, basée sur la théorie de la dynamique des systèmes et le MAEDVP.	Les systèmes de gestion de partage de vélos ont un potentiel pour faire augmenter le volume d'utilisation et la durée de vie d'un vélo et réduire l'échelle d'approvisionnement globale du système urbain global, et ce jusqu'à

			une certaine taille de flotte au-delà de laquelle la rentabilité de l'entreprise est réduite.
L'industrie 4.0			
<u>Référence</u>	<u>Technologies</u>	<u>Méthodologie</u>	<u>Résultats</u>
Kagermann et al. (2013)	IdO et des services, systèmes cyber-physiques, usines intelligentes	Rapport de recommandations stratégiques pour la mise en œuvre de l'industrie 4.0 dans le système économique en Allemagne.	Des actions sont recommandées dans certains secteurs d'activités qui sont : l'architecture de référence et de standardisation, la gestion de systèmes complexes, l'infrastructure industrielle, la sécurité, le design et l'organisation du travail, la formation et le développement continue au niveau professionnel, le cadre réglementaire et l'efficacité des ressources.
Hofmann et Rüsçh, 2017	IdO et des services, systèmes cyber-physiques, FA et usines intelligentes.	Recherche d'approche conceptuelle avec un modèle d'application à deux dimensions soit : la chaîne d'approvisionnement physique et la chaîne des valeurs des données numériques.	L'industrie 4.0 révèle différentes opportunités en termes de décentralisation, d'auto-régulation et d'efficacité. Les bénéfices de l'industrie 4.0 se trouveraient dans la réduction des effets de coup de fouet, dans la transparence et l'intégration de la chaîne d'approvisionnement et dans l'amélioration de la planification de la production.
Nosalka et al., 2020	Systèmes mécatroniques et automation, software et technologies de l'information, données et mégadonnées, FA, connectivité et réseautage ainsi que systèmes de gestion.	Revue de littérature systématique par méta analyse.	Élaboration d'un cadre de définition de l'industrie 4.0 regroupant des concepts organisationnels, techniques et de nouveaux modèles d'affaires qui sont guidés par les besoins des consommateurs et les exigences de personnalisation de masse.
Jabbour et al., 2018	Systèmes cyber-physiques, internet des objets, fabrication nuagique et FA.	Approche intégrative pour lier l'industrie et la durabilité d'un point de vue environnemental.	L'I4.0 a le potentiel de favoriser la fabrication durable et la synergie entre ces deux concepts dépend de onze éléments critiques de succès qui sont décrits dans la présente étude.

Rupp et al. (2021)	IDO, mégadonnées, information nuagique, IA et technologies de communication.	Revue de littérature systématique et analyse bibliométrique.	La définition suivante est élaborée : « L'industrie 4.0 est la mise en œuvre de systèmes cyber-physiques pour créer des usines intelligentes en utilisant l'Internet des objets, les mégadonnées, l'information nuagique, l'intelligence artificielle et les technologies de communication pour l'information en temps réel sur l'ensemble du territoire et tout au long de la chaîne de valeur » (traduction libre).
--------------------	--	--	--

Industrie 4.0 et stratégie d'EDVP

<u>Référence</u>	<u>Technologies</u>	<u>Stratégie EDVP</u>	<u>Méthodologie</u>	<u>Résultats</u>
Rosa et al. (2020)	FA, mégadonnées IA, systèmes cyber-physiques, IdO, simulation	Réduction de l'utilisation des ressources par la conception intelligente des systèmes, des produits et de l'utilisation de la matière. Fermeture de la boucle lors de la fin de vie des produits.	Revue de littérature systématique et analytique.	Relations spécifiques et influences entre l'économie circulaire et l'I4.0 démontrées selon chaque perspective. Impact possible de l'I4.0 sur la gestion du cycle de vie des produits.
Charnley et al. (2019)	Simulation, mégadonnées, IdO, intelligence numérique, réusinage intelligent.	Reprise (réusinage).	Étude qualitative empirique. Démarche explicative par étude de cas, entretiens et observations.	La « certitude de la qualité du produit » (CQP) permet de mettre en relation les données récoltées à propos d'une pièce usagée retournée pour en évaluer l'état, identifier les processus de réusinage nécessaires à sa remise en état et le temps nécessaire pour la rentabilité de l'exercice.

Ingemarsdotter et al. (2019)	IdO	Efficacité, augmentation de l'utilisation, EDVP, réutilisation et réusinage.	Étude qualitative explicative par revue de littérature systématique et études de cas.	L'efficacité de l'utilisation et l'EDVP sont les stratégies qui bénéficient le plus de l'implantation de l'IdO. Quelques cas identifient l'IdO comme outil favorisant la réutilisation, le réusinage, le recyclage et l'évolution de la conception.
Aziz et al. (2021)	IA FA	Reprise (réparation et restauration)	Étude qualitative explicative par revue de littérature systématique comparative.	Les méthodes de restauration automatisées utilisant la FA sont plus efficaces et polyvalentes que les méthodes manuelles conventionnelles, mais doivent être soutenues par une amélioration de la conception. Les méthodes hybrides basées sur l'algorithme générique de l'IA augmentent l'optimisation du processus de conception-restauration.
Ertz et al. (2021)	FA IdO Mégadonnées IA	Activités clés du MAEDVP.	Étude qualitative exploratoire.	Sont démontrés les liens et les applications possibles des technologies de l'I4.0 pour réaliser les activités clés d'EDVP. Une interrelation est identifiée entre l'IdO, les mégadonnées et l'IA alors que la FA est une technologie pivot s'unissant aux précédentes.
Ertz et al. (2022)	FA IdO Mégadonnées IA	Activités clés du MAEDVP	Revue de littérature systématique.	Une revue de littérature systématique est présentée portant sur des études qui lient l'EDVP et l'industrie 4.0. Celle-ci confirme que les technologies numériques promeuvent l'EDVP et ce au cours des cinq activités clés selon le MAEDVP (amélioration de la conception, accessibilité, entretien, redistribution et reprise). Enfin, un planification des recherches à poursuivre sur le sujet de l'EDVP et de l'industrie est proposée.
Note	MAEDVP	Modèle d'affaire de l'extension de la durée de vie des produits		
	EDVP	Extension de la durée de vie des produits		
	FA	Fabrication additive		
	IdO	Internet des Objets		
	IA	Intelligence artificielle		
	I4.0	Industrie 4.0		

CHAPITRE 3

CADRE THÉORIQUE

3.1 INDUSTRIE 4.0 - 4 TECHNOLOGIES

Plusieurs définitions existent pour décrire l'industrie 4.0 et les auteurs la définissent en fonction de la position des acteurs qui s'y intéressent, tel que l'ont démontré Nosalka et al. (2020). La présente étude s'intéressant à comprendre comment les différentes technologies la composant peuvent favoriser l'extension de la durée de vie des produits au sein d'entreprises de fabrication, il est pertinent de s'arrêter sur un cadre théorique qui établit clairement les technologies qui sont prises en compte ainsi que le modèle d'affaires dans lequel elle prend forme. C'est pourquoi la définition utilisée par Ertz et al. (2021) en étudiant les modèles d'affaires d'extension de la durée de vie des produits est particulièrement pertinente.

L'I4.0 favorise et suppose une intégration verticale et horizontale ainsi qu'une flexibilité et une intégration des processus et de la chaîne d'approvisionnement qui sont supportés par des données disponibles en temps réel, ce qui permet d'offrir un service ou un produit personnalisé (Kagermann et al., 2013). Elle est « orientée vers les technologies numériques et virtuelles et est centrée sur les services » (traduction libre, Jabbour et al., 2018, p.19). Elle regroupe deux dimensions soit celle des « infrastructures et processus » avec la fabrication additive et l'Internet des Objets et celle des « capacités analytiques » avec les mégadonnées et l'intelligence artificielle (Ertz et al., 2021, p. 280). Selon cette catégorisation, dans la présente étude, quatre grandes technologies seront retenues pour circonscrire le concept d'I4.0 soit la fabrication additive, l'Internet des Objets, les mégadonnées et l'intelligence artificielle. Nous les définissons plus en détail.

La fabrication additive (FA), aussi appelée impression 3D, est une avancée technologique importante et fait référence à une technique d'addition de matière par couches successives à partir d'un modèle de données informatisées (ASTM, 2012, cité dans Aziz et al., 2021). Cette technique est en développement rapide et permet de nouvelles méthodes de fabrications et de nouvelles opportunités (Sauerwein et al. 2019). Dans une perspective de durabilité, cette technique permettrait une conception plus libre, des formes plus complexes, le *sur mesure*, une localisation de la production, la durabilité ainsi que la standardisation et la compatibilité (Ertz et al., 2021).

L'Internet des Objets réfère à la connectivité et l'interaction des données entre les objets par des capteurs et des modes de communication sans fil (Rosa et al., 2020). Les principales opportunités qu'offre l'Internet des Objets à la durabilité des produits sont la possibilité de faire un suivi des produits, de leur utilisation, de leur localisation, de leur état, de les contrôler à distance, de colliger des mégadonnées et de soutenir l'intelligence d'affaires et l'intelligence artificielle (Ertz et al., 2021). L'Internet des Objets est intimement lié aux mégadonnées.

Les mégadonnées représentent « un actif d'informations caractérisé par un grand volume, une grande vélocité et une variété et qui requiert des technologies et des méthodes d'analyses spécifiques pour leur donner de la valeur » (traduction libre, De Mauro et al., 2020). Ertz et al. (2021b) y ajoutent la véracité comme caractéristique, car ces données sont objectives. Les données sont souvent récoltées par capteurs et informent sur l'historique du produit, son utilisation, ses paramètres comme sa température, la tension ou la pression ce qui permet d'évaluer son état. Ces données doivent être forées et analysées afin de devenir des informations utiles.

L'intelligence artificielle « implique d'utiliser des méthodes basées sur des comportements intelligents des humains et d'autres animaux pour résoudre des problèmes complexes » (traduction libre, Coppin, 2004, p.4). Elle utilise des mégadonnées et l'Internet des Objets et fait des analyses et des reconfigurations automatiques et systématiques, ce qui

fait qu'elle est capable d'une certaine forme d'apprentissage (Ertz et al., 2021). En forant dans les mégadonnées, les approches par intelligence artificielle ont le potentiel de découvrir de l'information pertinente qui pourrait servir à la prise de décision (Awan et al., 2021) ou à générer des informations de manière holistique en tenant compte des conditions et éléments relatifs aux parties prenantes d'une chaîne d'approvisionnement (Gupta et al., 2019). De plus, elles peuvent réaliser des analyses permettant des avancées significatives dans différents domaines d'EDVP. En effet, comme le démontrent Whang et al. (2021), l'IA peut supporter une meilleure conception des produits, et ce autant pour répondre à la demande du marché, pour personnaliser la fabrication que pour prévoir la réparation et le démontage du produit en fin de vie. Toujours selon Whang et al. (2021), elle peut aussi permettre une meilleure satisfaction lors de l'utilisation des produits par une interaction avec les consommateurs et fournir de meilleurs services après-ventes tel l'entretien préventif qui prévient les défaillances avant qu'elles ne surviennent.

3.2 DURÉE DE VIE ET EXTENSION DE LA DURÉE DE VIE DES PRODUITS

La durée de vie des produits semble diminuer, en réponse à un besoin de croissance économique et de concurrence des entreprises, au profit de l'obsolescence des produits qui est précipitée de diverses manières (Bakker et al., 2014). L'obsolescence du produit est constatée lorsque ce dernier n'est plus considéré utile ou significatif par son utilisateur (Burns, 2010). L'obsolescence peut être temporaire et un produit peut donc retrouver une utilité, ayant ainsi plusieurs cycles de vie au cours de sa durée de vie (den Hollander et al., 2017). La durée de vie devient ici le concept clé de l'économie circulaire qu'il est possible de définir comme un principe qui a pour intention de conserver la matière dans un cycle fermé où « [...] la valeur économique et environnementale des matériaux est préservée le plus longtemps possible en les conservant à l'intérieur du système économique [...] » (traduction libre, den Hollander et al. 2017, p.517). L'économie circulaire se divise principalement en deux dimensions; la première étant le ralentissement du cycle de vie et la deuxième, le fait de fermer la boucle par des activités de fin de vie (Stahel, 1982).

L'extension de la durée de vie du produit (EDVP) est un concept qui cherche à contrer l'obsolescence en influençant les cycles de vie du produit et elle exclut donc les activités de fin de vie comme le recyclage et le compostage (Ertz et al., 2019a). Cox et al. (2013) ont décrit les activités d'EDVP en les divisant selon deux dimensions soit les activités de nature (*nature*), ayant trait à prolonger la vie d'un produit à travers une amélioration de sa conception, et des activités de cultivation (*nutrure*), ayant trait à prolonger la vie utile d'un produit par l'entretien, la réparation ou plusieurs activités impliquant le consommateur et d'autres acteurs ainsi que d'autres contextes. Dans la présente étude, les stratégies de nature comprennent l'amélioration de la conception et la production du produit afin de créer un produit qui dure et les stratégies de cultivation comprennent les activités qui prolongent la durée de vie ou permettent d'augmenter le nombre de cycles de vie du produit soit l'accessibilité (location, mise en commun ou le regroupement), l'entretien (maintenance, conseils, formation, soutien technique), la redistribution (don, échange ou marchés de seconde main) et la reprise (réparation, réusinage, remise à neuf ou reconditionnement), telles que divisées selon Ertz et al. (2019a).

3.3 MODÈLES D'AFFAIRES D'EXTENSION DE LA DURÉE DE VIE DES PRODUITS

La valeur économique est le moteur qui peut inciter les organisations à entrer dans l'économie circulaire. Les produits, et l'extension de leur durée de vie, sont en soi des ressources et représentent une valeur économique que les entreprises peuvent exploiter en utilisant divers modèles d'affaires (Ertz et al., 2019a). Il est important de définir la notion de modèle d'affaires pour situer les activités d'EDVP dans l'économie circulaire. Osterwalder et Pigneur (2010, p.19) définissent le modèle d'affaire comme « la façon dont une organisation crée, fournit et capture de la valeur » (traduction libre). Le canevas de modèles d'affaires développé par Osterwalder et Pigneur (2010) comprend neuf éléments constitutifs soit : le segment de clientèle, la proposition de valeurs, les canaux, les relations avec les consommateurs, les sources de revenus, les ressources clés, les activités clés, les partenaires clés et la structure de coûts.

Ertz et al. (2019a) ont développé une taxonomie pour classer les modèles d'affaires propres à l'extension de la durée de vie des produits (MAEDVP). Cette taxonomie regroupe sept dimensions empruntées au canevas du modèle d'affaires défini par Osterwalder et Pigneur (2010) soit : les activités clés, les partenaires clés, les canaux, les segments de clientèle, les relations avec les consommateurs, l'offre de valeur et les sources de revenus chacune définie par des sous-dimensions. Deux dimensions du modèle d'affaires ont été omises pour différentes raisons. La structure de coûts n'a pas été incluse, car il était difficile d'obtenir des informations fiables à ce sujet et les ressources clés sont absentes en raison du fait qu'elles ne sont représentées que par les produits d'occasion dans le cas de l'EDVP. Les dimensions sélectionnées dans l'étude de Ertz et al. (2019a) peuvent être utilisées pour créer des regroupements de stratégies d'affaires que prennent les entreprises pour proposer, créer et livrer ou capter la valeur provenant de l'EDVP. En regroupant les caractéristiques des entreprises selon différentes dimensions, il est possible de classer et regrouper les stratégies d'affaires et les modèles d'entreprises. Ertz et al. (2019a et 2019b) ont choisi de créer des regroupements selon les activités clés et les partenaires clés dans une première étude puis de coupler les activités clés avec les sources de revenus dans une deuxième étude. Ceci a permis de mettre en lumière différents types et d'identifier les caractéristiques qui les démarquent, par exemple : produit relationnel en tant que service, cultivateurs de produits « *brick & click* », concepteurs de produits de qualité, gestionnaire de systèmes d'accessibilité, courtier d'accessibilité entre pairs et marché de redistribution aux consommateurs. Par ces regroupements, il est possible d'évaluer comment les organisations créent, distribuent et captent la valeur économique.

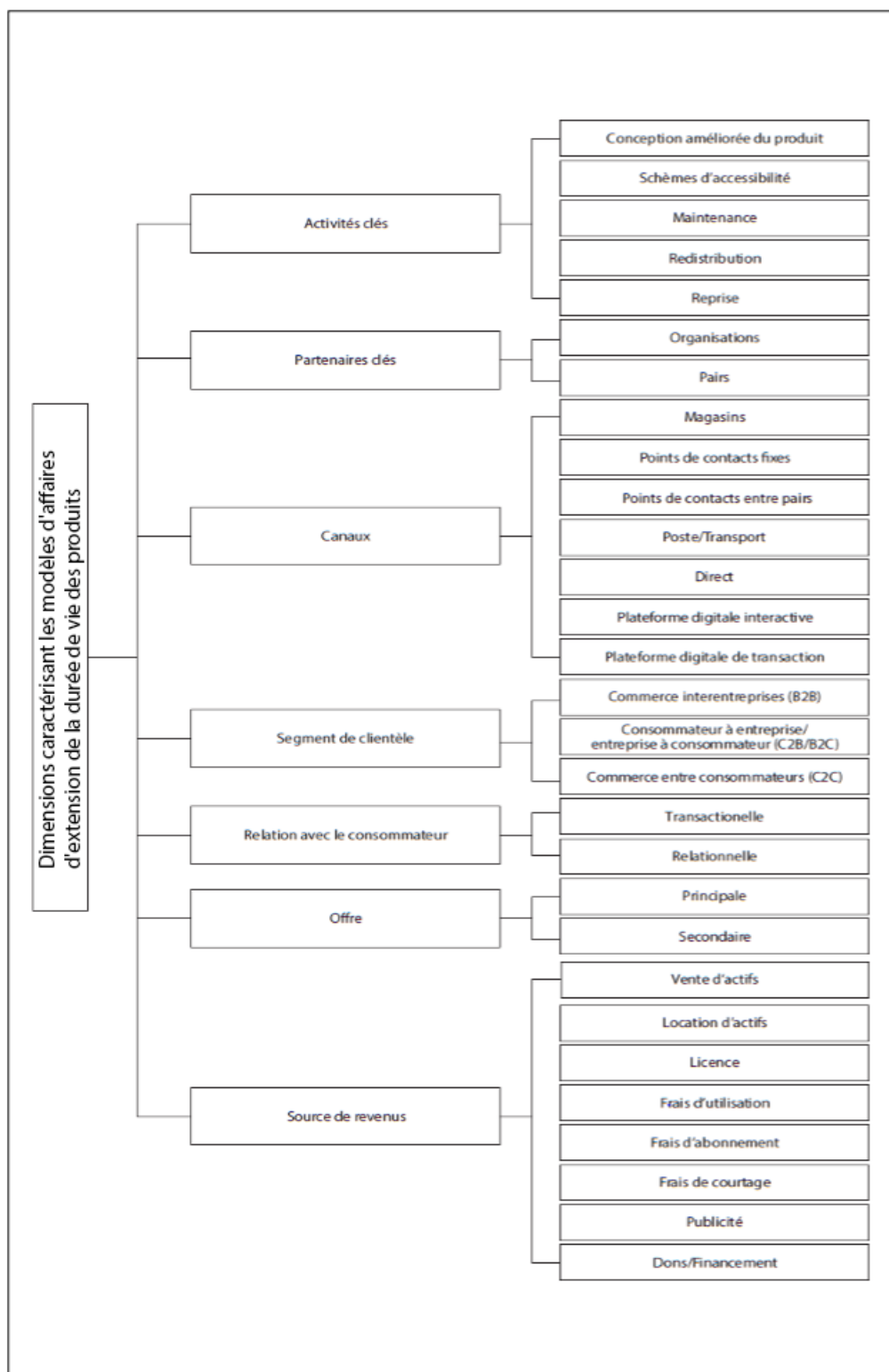


Figure 2 : Dimension caractérisant les modèles d'affaires d'extension de la durée de vie des produits

Traduction libre de Ertz et al. (2019a, p. 874). Reproduit avec permission.

CHAPITRE 4

DEVIS DE RECHERCHE

4.1 CADRE MÉTHODOLOGIQUE

Cette étude est une recherche qualitative et empirique, de nature exploratoire. Elle démarre sur des données primaires tirées de verbatims d'entretiens individuels réalisés par des chercheurs précédemment (Ertz et al., 2019). Une problématique de recherche en a ensuite émergé puis une revue de littérature a été réalisée afin d'affiner une question de recherche et de cerner les concepts relatifs à cette étude. L'exploration des liens entre l'I 4.0 et l'EDVP présents à travers les données s'est faite de manière inductive par une analyse méthodique des verbatims. Un codage axial, ouvert puis sélectif a été effectué avec l'aide du logiciel NVivo 12. Les résultats sont présentés et une analyse permet de découvrir un cadre conceptuel de l'apport de l'I4.0 à l'extension de la durée de vie des produits. Un retour vers la littérature est enfin réalisée afin de confronter et de comparer ces conclusions aux publications scientifiques.

4.2 ÉCHANTILLONNAGE

C'est avec l'intention d'explorer l'utilisation des technologies numériques relatives à l'I4.0 dans les entreprises que l'équipe du LaboNFC (Laboratoire sur les nouvelles façons de consommer) a fait le choix de l'échantillonnage et a réalisé la collecte de données. La portée de l'échantillon est le Saguenay Lac St-Jean. Le cadre d'échantillonnage de départ a été le Registraire des entreprises du Québec et la recherche a été affinée par zone géographique et en identifiant le type d'industrie comme étant manufacturière.

Cet échantillonnage non probabiliste orienté a été créé à partir d'un échantillonnage de convenance parmi le cadre d'échantillonnage, soit par choix raisonné parmi des répondants, connus des chercheurs, qui œuvraient au sein d'organisations ayant intégré l'I4.0 et qui étaient au fait des activités impliquant ces technologies dans l'entreprise. La constitution de l'échantillonnage s'est poursuivie par effet boule de neige par des références provenant des entreprises interrogées. L'échantillon comprend huit entreprises et vingt répondants. Les entreprises, toutes québécoises, œuvrent comme concepteurs de produits de qualité de type C selon le classement de modèle d'affaires d'extention de la durée de vie des produits (MAEDVP) fait par Ertz et al. (2019a) et ce, principalement dans les domaines des équipements électromécaniques, des pièces mécanosoudées et dans le textile. Elles sont de tailles différentes, allant de 8 à 425 employés. Certaines n'exploitent que le marché local et d'autres exportent une partie de leur production aux États-Unis et en Europe. Leur chiffre d'affaires se situe entre 500 000\$ et 115 M\$. Les répondants œuvraient dans différentes fonctions de l'entreprise comme le marketing, la recherche et développement ou la production. Tous les répondants sauf un avaient une bonne compréhension des concepts relatifs à l'industrie 4.0.

Le nombre de répondant pour chaque entreprise de l'échantillon fluctue grandement et cela est dû à la taille de ces entreprises. En effet, comme il s'agit de PME, certaines entreprises sont de plus petites tailles. D'autre part, les questions étant de nature très technique, le nombre de personnes en leur sein étant en mesure d'y répondre étaient parfois plus limité. De plus, la nature très pointue des questions fait en sorte qu'il faille parfois plusieurs personnes pour y répondre adéquatement. Parfois, plusieurs employés ou membres de la direction étaient identifiés par l'entreprise comme ayant le potentiel de pouvoir répondre aux questions. L'avis des dirigeants concernant les personnes à cibler dans l'organisation pour être interrogés était généralement pris en compte.

Le tableau suivant représente la composition de certaines caractéristiques de l'échantillonnage.

Tableau 2.0 : Caractéristiques des entreprises comprises dans l'échantillon

	Nombre d'employés	Secteur d'activité	Chiffre d'affaires	Fonction des répondants dans chaque entreprise
Entreprise 1	8	Couture commerciale	500 K	1 Répondant - Président directeur général
Entreprise 2	10	Assemblage mobilier hospitalier électromécanique	2 M	3 Répondants - Copropriétaire, responsable R&D et approvisionnement - Copropriétaire, président, responsable finances, ventes et marketing - Planificatrice de production et acheteuse
Entreprise 3	25	Couture industrielle et prêt-à-porter	Inconnu	2 Répondants - Présidente directrice générale - Directrice marketing
Entreprise 4	65	Couture, prêt à porter	8 M	2 Répondants - Directrice de production - Responsable marketing
Entreprise 5	100	Aéronautique et hautes technologies	46 M	1 Répondant - Directeur R&D et 4.0
Entreprise 6	150	Ingénierie, fabrication et installations pièces métalliques pour industrie minière	1,5 M	1 Répondant - Ingénieur et chargé de projet
Entreprise 7	200	Fabrication et exploitation de bornes de recharges électriques	50 M	7 Répondants - Président directeur général - Directeur des produits - Directeur assurance qualité - Directeur des opérations

				<ul style="list-style-type: none"> - Directeur du marketing - Concepteur mécanique R&D - Superviseur de production
Entreprise 8	425	Fabrication d'outillage de paysage	115 M	<p style="text-align: center;">3 Répondants</p> <ul style="list-style-type: none"> - Président directeur général - Vice-président et responsable approvisionnement, - Coordonnateur de la R&D

4.3 PROCÉDURE DE COLLECTE DE DONNÉES

La temporalité de la collecte de donnée s'est échelonnée entre décembre 2020 et février 2021. Les modalités de rencontre ont différé pour s'ajuster aux besoins des répondants. Généralement, les entretiens ont duré entre 50 et 70 minutes. Dans tous les cas, un enregistrement audio est réalisé. Afin de favoriser la fluidité des entretiens et d'instaurer une atmosphère propice à une telle démarche, certaines considérations sont incluses dans le guide d'entretien (annexe 1). Les considérations éthiques et de confidentialité sont spécifiées dès le départ de l'entretien puis, afin de favoriser la réciprocité entre le répondant et l'interviewer et afin d'établir une relation d'égalité, certaines modalités sont établies. Il est spécifié qu'il n'y a pas de réponse attendue et que les éléments à prioriser dans la discussion sont l'honnêteté et la spontanéité. Plusieurs questions sont prévues et sont divisées par sections selon les différentes technologies. Tout au long de l'entrevue, dans l'intérêt de permettre l'émergence de données, il est possible pour l'interviewer de se servir de ses propres connaissances et expériences ou des informations qui surgissent de la conversation et de diverger du guide d'entretien. Enfin, une question ouverte est suggérée à la fin de l'entretien pour que le répondant puisse ajouter des informations qu'il jugerait pertinentes une fois qu'il a mieux saisi l'objet de la recherche tout au long des questions qui lui sont posées. Dans un souci de crédibilité et de validité, l'interviewer revient systématiquement vers le répondant pour vérifier si sa compréhension est le reflet de ce qu'il a voulu exprimer. De plus, malgré une certaine fluidité et flexibilité dans le guide d'entretien, pour ajouter une considération quant à la fiabilité de la

recherche, l'interviewer reste toujours en position d'accueil des informations, sans se mettre dans une posture explicative ou descriptive qui pourrait faire avancer le propos dans une direction intentionnée et sans déborder du cadre des questions prévues.

La collecte de données s'est terminée lorsque la saturation théorique a été observée. Plus précisément, les chercheurs ont cessé de rencontrer des nouveaux répondants lorsque les nouvelles entrevues n'apportaient plus de nouvelles informations en lien avec les entrevues antérieures.

4.4 ORGANISATION ET ANALYSE DES DONNÉES

Les entretiens enregistrés de manière audio ont été retranscrits manuellement en verbatims et des résumés ont été réalisés par section (chaque technologie abordée individuellement). Les données ainsi colligées ont ensuite été analysées à l'aide du logiciel d'analyse de données qualitatives NVivo 12. La méthodologie de recherche qualitative par codage ouvert, axial puis sélectif a été utilisée pour analyser les verbatims, selon la méthode se rapportant à l'approche de la théorisation enracinée telle que décrite par Strauss et Corbin (1990) sans toutefois prétendre utiliser cette approche de manière intégrale en raison du fait que la présente étude est basée sur un cadre conceptuel et a été précédée d'une revue de littérature.

Une relecture scrupuleuse et objective des verbatims a donc été réalisée et a permis de faire un premier encodage. Ce « codage ouvert » (Boychuk Duchscher et Morgan, 2004, p.608) a fait ressortir plusieurs fragments de textes et des codes leur ont été attribués. Ces codes étaient classés selon différents critères, identifiants des liens entre l'utilisation des technologies de l'industrie 4.0 et la durabilité des produits à travers les activités réalisées par les répondants. Dans un deuxième temps, un « codage axial » (Boychuk Duchscher et Morgan, 2004, p.608) a été réalisé. La création de catégories a permis d'englober plusieurs critères s'y rapportant. Enfin, une fois que les codes et catégories étaient saturés, l'étape du « codage sélectif » (Boychuk Duchscher et Morgan, 2004, p.609) a offert l'émergence de thèmes qui guident et éclairent la compréhension des liens qui unissent l'EDVP et l'I4.0 dans les activités des organisations. À travers ce processus, l'utilisation

du logiciel NVivo 12 a favorisé le classement de codes et de catégories hors contexte, ce qui permis l'émergence d'un thème inattendu soit celui des résistances à l'utilisation des technologies numériques.

Suite à ces différents niveaux de codage, une immersion des données et des résultats a permis de faire émerger de grands axes de soutien. Ces derniers se trouvent à être des pivots, des variables qui recourent toutes les technologies et tous les thèmes pour démontrer l'apport de l'I4.0 à l'EDVP. Ce cadre conceptuel est décrit et schématisé dans le chapitre 5 portant sur les résultats de la présente recherche.

Parallèlement au développement du cadre conceptuel et à l'analyse des données, un retour vers la littérature a été réalisé afin de comparer ces découvertes à l'état des recherches. Cette dernière a permis de camper les éléments du cadre conceptuel, de constater des éléments qui le confirme et a susciter l'intérêt à vouloir éventuellement le valider par des recherches empiriques.

Dans le but de répondre à la question de recherche, un retour sur les résultats est fait dans une optique de corrélation avec le MAEDVP utilisé par les entreprises ciblées afin de stimuler l'émergence de nouvelles constatations et de liens indirects. L'analyse des résultats est donc réalisée de manière itérative par des retours entre les données et les résultats afin de tirer des conclusions qui répondent à la question de recherche.

La méthodologie de recherche choisie reflète un souci de validité en ce qu'elle utilise des données récoltées par une tiers partie inconnue de l'analyste principale. En effet, les données ont été récoltées par des entrevues dirigées par un seul et même chercheur qui avait des liens plus ou moins directs avec certains répondants, considérant la méthode utilisée pour faire l'échantillonnage. Or, aucun des répondant, aucune des entreprises ni ce chercheur qui a réalisé les entrevues n'est connu de l'analyste principal de la présente recherche qui a, à la fois, retranscrits les verbatims, codé les citations et analysé les résultats. D'autre part, les résultats des trois étapes de codage ainsi que du cadre conceptuel ont été triangulés par leur validation auprès d'une autre

chercheuse afin d'en confirmer et d'en ratifier les regroupements. Les thèmes retenus ainsi que les catégories les composant ont été choisies par consensus entre les chercheuses. Cette double validation assure la fiabilité des résultats.

Afin de s'assurer de la crédibilité des données, les verbatims d'entrevues ont été retranscrits à la main par écoute auditive et ce, à deux reprises. En effet, une première écoute à un rythme ralenti a été réalisée afin de retranscrire l'essentiel du message puis une seconde écoute à un rythme normal a été réalisée en parallèle d'une relecture pour assurer que les mots retranscrits suivaient exactement le verbatim des interviews. Il arrive donc que les citations présentées dans les résultats démontrent des cafouillages, aient une syntaxe erronée ou contiennent des anglicismes. Cela démontre bien la véridicité des propos relatés.

4.5 CONSIDÉRATIONS ÉTHIQUES

Un certificat éthique est octroyé par l'Université du Québec à Chicoutimi aux chercheurs Myriam Ertz, professeure et directrice du présent mémoire et Florian Gasteau en lien avec les données de cette étude et le numéro de ce certificat éthique est le 2021-634 (annexe 2). Plusieurs éléments sont pris en considération pour assurer aux participants la confidentialité de leurs témoignages ainsi que des méthodes de partage et d'archivage des enregistrements audios qui ont été réalisés. De plus, les répondants devaient signer un formulaire de consentement dans lequel étaient précisées les modalités entourant leur participation. Les participants n'ont reçu aucun privilège pour leur participation à l'étude et en ont été avisés.

Le guide d'entretien (annexe 1) a été conçu pour s'assurer d'une uniformité dans les interviews. Dans un souci de fiabilité, la définition des concepts abordés au cours de l'entretien est lue à chaque participant et les termes restent donc les mêmes tout au long de la recherche pour une compréhension univoque.

CHAPITRE 5

RÉSULTATS

5.1 AMÉLIORATION DE LA CONCEPTION

Les entreprises interrogées dans la présente étude utilisent plusieurs méthodes pour augmenter la durabilité et la longévité des biens qu'ils produisent. Selon les modèles d'affaires d'EDVP développé par Ertz et al. (2019 a), ils se situent tous dans la stratégie de « concepteur de produits de qualité » en réalisant des activités d'amélioration de la conception, d'entretien et de reprise. L'amélioration de la conception est donc une partie importante de leurs activités et, à ce titre, ils utilisent les technologies 4.0 dans leur processus. Les résultats démontrent que les mégadonnées recensées par l'Internet des Objets puis forées et analysées par intelligence artificielle ou par algorithmes permettent de mieux cibler les éléments à améliorer ou à réparer lorsqu'il s'agit d'un produit déjà en marché. De plus, les technologies de l'impression 3D et les logiciels de dessin et de fabrication comportant des modules de simulation participent aussi à favoriser l'amélioration de la conception. De surcroît, les technologies de l'I4.0 favorisent les communications avec les clients ce qui participe à répondre adéquatement à leurs besoins, créant ainsi des produits adaptés à leur utilisation de manière plus durable. Trois catégories ressortent dans ce thème soit une meilleure planification, la facilitation du prototypage ainsi que la correspondance aux besoins des utilisateurs.

5.1.1 MEILLEURE PLANIFICATION

Au tout début d'un processus de conception, l'identification et la planification des besoins et des requis est une étape cruciale. Certaines entreprises interviewées créent des statistiques et des

historiques d'utilisation en analysant les données recueillies par l'Internet des Objets, d'autres s'intéressent aux comportements d'achats et de magasinage en ligne de leurs clients et enfin, une seule utilise un scanner 3D pour identifier les mesures des objets ou des endroits où il sera nécessaire d'implanter leurs produits. Cela leur permet d'établir les besoins, les tendances, les modalités d'utilisation des produits et enfin de mieux planifier les attributs à élaborer ou à améliorer lors de la conception pour favoriser une meilleure durabilité. À partir des contraintes et des besoins ainsi identifiés, l'intervention des logiciels de dessin et de simulation permet d'évaluer plus de possibilités de conception que ne le ferait l'humain en fonction de prérequis et de normes données. Cette technologie d'intelligence artificielle couplée à l'Internet des Objets et à ses mégadonnées permet aussi de dessiner et de fabriquer des formes plus complexes pouvant pourtant mener à des assemblages plus simples, favorisant ainsi la qualité des produits. En effet, moins de soudures ou de pièces impliquent moins de points faibles. De plus, la fonction de simulation de ces logiciels permet de valider la solidité, la faisabilité et de visualiser les produits finis avant même de prototyper ce qui facilite et rend le processus de conception plus rapide, laissant plus de temps pour l'amélioration du produit avant sa mise en production.

Voici ce qu'un ingénieur mécanique œuvrant dans une entreprise de fabrication et d'exploitation d'équipements électromécaniques a énoncé en conclusion d'entrevue. Il faisait alors référence à l'ensemble des technologies de l'I4.0 qui permettent la planification et l'identification des éléments à prioriser pour favoriser l'extension de la durée de vie des produits:

« [...] c'est un peu en lien avec les capteurs, mais les signaux qui sont produit, fait que là on peut savoir, des fois, ah est-ce que c'est récurrent que des *the defects* soient liés à disons la température ou autre. Fais que ça c'est, il faut quand même compiler les données pour savoir quoi attaquer lors d'un concept d'une nouvelle borne. Quels éléments sont les plus importants pour assurer la durée de vie des bornes avec les données actuelles dans le champ des bornes. » - R6 – *Concepteur mécanique au département de la R&D, en charge de la recherche et développement, de la conception et de la mise en production.*

Un autre ingénieur mécanique, œuvrant dans le machinage de pièces mécanosoudées, était interrogé sur le logiciel de dessin qu'il utilisait, plus particulièrement sur la fonction de simulation à savoir s'il permettait une meilleure optimisation de la conception. Sa réponse met en lumière ce que l'intelligence artificielle permet de faire, c'est-à-dire évaluer exhaustivement toutes les possibilités de calcul et de conception puis, en fonction des requis identifiés, de déterminer la meilleure option:

« Bien supérieure à l'homme je pense que oui, dans ce sens-là, c'est de quoi qu'on n'aurait pas pensé. Elle, elle va tout essayer les possibilités possibles, comment, à quoi la pièce elle pourrait ressembler puis elle va te dire laquelle serait la meilleure dans le fond. » - R14 – *Ingénieur et chargé de projet au département des opérations.*

La possibilité de visualiser le rendu avant la conception que permet l'intelligence artificielle est ici exemplifiée. Une professionnelle en conception de vêtements de mode œuvrant dans le domaine du prêt-à-porter sport fait ici référence à un logiciel de dessin permettant de faire des simulations à partir de croquis et de matériaux :

« Ça ressemble presque à de la réalité. Tu peux voir, admettons, si tu as fait un vêtement pour courir, avec les paramètres, on pourrait voir comment ça ferait, si notre fit est bon, quand quelqu'un va courir avec. Comment ça va bouger, si notre matière est correcte. » - R12 – *Directrice de la production et en charge de l'équipe de R&D.*

5.1.2 FACILITATION DU PROTOTYPAGE

Le prototypage est une activité importante des équipes de recherche et développement lors de la conception (Baccino, 2009). Anciennement, il était surtout fait en bois ou en métal, processus parfois peu précis, long ou onéreux (Ertz et al., 2022). Les entrevues nous révèlent que les entreprises utilisent très fréquemment la fabrication additive pour prototyper actuellement, particulièrement les imprimantes 3D utilisant du plastique. Cette technologie est généralement

mise en commun avec l'intelligence artificielle et les logiciels de dessin. Elle permet tout d'abord une grande précision et une plus grande complexité des prototypes, ce qui favorise parfois une simplicité dans les assemblages comme cela a été expliqué précédemment. Cette précision permet aussi une meilleure adéquation avec la réalité. En y ajoutant sa rapidité de production, la fabrication additive permet de créer plus de points de validation fiables, favorisant un processus itératif et donc, une amélioration continue. La fabrication additive permet de voir et de toucher un prototype qui se rapproche davantage de la réalité et cela aide l'appréciation du concept. On rapporte que les ingénieurs, les directeurs de production ainsi que les équipes de marketing et les clients font partie des acteurs qui sont impliqués dans ces boucles de validation. Considérant que le temps alloué pour la conception est souvent fixe ou limité, la rapidité d'impression liée à la fabrication additive permet de consacrer plus de temps à faire évoluer les idées vers une plus grande qualité et durabilité des produits. D'autre part, le fait de prototyper si facilement avec une grande précision permet aussi de réduire les marges d'erreur. Des produits ainsi conceptualisés auront une plus grande durée de vie, car leurs caractéristiques seront optimisées, leur production se fera plus simplement, créant moins de stress sur la matière et leur rendu sera plus en lien avec les éléments identifiés comme requis lors de la planification.

Voici les propos d'un répondant œuvrant dans une entreprise de fabrication de mobilier électromécanique concernant l'évolution dans les méthodes de prototypage menant à l'utilisation de l'imprimante 3D. Il évoque un plus grand niveau de précision, une proximité avec la réalité et une réduction des marges d'erreur en utilisant cette nouvelle technologie :

« Tu sais, élaborer un concept sans l'imprimante 3D, avant d'avoir une imprimante 3D bien on pouvait faire, fabriquer des pièces en bois, là on essayait de tester nos concepts, nos principes puis c'est certain que c'est plus laborieux, c'est moins précis, tandis que quand on peut imprimer notre pièce, notre pièce qui va être éventuellement fabriquée en métal, mais on fait notre prototype pour valider le concept avec du plastique, c'est beaucoup plus précis. On peut voir où est-ce qu'il peut y avoir des problèmes potentiels donc, il y a moins de risque d'erreurs, entre le prototype ou entre le concept et la réalité. On est plus proche de la réalité

avec une imprimante 3D. » - R19 – *Président, copropriétaire et responsable des finances, des ventes et du marketing.*

La multiplication des points de validation est ici évoquée par un ingénieur électrique œuvrant dans une entreprise de fabrication et d'exploitation d'équipements électromécaniques, alors qu'on le questionnait sur la fabrication additive:

« [...] puisqu'on peut couper le développement en plusieurs points de validation grâce à un outil comme l'imprimante 3D, on peut s'assurer d'itérer puis de faire des versions incrémentales qui nous permettent de valider, être à l'aise, avant d'aller au prochain. [...] » - R4 - *Directeur des produits ayant pour rôle de supporter le cycle de vie du produit.*

Une validation facilitée par l'impression 3D, et ce pour plusieurs acteurs dans l'entreprise est ici évoquée par un administrateur et gestionnaire des opérations dans une entreprise de fabrication et d'exploitation de produits électromécaniques :

« [...] quand les gens de la R&D impriment un prototype pour, on a vu des exemples [...] sur un boîtier de borne. Bon bien, j'ai vu le rendu 3D, j'ai été capable d'insérer le pistolet, tu sais, j'ai été capable d'apporter mon appréciation puis en même temps, moi je suis plus un peu le commissionnaire ou je vais l'apporter à l'ingénierie de production qui va être capable de valider le dimensionnel, qui va être capable de valider le niveau, l'épaisseur. C'est plus de ce côté-là, mon équipe va avoir à le valider puis à le commenter puis à suggérer des modifications à partir des prototypes 3D qui sont imprimés. » - R2 – *Directeur des opérations manufacturières à l'usine de fabrication, en charge de l'équipe d'ingénierie de l'usine, du groupe d'achat et du groupe de production.*

La réflexion est poussée plus loin ici concernant l'apport de la rapidité de l'impression 3D à l'extension de la durée de vie des produits via une plus grande qualité. L'ingénieur mécanique

œuvrant dans une entreprise de fabrication de mobilier électromécanique (civière d'examen médicaux) spécifiait ceci concernant la fiabilité et la solidité de ses produits:

« Bien vu que c'est un procédé qui est assez rapide et peu *dispendieux*, vu qu'on le fait à l'interne, c'est on peut faire, des fois on le fait, on va faire évoluer, on va passer plus de temps sur un concept pour le faire évoluer le plus possible en faisant les versions imprimées 3D pour pousser le concept le plus loin possible pour le raffiner le plus possible pour justement qu'il soit de meilleure qualité au bout de la ligne, qu'il réponde mieux au besoin du client et à nos besoins aussi et à nos standards de qualité. » - R 18 – *Copropriétaire et responsable de la R&D et de l'approvisionnement.*

Enfin, un ingénieur mécanique œuvrant dans une entreprise œuvrant dans le machinage de pièces mécanosoudées soulignait l'amélioration qu'apportait la fabrication additive à l'évaluation de la réaction de la clientèle :

« L'impression 3D, on voit qu'il y en a beaucoup qui vont se faire des prototypes avec ça. Ça permet de faire des designs puis de pouvoir présenter mieux les produits aux clients. » - R14 – *Ingénieur et chargé de projet au département des opérations.*

5.1.3 CORRESPONDANCE AUX BESOINS DU MARCHÉ

L'I4.0 participe à mieux faire correspondre la conception des produits aux caractéristiques du marché à venir ainsi qu'aux besoins et réquisitions actuels des clients ou des utilisateurs. C'est tout d'abord par la récolte de mégadonnées et leur analyse que les organisations peuvent sonder l'environnement, identifier les tendances, déterminer les comportements d'utilisation et les habitudes et ainsi, anticiper les besoins et ajuster ou personnaliser les produits en conséquence des désirs et besoins. Ces informations sont tirées de données récoltées via l'utilisation des produits, les comportements de recherche et d'achats web mais aussi via la prise de mesures de précision qu'offrent certains scanners. De plus, la concertation est facilitée par les technologies de l'Internet

des Objets, offrant la possibilité de faire des visioconférences et le partage d'écrans. Ainsi, les composantes des produits peuvent être expliquées aux interlocuteurs puis validées avec les différentes parties prenantes représentant les destinataires du produit, soit le département du marketing de l'entreprise, les partenaires ou les clients et les utilisateurs eux-mêmes. Le fait d'éliminer la distance en communiquant virtuellement favorise un plus grand nombre d'échanges et donc de points de validation, permettant une itération plus nombreuse et une meilleure personnalisation des produits aux besoins du client et des utilisateurs. Des produits qui conviennent aux besoins et aux environnements, mais aussi des utilisateurs dirigés vers les produits adaptés à leurs besoins sont susceptibles de permettre l'extension de leur durée de vie.

Un ingénieur œuvrant dans une entreprise de fabrication de pièces mécanosoudées s'exprimait sur les avantages que représentaient les vidéoconférences pour s'entretenir avec leurs clients afin de mieux ajuster les réalisations aux besoins de ces derniers. Il soulignait pouvoir réaliser plusieurs réunions au besoin sans avoir à se déplacer, ce qui est pratique lorsque les clients sont éloignés :

« Bien nous en tous cas, côté conception, faire des réunions avec le client c'est beaucoup plus facile maintenant parce que quelqu'un va partager son écran par exemple il va partager son logiciel 3D pour montrer les pièces. [...] Mais je dirais que pour expliquer des choses compliquées, des choses techniques comme par exemple le scan 3D qu'on a, dans l'ordinateur avec ça, chacun a son écran, il peut appuyer sur le bouton pour lever la main, poser une question, etcetera, on trouve vraiment ça utile, nous, de notre côté pour le côté industriel. [...] On va lui montrer la pièce dans, on va lui montrer l'écran que la pièce est dedans puis on peut parler en même temps, lui pointer les choses avec la souris, etcétera. » - R14 – *Ingénieur et chargé de projet au département des opérations.*

Cet ingénieur a aussi souligné l'utilité de l'intelligence artificielle au service de la conception et de sa compatibilité avec les besoins du client ou de l'utilisateur en expliquant comment son scanner 3D permet de créer une carte complète des lieux où doivent être installées les pièces à concevoir.

« [...] des fois ça prend 2 jours complets scanner le secteur. [...] Oui, oui mais, quand on fait ça par exemple ça donne tellement beaucoup

d'information qu'on le regagne au bout de la ligne. [...] on est capable de faire notre pièce qui va arriver avec précision, on n'aura pas besoin de la modifier au chantier pour l'installer. On va arriver puis elle va être compatible directement avec l'environnement où il faut qu'elle aille se brancher. » - R14 – *Ingénieur et chargé de projet au département des opérations.*

Voici ce qu'un répondant œuvrant dans une entreprise de fabrication de mobilier électromécanique avait à dire concernant la capacité de personnalisation de la technologie de fabrication additive :

« [...] Ensuite, si les, quand les clients nous demandent tu sais des ajouts, des petites demandes spéciales, on va les dessiner [...] si ça besoin d'être validé on va le faire avec l'imprimante 3D, sinon on va juste le faire de façon virtuelle puis de lancer la fabrication directement. » - R19 - *Président, copropriétaire et responsable des finances, des ventes et du marketing.*

Son collègue, ingénieur mécanique, soulignait que les technologies de l'I4.0 dans leur globalité sont utiles pour cibler les éléments à améliorer en vue d'étendre la durée de vie des produits :

« Plus on a de données, plus on a des données précises sur l'utilisation ou l'usure de nos produits bien on peut mettre nos efforts aux bons endroits pour s'assurer de maximiser la durée de vie du produit. » - R18 - *Copropriétaire, responsable de la R&D et de l'approvisionnement.*

Enfin, il est ici démontré par un mathématicien, formé en ventes, marketing et stratégies d'affaires dans une entreprise de fabrication et d'exploitation de produits électromécaniques, que les données récoltées et analysées participent à mieux diriger les clients vers des produits adaptés à leurs besoins :

« [...] ça nous permet de mieux comprendre la clientèle desservie, mieux comprendre leurs comportements et leurs attitudes envers la recharge. Et,

avec ces données-là [...] ça nous permet de vraiment bien cibler nos messages, bien cibler notre clientèle et de bien, comment je pourrais dire, anticiper leurs besoins au point de vue marketing. » - R3 - *Directeur du marketing, responsable de la marque, du message, de la commercialisation, du design, de l'aspect digital, des partenariats avec des parties prenantes externes relatives à l'utilisation et de la branche de l'intelligence marketing.*

Il est important de souligner que le thème de l'amélioration de la conception est celui qui regroupe le plus d'extraits de verbatims et qu'il est en lien direct avec la stratégie d'affaires des entreprises de l'échantillon qui consiste à créer des produits de grande qualité, ce qui est représenté par le type C dans les modèles d'affaires d'EDVP selon Ertz et al. (2019a). Le tableau 3.0 de la page suivante présente l'ensemble exhaustif des extraits de verbatims regroupés dans chaque catégorie du thème de l'amélioration de la conception.

Tableau 3.0 : Extraits d'entrevues portant sur l'amélioration de la conception

MEILLEURE PLANIFICATION	
	« [...] plus qu'on a plus d'information en tant que telle, ça revient tout le temps sur le côté d'être proactif, de voir ce qui peut s'en venir et de l'anticiper aussi. » - R7 - <i>Superviseur de production à l'usine de fabrication, en charge de coordonner les ressources humaines, de faire le lien avec l'équipe de direction, celle des achats et celle de l'amélioration continue.</i>
	« [...] c'est un peu en lien avec les capteurs, mais les signaux qui sont produits, fais que là on peut savoir, des fois, ah est-ce que c'est récurrent que des <i>the defects</i> soient liés à disons la température ou autre. Fais que ça c'est, il faut quand même compiler les données pour savoir quoi attaquer lors d'un concept d'une nouvelle borne. Quels éléments

	<p>sont les plus importants pour assurer la durée de vie des bornes avec les données actuelles dans le champ des bornes.</p> <p>» - R6 - <i>Concepteur mécanique au département de la R&D, en charge de la recherche et développement, de la conception et de la mise en production.</i></p>
	<p>« [...] d'avoir énormément de données sur le vécu de pièces ou de composantes ça peut donner <i>un insight</i> sur le, tu sais, le comportement, mais aussi sur quoi s'attarder. Tu sais, admettons, le temps d'un concepteur est assez limité, fait qu'il faut toujours, c'est toujours une question de qu'est-ce qu'on, sur quels attributs on met notre temps pour augmenter soit la valeur ou justement la durabilité d'un produit en essayant d'optimiser notre temps. » - R6 - <i>Concepteur mécanique au département de la R&D, en charge de la recherche et développement, de la conception et de la mise en production.</i></p>
	<p>« [...] puisqu'il y a moins de soudure. [...] On est capable de faire des pièces plus simples avec la découpe. Je ne sais pas si tu comprends ce que je veux dire. Vu qu'il y a moins de, au lieu d'avoir, admettons la structure qu'il fallait qu'on fabrique elle avait une dizaine de pièces avant, bien là aujourd'hui elle va en avoir 6 parce que les plaques, on est capable de les faire de façon où elles ont des formes qui vont alléger l'assemblage. » - R14 - <i>Ingénieur et chargé de projet au département des opérations.</i></p>
	<p>« Bien supérieure à l'homme je pense que oui, dans ce sens-là, c'est de quoi qu'on n'aurait pas pensé. Elle, elle va tout essayer les possibilités possibles, comment, à quoi la pièce elle pourrait ressembler puis elle va te dire laquelle serait la</p>

	meilleure dans le fond. » - R14 <i>Ingénieur et chargé de projet au département des opérations.</i> ¹
	« Oui exactement, c'est avec l'ordinateur puis les logiciels, éléments finis la plupart du temps c'est du, on va trouver la solution par essai – erreur, c'est parce que ça va être plus rapide avec ça, alors je mets plus de force ou moins de force, je vais mettre plus épais là, moins épais là, etcetera. Une fois que notre pièce elle est à notre goût puis qu'elle rencontre les..., elle a les bons résultats dans l'analyse, bien là on va la calculer en théorique. Sur une feuille de papier par exemple, faire un calcul, le vrai calcul d'ingénieur qu'il faut faire avec là. » - R14 <i>Ingénieur et chargé de projet au département des opérations.</i> ²
	« Dans le fond, on pourrait faire notre dessin, faire le patron puis après lui, le logiciel 3D embarque puis va montrer comment notre manteau va bouger avec la matière qu'on a sélectionnée, on lui rentre les propriétés puis là, il pourrait nous montrer de quoi notre manteau va avoir l'air, dans toutes les couleurs qu'on voudrait. » - R12 <i>Directrice de la production et en charge de l'équipe de R&D.</i>
	« Ça ressemble presque à de la réalité. Tu peux voir, admettons, si tu as fait un vêtement pour courir, avec les paramètres, on pourrait voir comment ça ferait, si notre fit est bon, quand quelqu'un va courir avec. Comment ça va

¹ Il est question d'un logiciel de dessin technique qui permet d'entrer des paramètres et de faire des simulations par intelligence artificielle.

² Il est question d'un logiciel de simulation par intelligence artificielle utilisé lors de la conception.

	bouger, si notre matière est correcte. » - R12 <i>Directrice de la production et en charge de l'équipe de R&D.</i> ³
FACILITATION DU PROTOTYPAGE	
	« Bien on faisait affaire avec des firmes externes ou nos ingénieurs construisaient des prototypes du mieux qu'ils pouvaient avec des outils, mais c'est, c'était long, c'était onéreux, c'était complexe puis ça n'était pas aussi précis qu'une impression 3D. » - R15 <i>Président directeur général.</i>
	« Tu sais, élaborer un concept sans l'imprimante 3D, avant d'avoir une imprimante 3D bien on pouvait faire, fabriquer des pièces en bois, là on essayait de tester nos concepts, nos principes puis c'est certain que c'est plus laborieux, c'est moins précis, tandis que quand on peut imprimer notre pièce, notre pièce qui va être éventuellement fabriquée en métal, mais on fait notre prototype pour valider le concept avec du plastique, c'est beaucoup plus précis. On peut voir où est-ce qu'il peut y avoir des problèmes potentiels donc, il y a moins de risque d'erreurs, entre le prototype ou entre le concept et la réalité. On est plus proche de la réalité avec une imprimante 3D. » - R19 - <i>Président, copropriétaire et responsable des finances, des ventes et du marketing.</i>
	« [...] il y a un niveau de précision qu'on a avec l'impression 3D, surtout avec les imprimantes encore plus d'aujourd'hui, c'est des technologies qui vont quand même assez vite comparativement à un usinage bois qui se ferait

³ En lien avec un logiciel de simulation.

	<p>de manière manuelle puis ça ne vaudrait pas la peine de prendre un robot pour usiner une pièce en bois maintenant qu'on a les imprimantes 3D, surtout au coût que ça revient, donc, probablement que oui, ça a un impact, ça permet d'avoir une meilleure précision sur ce qui va être attendu. »</p> <p>- R1 - <i>Directeur de l'assurance qualité, en charge de l'efficience et de l'efficacité organisationnelle ainsi que des normes ISO 9001.</i> ⁴</p>
	<p>« Bien oui, oui, c'est sûr qu'il y a plus de complexité, ils peuvent faire des pièces beaucoup plus pratiquement plus complexes et aussi plus précises. C'est moins de, comment je pourrais dire ça, de marges d'erreur. » R7 - <i>Superviseur de production à l'usine de fabrication, en charge de coordonner les RH, de faire le lien avec l'équipe de direction, celle des achats et celle de l'amélioration continue.</i> ⁵</p>
	<p>« Oui, oui, oui, il y a moins, puisqu'on peut couper le développement en plusieurs points de validation grâce à un outil comme l'imprimante 3D, on peut s'assurer d'itérer puis de faire des versions incrémentales qui nous permettent de valider, être à l'aise, avant d'aller au prochain. Donc, oui, on a moins de mauvaises surprises, moins de rebutage [...] » - R4 - <i>Directeur des produits ayant pour rôle de supporter le cycle de vie des produits.</i></p>
	<p>« Oui, bien exact, on a une imprimante 3D donc on l'utilise beaucoup pour du prototypage, pour faire des validations, pour accélérer les courbes de recherche et développement</p>

⁴ La question portait sur le prototypage.

⁵ La question portait sur la fabrication additive.

	<p>donc, au lieu d'avoir à faire fabriquer dans les vrais matériaux, on peut facilement faire sortir des prototypes qui permettent de valider pour l'utilisateur moyen donc, on peut penser disons, dernièrement on a fait des couvercles donc on a utilisé l'imprimante 3D pour fabriquer un nouveau couvercle puis ensuite tester si c'était facile pour un usager de prendre et de remettre le pistolet. Est-ce que le look visuel était en ligne avec l'identité de la ligne de produits?</p> <p>» - R4 - <i>Directeur des produits ayant pour rôle de supporter le cycle de vie des produits.</i></p>
	<p>« Là on peut valider beaucoup plus de principes avec l'imprimante 3D, ça va être plus esthétique, c'est plus près de la réalité comme je dis, tu sais c'est plus précis comme fabrication de prototype aussi parce qu'en modèle de production ou juste en plastique. » - R19 - <i>Président, copropriétaire et responsable des finances, des ventes et du marketing.</i></p>
	<p>« [...] quand les gens de la R&D impriment un prototype pour, on a vu des exemples [...] sur un boîtier de borne. Bon bien, j'ai vu le rendu 3D, j'ai été capable d'insérer le pistolet, tu sais, j'ai été capable d'apporter mon appréciation puis en même temps, moi je suis plus un peu le commissionnaire ou je vais l'apporter à l'ingénierie de production qui va être capable de valider le dimensionnel, qui va être capable de valider le niveau, l'épaisseur. C'est plus de ce côté-là, mon équipe va avoir à le valider puis à le commenter puis à suggérer des modifications à partir des prototypes 3D qui sont imprimés. » - R2 - <i>Directeur des opérations manufacturières à l'usine de fabrication, en</i></p>

	<i>charge de l'équipe d'ingénierie de l'usine, du groupe d'achat et du groupe de production.</i>
	« Fais que disons, si on se consacre seulement pour faire des validations de concept, ça réduit le temps énormément de, le <i>run over time</i> pour avoir un concept dans nos mains pour voir, pour faire la validation [...] on peut simplement faire imprimer 3D pour faire de la validation à l'interne. [...] le moins qu'on perd notre temps à soit attendre ou faire des validations, le plus qu'on a de temps à penser à des meilleurs concepts. » - R6 - <i>Concepteur mécanique au département de la R&D, en charge de la recherche et développement, de la conception et de la mise en production.</i>
	« Alors quand j'ai fait mon premier prototype, voilà 40 ans puis que je suis parti avec le bois, se retrouver avec différentes formes, on a pris une forme que les gars aimaient en bois, bien imagine toi que le gars l'aimerait après un 3D. C'est merveilleux parce que ça va plus vite. » - R13 - <i>Président, en charge de la conception et du développement de marchés.</i>
	« Bien vu que c'est un procédé qui est assez rapide et peu dispendieux, vu qu'on le fait à l'interne, c'est on peut faire, des fois on le fait, on va faire évoluer, on va passer plus de temps sur un concept pour le faire évoluer le plus possible en faisant les versions imprimées 3D pour pousser le concept le plus loin possible pour le raffiner le plus possible pour justement qu'il soit de meilleure qualité au bout de la ligne, qu'il réponde mieux au besoin du client et à nos besoins aussi et à nos standards de qualité. » - R18 - <i>Copropriétaire et responsable de la R&D et de l'approvisionnement.</i>

	<p>« On les voit beaucoup plus. On en voit plus puis on en voit plus rapidement aussi. [...] Ce qui fait que là, présentement, la plupart du temps les pièces sont meilleures plus rapidement, si je peux dire comme ça. [...] J’irais plus en termes de matchage en tant que tel. Tu sais, j’irai plus. En fait, le fait que l’employé l’assemble aisément et n’a pas à frustrer, à gossier si on veut en bon québécois là, ou quoi que ce soit pour l’assemblage fait en sorte aussi qu’instinctivement tu sais que tu n’as pas stressé une pièce en l’assemblant. [...] C’est pour ça que je vous dis que oui, je le vois qu’elle est mieux conçue, qu’elle semble plus solide. Sur le long terme, je ne le vois pas, mais sur le court terme, sur l’assemblage, oui ça je peux confirmer que oui, c’est bon. » - R7 <i>Superviseur de production à l’usine de fabrication, en charge de coordonner les RH, de faire le lien avec l’équipe de direction, celle des achats et celle de l’amélioration continue.</i>⁶</p>
	<p>« [...] mais le plus gros bénéfice d’avoir ça à l’interne maintenant, c’est vraiment un bénéfice au niveau du <i>timing</i>, au niveau du temps de développement. On peut facilement dessiner un concept puis l’envoyer dans l’imprimante puis en une ou deux journées l’avoir dans nos mains pour valider et le faire évoluer pour améliorer le design ou le concept. » - R17 - <i>Coordonnateur de la recherche et développement, en charge de diriger les ingénieurs du département.</i>⁷</p>
	<p>« [...] on a un cycle de développement de produit [...] c’est 18 mois plus tard on va avoir des produits au centre de</p>

⁶ Il est question des prototypes imprimés par fabrication additive, ce qui permet un plus grand nombre d’itérations et d’ajustements plus rapidement.

⁷ Il est question de la fabrication additive.

	<p>distribution expédiables chez nos clients. Évidemment, si on n'avait pas les technologies d'impression 3D, bien on développerait de notre mieux. Peut-être qu'on ferait de la simulation numérique pour se confirmer des choses. Mais peut-être qu'on aurait moins le temps de faire de boucles itératives d'améliorations. Puis à un moment donné, il faudrait sortir le produit, probablement qu'il pourrait atteindre un niveau de qualité peut-être un peu moindre. Ça se pourrait, oui en effet, que ça soit moins léché ou moins optimisé au niveau de la conception si on n'avait pas eu ces outils-là pour nous aider à optimiser le design, le design dans notre processus de développement. » - R17 - <i>Coordonnateur de la recherche et développement, en charge de diriger les ingénieurs du département.</i></p>
	<p>« Oui on a un appareil pour faire l'impression 3D, déjà depuis plusieurs années, ça fait au moins je vous dirais 5 ans sinon plus, qu'on a l'appareil pour faire des prototypes. Donc, nous elle sert spécifiquement au niveau de notre département de recherche et développement où on imprime tous nos prototypes durant le développement de produit pour améliorer, pour développer nos produits plus rapidement encore. [...] Un gain de temps, mais aussi un gain énorme au niveau essai / erreur. Je veux dire, imprimer un prototype puis de le tester ou de l'essayer ou de le voir versus faire un <i>touring</i> ou faire faire des, c'est, ça nous permet de corriger des erreurs ou d'éviter les erreurs avant d'aller en processus final là. » - R15 - <i>Président directeur général de l'entreprise.</i></p>

	« Je regarde un autre produit comme mes coupes papiers, comment je vais, là je vais aller vers le 3D encore puis j'ai d'autres idées là-dedans, mais c'est vraiment là qui est la formule non coûteuse de l'évaluation d'un prototype qui me permet d'évaluer la réaction du marché. » - R13 - <i>Président, en charge de la conception et du développement de marchés.</i> ⁸
	« L'impression 3D, on voit qu'il y en a beaucoup qui vont se faire des prototypes avec ça. Ça permet de faire des designs puis de pouvoir présenter mieux les produits aux clients. » - R14 - <i>Ingénieur et chargé de projet au département des opérations.</i>
	« Par imprimante ou on aura un meilleur prototype qui va nous amener à fabriquer de façon industrielle un meilleur produit, oui, dans ce cas-là. » - R16 - <i>Vice-président et responsable de la chaîne d'approvisionnement.</i> ⁹
CORRESPONDANCE AUX BESOINS DU MARCHÉ	
	« Mais je dirais que pour expliquer des choses compliquées, des choses techniques comme par exemple le scan 3D qu'on a, dans l'ordinateur avec ça, chacun a son écran, il peut appuyer sur le bouton pour lever la main, poser une question, etcetera, on trouve vraiment ça utile, nous, de notre côté pour le côté industriel. [...] On va faire une présentation pour montrer un nouveau design au client puis on le fait directement dans l'ordinateur. On va lui montrer

⁸ Lorsqu'il est questionné sur la fabrication additive.

⁹ Il est question de l'impression 3D.

	<p>la pièce dans, on va lui montrer l'écran que la pièce est dedans puis on peut parler en même temps, lui pointer les choses avec la souris, etcetera. » - R14 - <i>Ingénieur et chargé de projet au département des opérations.</i></p>
	<p>« Par contre, admettons il y a d'autres clients [...] que là il y a vraiment une rétroaction. C'est-à-dire, par exemple, quand on regarde les produits de façon, comment on pourrait mieux les produire, comment on pourrait les produire de façon plus économe ou peu importe, là dans ces cas-là on a des <i>back and forth</i> avec les clients pour revoir les requis pour admettons simplifier la fabrication de la pièce, la rendre plus stable. [...] c'est une de ses forces de pouvoir collaborer avec ses clients pour pouvoir s'assurer qu'on ne fait pas juste produire ce qu'ils veulent qu'on produise, mais s'assurer d'avoir de la valeur ajoutée aussi. » - R10 - <i>Directeur R&D et du 4.0, responsable de la fabrication intégrée par ordinateur et de la conception.</i></p>
	<p>« Oui, oui, mais, quand on fait ça par exemple ça donne tellement beaucoup d'information qu'on le regagne au bout de la ligne. On le regagne en erreurs qu'on prévient puis en, ça aide aussi à avoir les dimensions par exemple comme une ligne de tuyauterie, bien dans notre scan on va avoir le point de départ de la ligne exactement c'est où puis le point où il faut que ça se termine, exactement ça arrive où. On va tout avoir ça dans le scan fait qu'on est capable de faire notre pièce qui va arriver avec précision, on n'aura pas besoin de la modifier au chantier pour l'installer. On va arriver puis elle va être compatible directement avec l'environnement</p>

	<p>où il faut qu'elle aille se brancher. » - R14 <i>Ingénieur et chargé de projet au département des opérations.</i> ¹⁰</p>
	<p>« Maintenant, au niveau des bornes publiques, c'est là que ça devient intéressant toute la cueillette de données qu'on peut faire. On peut valoriser ces données-là, donc, sans dire, monsieur X était à tel endroit, a quitté sa maison, tu sais, des données qui sont un peu plus sensibles, on peut savoir par exemple la distance que parcourent les utilisateurs de leur domicile. Donc, ça peut permettre à certains partenaires, par dire bien regardez, par valeur ajoutée, si vous avez des bornes dans tel secteur, par exemple la ville de Montréal, bien on vous suggère d'en mettre aussi dans ce secteur-là parce qu'il n'y a pas de couverture ou du moins, les gens vont beaucoup plus se recharger dans ce secteur que dans un autre. » - R1 - <i>Directeur de l'assurance qualité, en charge de l'efficience et de l'efficacité organisationnelle ainsi que des normes ISO 9001.</i></p>
	<p>« Fais que, de savoir comment est-ce que les utilisateurs utilisent les bornes, je pense que c'est assez primordial pour savoir, justement, où va tendre le marché de l'électrification des routes. Puis, bien c'est ça, c'est, est-ce que le consommateur veut quelque chose de rapide, est-ce que le consommateur veut quelque chose de lent? Puis ça, ça va dicter, nos bornes tu sais, à la R&D, quel type de borne on veut offrir dans le futur pour satisfaire la clientèle en fait. » - R6 - <i>Concepteur mécanique au département de la R&D, en charge de la recherche et développement, de la conception et de la mise en production.</i></p>

¹⁰ Il est question du scanner 3D.

	<p>« [...] ça nous permet de mieux comprendre la clientèle desservie, mieux comprendre leurs comportements et leurs attitudes envers la recharge. Et, avec ces données-là [...] ça nous permet de vraiment bien cibler nos messages, bien cibler notre clientèle et de bien, comment je pourrais dire, anticiper leurs besoins au point de vue marketing. » - R3 - <i>Directeur du marketing, responsable de la marque, du message, de la commercialisation, du design, de l'aspect digital, des partenariats avec des parties prenantes externes relatives à l'utilisation et de la branche de l'intelligence marketing.</i></p>
	<p>« Fais que chacune des bornes et il y a de plus en plus d'information, chacune des bornes qui sont connectées va nous dire l'énergie transférée, le nombre de sessions, la durée de la session. [...] En quoi on s'en sert, un pour mieux comprendre notre clientèle, mieux comprendre quel type d'utilisation. [...] Et, en regardant ce type de données, la durée, etcetera, on peut en déterminer, mais en fait l'utilisation que la borne a faite, est-ce que c'est une borne de transit ou est-ce que c'est une borne de destination? » - R3 - <i>Directeur du marketing, responsable de la marque, du message, de la commercialisation, du design, de l'aspect digital, des partenariats avec des parties prenantes externes relatives à l'utilisation et de la branche de l'intelligence marketing.</i></p>
	<p>« Dans mon département, j'ai bâti la fonction d'intelligence marketing parce qu'on pouvait exploiter cette information-là pour des fins commerciales pour mieux comprendre les habitudes de recharge dans différentes situations, différents</p>

	<p>emplacements, etcetera, voir les différences.» - R3 - <i>Directeur du marketing, responsable de la marque, du message, de la commercialisation, du design, de l'aspect digital, des partenariats avec des parties prenantes externes relatives à l'utilisation et de la branche de l'intelligence marketing.</i></p>
	<p>« [...] on rentre Autocad, parce que c'est vraiment quelque chose que nous on a besoin de plus en plus. [...] les gens ils veulent voir un produit fini avant puis quand on explique bien, souvent, tu sais, donner des explications verbales c'est que du verbal là tu sais. Moi je le vois dans ma tête, mais eux autre, pas nécessairement. Donc, les gens veulent avoir une image faite. Tu sais, ils se font une idée puis tu sais, c'est le fun quand tu es capable de leur montrer voici qu'est-ce que ça va donner, voici qu'est-ce qu'on peut faire, qu'est-ce qu'on peut modifier. » - R8 – <i>Présidente directrice générale.</i></p>
	<p>« [...] ça va faire un 7 ou 8 ans qu'on a cette imprimante-là, puis, je vais vous dire de quoi, quand tu fais dans le nouveau produit, ça évite... On s'en sert nous pour des raisons, pour notre clientèle, avoir des échantillons pour être capable de présenter quelque chose, de plus concret [...] tu es capable de servir ton client pas mal plus rapidement aussi puis de cheminer l'échantillonnage et parler avec les gens de marketing pour dire voici une photo, c'est puissant, mais c'est encore plus puissant quand tu as l'objet dans tes mains directement. [...] Pour montrer notre produit à notre force de vente puis aux gens de marketing pour qu'ils puissent, eux autres, donner leur aval, voir si ça leur convient ou</p>

	pas. » - R16 - <i>Vice-président et responsable de la chaîne d'approvisionnement.</i>
	« Ensuite, si les, quand les clients nous demandent tu sais des ajouts, des petites demandes spéciales, on va les dessiner, on va être capable de les soumissionner, dépendant de la complexité il va falloir les tester si c'est un nouveau produit. Mais si c'est juste un accessoire, si ça besoin d'être validé on va le faire avec l'imprimante 3D, sinon on va juste le faire de façon virtuelle puis de lancer la fabrication directement. » - R19 - <i>Président, copropriétaire et responsable des finances, des ventes et du marketing.</i>
	«[...] c'est d'utiliser la donnée comme argument de vente avec des clients qui eux veulent acheter nos produits [...] Ils vont regarder beaucoup la qualité des produits, la durabilité puis ça, si tu as des données, c'est très très fort versus le compétiteur qui dit qu'il est bien beau, qu'il est bien fin puis un petit peu moins cher, mais lui, il n'a pas de données [...]» - R5 - <i>Président directeur général, dirigeant le conseil exécutif et impliqué dans la commercialisation et le financement.</i>

5.2 AMÉLIORATION DE LA PRODUCTION

Une fois les produits rendus à leur phase de production, les différentes technologies permettent l'extension de la durée de vie des produits par leur amélioration continue ainsi que celle de leurs méthodes de production en favorisant une plus grande qualité. Deux catégories se distinguent donc dans ce thème, soit l'optimisation de la fabrication qui contient trois sous-thèmes que sont les gabarits de fabrication, le contrôle des opérations et la réduction des erreurs ainsi que l'amélioration des produits.

5.2.1 OPTIMISATION DE LA FABRICATION

Les technologies de l'I4.0 participent directement à l'optimisation de la fabrication en atelier et en usine, et ce de diverses manières. L'optimisation de la fabrication est directement liée à l'amélioration de la conception dans les stratégies d'EDVP et est donc directement en lien avec les modèles d'affaires des entreprises qui se positionnent comme producteurs de produits de qualité qui forment l'échantillon de la présente étude. Il est possible de regrouper ces optimisations selon trois sous-catégories que sont le contrôle des opérations, la réduction des erreurs et les gabarits de fabrication. Ces sous-catégories sont ici décrites et exemplifiées.

5.2.1.1 CONTRÔLE DES OPÉRATIONS

L'I4.0 favorise un meilleur contrôle des opérations de fabrication en usine de production via les mégadonnées récoltées par l'Internet des Objets et parfois analysées par l'intelligence artificielle. Les données récoltées par les capteurs, ajoutées aux connaissances des employés, sont analysées, filtrées et organisées afin d'offrir une information qui permet de définir des méthodes de travail qui assurent une qualité stable. De plus, des capteurs sont aussi utilisés sur des bancs de tests permettant de valider la qualité de la production et de l'ajuster en conséquence, assurant ainsi l'exactitude des résultats de production. Ces technologies mises en commun participent au contrôle des opérations lors de la fabrication dans certaines entreprises.

Dans une entreprise faisant partie de notre échantillon, on réalise des pièces de très haute précision et utilisant plusieurs technologies numériques reliées par un système de gestion. Toutes les opérations sont assistées par la numérisation et l'automatisation. Un ingénieur mécanique de l'entreprise expliquait ceci concernant le contrôle de ses opérations :

« Donc, l'ensemble des données sont utilisées à des fins de contrôler [...].
Fait que là, c'est vraiment, là on rentre dans un mode, dans la branche recherche opérationnelle des intelligences artificielles. Fait que là c'est des solveurs avec de l'optimisation, avec des ou avec des scénarios, dans

l'exploration de l'ensemble des possibilités qu'on peut réaliser. Fait que ça, dans le fond, ça nous sert à planifier nos opérations, après ça, suite à ce résultat-là, à approvisionner l'usine en matériel. Et puis, au niveau du, tout ça, on travaille actuellement sur la stabilité des, dans le fond, le contrôle des procédés fait que dans le fond, on a développé un système qui, avec l'*input* des employés dans le fond sur la connaissance qu'ils ont d'un procédé, on traduit ça en règle opérationnelle qu'ils vont, qu'on va venir contrôler directement le procédé. C'est-à-dire que la machine va produire des pièces, on va mesurer puis on faire un *feed-back* à la machine. » - R10 - *Directeur R&D et du 4.0, responsable de la fabrication intégrée par ordinateur et de la conception.*

« Tu sais, la qualité des produits est directement liée avec la technologie admettons 4.0 qu'on utilise. C'est-à-dire le fait que le système qui dicte quoi faire, qui contrôle les procédés, qui contrôle les tâches, qui doit faire quoi, quand et comment, pourquoi. Donc, c'est directement lié. » - R10 - *Directeur R&D et du 4.0, responsable de la fabrication intégrée par ordinateur et de la conception.*

Le répondant œuvrant dans une entreprise de fabrication de mobilier électromécanique exprimait son appréciation générale de l'I4.0 et soulignait la stabilité de la qualité de production en lien avec le contrôle des opérations de son atelier de fabrication :

« Oui, mieux contrôler la production, mieux contrôler la qualité des produits [...] exemple, un robot soudeur ça va toujours souder la même, tu sais, si le *setting* est bien rentré, la qualité va être égale tout le temps. » - R19 - *Président, copropriétaire et responsable des finances, des ventes et du marketing.*

Le technicien en électronique dans une entreprise de fabrication et d'exploitation de produits électromécaniques superviseur de la production à l'usine de fabrication de produits électromécaniques s'exprime au sujet de l'amélioration qu'a apporté le banc de tests avec capteurs électroniques dans l'usine qu'il supervise :

« Le fait aussi que nos bancs de tests, on a beaucoup plus d'intelligence, on a beaucoup plus de données, nos applications sont beaucoup plus stables, tu as une meilleure garantie de ce que tu sors, de ce que tu produis est bon du premier coup. Que tu n'arriveras pas chez le client puis défectueux parce qu'on peut avoir confiance à ce qu'on a sorti de notre ligne contrairement à avant qu'il manquait peut-être des données, il manquait peut être des connaissances, il manquait peut être aussi des mesures [...]. Quand tu es connecté, tu es capable de prendre beaucoup plus de données de lecture que quand tu prends tout à la main, évidemment. Ce qui fait en sorte qu'on est beaucoup plus, on est beaucoup plus certain de notre produit, que ce qu'on a expédié qui est de meilleure qualité. » - R7 - *Superviseur de production à l'usine de fabrication, en charge de coordonner les RH, de faire le lien avec l'équipe de direction, celle des achats et celle de l'amélioration continue.*

5.2.1.2 RÉDUCTION DES ERREURS

Les technologies telles l'Internet des Objets, les mégadonnées et l'intelligence artificielle peuvent être utiles pour éviter des erreurs de production, erreurs humaines, mais aussi erreurs techniques, mécaniques ou matérielles. En effet, quelques entreprises utilisent des capteurs numériques pour mesurer ou faire des tests sur les produits afin de valider leur conformité aux standards établis. La lecture des mesures se faisant par informatique, les erreurs humaines sont éliminées. Des scanners permettant de lire les mesures des lieux où seront installés les produits. Aussi, des logiciels de dessin permettent de prévoir l'assemblage des éléments avec précision, évitant les erreurs lors de la fabrication ou de l'installation. De ce fait, l'utilisation des technologies

de l'I4.0 offre une stabilité et une fiabilité supérieure à celle d'un humain en ce sens qu'elles permettent d'éviter les erreurs de manutention, d'inattention ou celles liées à la fatigue et au stress.

Dans une entreprise de fabrication et d'exploitation de pièces électromécanique, un banc de test entièrement numérique a été mis au point dernièrement et un technicien en électronique explique comment il évite les erreurs et assure une plus grande durabilité des produits en fin de production :

« Bien en fait, les applications c'est beaucoup, c'est connecté à notre ordinateur, c'est que la mesure en tant que telle ne sera pas pris par la personne, ça va être le banc de test qui va donner les mesures. Ce qui fait en sorte que ce n'est pas la personne qui fait une lecture, ce qui pourrait faire une lecture erronée, c'est le banc de test qui va dire que ton, dans le fond, que ta lecture est bonne et que la connectivité de la borne se fait, en fait, et non que ce n'est pas, je ne peux pas le dire vraiment autrement. En fait, ce n'est pas l'humain, c'est l'ordinateur en fait qui va corriger, l'ordinateur fait rarement, moins d'erreurs qu'une personne en tant que telle, d'erreurs d'inattentions du moins. » - R7 - *Superviseur de production à l'usine de fabrication, en charge de coordonner les RH, de faire le lien avec l'équipe de direction, celle des achats et celle de l'amélioration continue.*

Un ingénieur mécanique dans une entreprise d'aéronautique et de hautes technologies explique comment l'ensemble des technologies de l'I4.0 permettent de fabriquer des produits de qualité, sans erreur et respectant les normes établies par les clients :

« [...] pour les clients aéronautiques, c'est 100% livrable à temps puis 0 non-conformité [...] Donc, pour ne pas produire de la *scrap*, puis surtout d'assurer de ne pas livrer de la *scrap* non plus, dans le fond, en n'ayant pas de système comme ça bien c'est facile d'en échapper puis de penser faire de la qualité, mais on n'en fait pas pour vrai. » - R10 - *Directeur R&D et du 4.0, responsable de la fabrication intégrée par ordinateur et de la conception.*

Plusieurs erreurs de dessin et d'assemblage peuvent être évitées grâce à l'utilisation des technologies tels le scanneur 3D et les logiciels de dessin comportant des modules de simulation par intelligence artificielle. Un répondant, ingénieur mécanique, œuvrant dans le machinage de pièces mécanosoudées, énonce ce fait :

« [...] avec le logiciel, on dessine des pièces une par une puis après les pièces, une fois qu'elles sont dessinées, on fait des assemblages de pièces, on met plusieurs pièces ensemble. Puis après ça, ensuite on tombe dans la mise en plan; fait qu'à partir des pièces qu'on voit en 3D dans l'ordinateur, on fait des mises en plan avec [...] gain de temps puis moins de risque d'erreur aussi. » - R14 - *Ingénieur et chargé de projet au département des opérations.*

Enfin, la différence entre l'utilisation de l'I4.0 dans la fabrication et celle de l'humain en ce qui concerne le potentiel d'erreurs est bien évoquée par ce répondant, gestionnaire dans une entreprise du domaine de la couture industrielle et du prêt-à-porter, expose les risques liés à l'intervention humaine dans le processus manufacturier :

« [...] une production avec des humains va être *impactée* par si la personne est fatiguée, si la personne elle était stressée, elle pensait à autre chose cette journée et elle a oublié de faire telle, telle étape de la production. C'est peut-être un petit peu plus difficile d'atteindre la perfection parce que l'humain ne l'est pas. Fait que tu sais, on *deal* avec quand même certaines lacunes qui peuvent avoir un impact sur la qualité de notre produit au bout de la ligne. Fait que oui, les technologies, je pense, peuvent améliorer à ce niveau-là. » - R9 – *Directrice marketing et communications.*

5.2.1.3 GABARITS DE FABRICATION

Certaines technologies de l'I4.0 telles la fabrication additive ainsi que les outils de découpe électroniques permettent de créer des gabarits de fabrication d'une grande complexité et d'une grande précision, favorisant une production minutieuse, stable et de qualité. Les gabarits ainsi imprimés ou découpés peuvent être personnalisés aux différentes configurations nécessaires et ils sont rapidement fabriqués. Les gabarits permettent une plus grande précision de fabrication et moins de manipulation, ce qui parfois favorise aussi la durabilité du produit.

Trois répondants œuvrant pour la même entreprise de fabrication et d'exploitation de pièces électromécaniques expliquaient le lien qu'ils considéraient entre la fabrication de gabarits et la durabilité de leurs produits. Des gabarits de protection pour l'enduit de finition sur une pièce contenant des connexions électroniques et des gabarits utilisés pour l'assemblage sont ici pris en exemples:

« [...] On a imprimé un gabarit de masquage par-dessus, donc, on vient *clipper* et quand la buse passe, bien elle passe par-dessus puis notre *board* ne reçoit pas de vernis. Ça évite beaucoup de manipulations de masquage, démasquage. Fait que ça on a créé tous les différents gabarits pour nos types de *boards* [...]. » - R2 - *Directeur des opérations manufacturières à l'usine de fabrication, en charge de l'équipe d'ingénierie de l'usine, du groupe d'achat et du groupe de production.*

« [...] Le fait que, justement, présentement on vient cacher avec un gabarit qui est fait en impression 3D, bien les gens n'ont pas besoin pratiquement de toucher au PCB ce qui fait qu'il y a beaucoup un terme de qualité qui est impliqué dans ça. [...] les bornes d'aujourd'hui vont durer beaucoup plus longtemps que ceux qu'on aurait faits au début. » - R7 - *Superviseur de production à l'usine de fabrication, en charge de coordonner les RH,*

de faire le lien avec l'équipe de direction, celle des achats et celle de l'amélioration continue.

« Un gabarit de *fabrication*, ça va être utilisé à l'usine puis ça a beaucoup d'utilités pour, disons, placer une pièce dans l'espace pour venir fixer la pièce dans la borne. Fais que, ouin c'est ça, un exemple que j'ai c'est un des connecteurs, le câble pistolet qu'il faut qu'on vienne serrer le câble sur la borne puis c'est toujours le même espace qu'on utilise donc, puis l'espace est assez précise, donc en faisant l'impression 3D qui a une grande précision, justement, on peut utiliser le gabarit pour venir s'assurer que nos produits soient toujours conformes et toujours assemblés de la même façon. » - R6 - *Concepteur mécanique au département de la R&D, en charge de la recherche et développement, de la conception et de la mise en production.*

5.2.2 AMÉLIORATION DES PRODUITS

L'amélioration des produits, une fois ceux-ci en production, est une préoccupation de toutes les entreprises que nous avons interviewées. L'Internet des Objets et les mégadonnées ressortent particulièrement comme les technologies permettant d'avoir des informations pertinentes en ce sens. En effet, elles indiquent les faiblesses des pièces ou des produits, les défauts d'utilisation ou les défauts les plus fréquentes. De ce fait, il est possible de cibler des éléments à favoriser pour améliorer les produits, le service ou les logiciels afin de fournir une meilleure fiabilité, une plus grande solidité et donc une plus grande durabilité des produits.

Les données fournissent des informations pertinentes pour la prise de décision concernant l'amélioration et l'utilisation des produits. Cela est particulièrement pertinent selon plusieurs répondants d'une entreprise de fabrication et d'exploitation de produits électromécaniques. Voici deux énoncés qu'un mathématicien, formé en ventes, marketing et stratégies d'affaires, a exprimé

sur le lien entre l'I4.0 et la qualité des produits via l'amélioration qu'elle permet de faire sur les produits :

« [...] définitivement, on a amélioré, on a simplifié certaines pièces, on a, etcetera. Fait que, un, il y a de l'optimisation au nombre de pièces, moins qu'il y avait de pièces à faire assembler, moins qu'il y a de risque de bris et ensuite on apprend de nos, tu sais chacune, chaque fois qu'on déploie une borne, il y a une acquisition de connaissance, d'expérience et c'est sûr que depuis les, à chaque année on améliore les choses. Chaque génération s'améliore et nous on a des données de plus en plus [...] » - R3

« [...] maintenant, on peut avoir les données en continu en temps réel et qui va nous permettre d'accélérer les cycles d'amélioration des cycles de vie du produit. [...] avec l'industrie 4.0, les différentes données qu'on peut en extraire, ça se fait en temps réel et le temps de réponse, on peut prédire là. [...] faire en sorte que le produit va mieux servir, va être plus abordable et va être de qualité supérieure. » - R3 - *Directeur du marketing, responsable de la marque, du message, de la commercialisation, du design, de l'aspect digital, des partenariats avec des parties prenantes externes relatives à l'utilisation et de la branche de l'intelligence marketing.*

Voici ce que le fondateur de l'entreprise et aussi ingénieur électrique avait à dire à ce sujet:

« Être capable de comprendre c'est où que le bas blesse ou où est-ce que, si on investit tu sais, je dirais, où est-ce qu'on met nos priorités, ça règle 80% du problème au lieu que d'être dans l'anecdotique. Fais que ça, c'est beaucoup l'aspect je dirais des données qu'on récolte qui vont nous aider à prendre des décisions puis à améliorer notre offre. Que ce soit des produits, des logiciels, des fois ça peut être des processus, ça peut être des services, c'est toutes des choses que la donnée devient clé. » - R5 - *Président directeur général, dirigeant le conseil exécutif et impliqué dans la commercialisation et le financement.*

Le tableau 4.0 affiche l'ensemble des extraits de verbatims qui figurent dans les catégories et les sous-catégories appartenant au thème de l'amélioration de la production.

Tableau 4.0 : Extraits d'entrevues portant sur l'amélioration de la production

OPTIMISATION DE LA FABRICATION	
Contrôle des opérations	
	<p>« Donc, l'ensemble des données sont utilisées à des fins de contrôler [...]. Fais que là, c'est vraiment, là on rentre dans un mode, dans la branche recherche opérationnelle des intelligences artificielles. Fais que là c'est des solveurs avec de l'optimisation, avec des ou avec des scénarios, dans l'exploration de l'ensemble des possibilités qu'on peut réaliser. Fait que ça, dans le fond, ça nous sert à planifier nos opérations, après ça, suite à ce résultat-là, à approvisionner l'usine en matériel. Et puis, au niveau du, tout ça, on travaille actuellement sur la stabilité des, dans le fond, le contrôle des procédés fait que dans le fond, on a développé un système qui, avec l'<i>input</i> des employés dans le fond sur la connaissance qu'ils ont d'un procédé, on traduit ça en règle opérationnelle qu'ils vont, qu'on va venir contrôler directement le procédé. C'est-à-dire que la machine va produire des pièces, on va mesurer puis on faire un <i>feed-back</i> à la machine. » - R10 - <i>Directeur R&D et du 4.0, responsable de la fabrication intégrée par ordinateur et de la conception.</i></p>
	<p>« Puis tout le côté contrôle procédé, bien ça c'est d'avoir un produit qui est conforme et qui est parfait. Donc, quand je dis</p>

	<p>parfait, c'est de s'assurer d'avoir, tu sais, je ne dis pas par exemple le système qui produit des pièces peut à un moment donné par exemple, il y a un outil qui casse dans la machine, ça peut arriver, puis on produit des pièces qui non conformes. Ça va être des non-conformités qui vont être internes mais le système permet de capturer tout ça puis de s'assurer qu'il n'y a aucune non-conformité externe qui sont envoyée aux clients. Fais que tout ce contrôle de procédé dont l'intelligence artificielle permet de venir prévenir ça dans le fond. » - R10 - <i>Directeur R&D et du 4.0, responsable de la fabrication intégrée par ordinateur et de la conception.</i></p>
	<p>« Bien, forcément, parce que dans le fond, sur la qualité du produit forcément si on utilise des données pour contrôler les procédés, on utilise dans le fond, par définition, avec ces données-là ça permet de faire des produits qui sont conformes, donc qui sont bons. » - R10 - <i>Directeur R&D et du 4.0, responsable de la fabrication intégrée par ordinateur et de la conception.</i></p>
	<p>« Oui, mieux contrôler la production, mieux contrôler la qualité des produits [...] exemple, un robot soudeur ça va toujours souder la même, tu sais, si le <i>setting</i> est bien rentré, la qualité va être égale tout le temps. » - R19 - <i>Président, copropriétaire et responsable des finances, des ventes et du marketing.</i></p>
	<p>« Le fait aussi que nos bancs de tests, on a beaucoup plus d'intelligence, on a beaucoup plus de données, nos applications sont beaucoup plus stables, tu as une meilleure garantie de ce que tu sors, de ce que tu produis est bon du premier coup. Que tu n'arriveras pas chez le client puis défectueux parce qu'on peut avoir confiance à ce qu'on a sorti de notre ligne contrairement à</p>

	<p>avant qu'il manquait peut être des données, il manquait peut être des connaissances, il manquait peut être aussi des mesures [...]. Quand tu es connecté, tu es capable de prendre beaucoup plus de données de lecture que quand tu prends tout à la main, évidemment. Ce qui fait en sorte qu'on est beaucoup plus, on est beaucoup plus certain de notre produit, que ce qu'on a expédié qui est de meilleure qualité. » - R7 - <i>Superviseur de production à l'usine de fabrication, en charge de coordonner les RH, de faire le lien avec l'équipe de direction, celle des achats et celle de l'amélioration continue.</i></p>
	<p>« Puis dans le fond, tout ce qui est le suivi comme je disais, parfait du déroulement des opérations, encore là c'est le système qui va <i>tracker</i> tout ça à travers différents systèmes d'alertes ou de <i>watch</i>. Fait que tu sais, ça ça permet justement d'avoir un processus qui est 100% conforme à chaque fois. » - R10 - <i>Directeur R&D et du 4.0, responsable de la fabrication intégrée par ordinateur et de la conception.</i></p>
	<p>« Tu sais, la qualité des produits est directement liée avec la technologie admettons 4.0 qu'on utilise. C'est-à-dire le fait que le système qui dicte quoi faire, qui contrôle les procédés, qui contrôle les tâches, qui doit faire quoi, quand et comment, pourquoi. Donc, c'est directement lié. » - R10 - <i>Directeur R&D et du 4.0, responsable de la fabrication intégrée par ordinateur et de la conception.</i></p>
	<p>« Je pense que c'est au niveau de la précision, de la fabrication, des délais de fabrication, en étant plus automatisé, on a une qualité qui est plus constante. C'est facilitant au niveau du</p>

	contrôle de la qualité. » - R19 - <i>Président, copropriétaire et responsable des finances, des ventes et du marketing.</i>
Réduction des erreurs	
	[...] l'opérateur venait coller manuellement des étiquettes temporaires qui venaient cacher certaines pièces puis, après le vernissage, manuellement, il faudrait qu'ils enlèvent ces disons, les autocollants. [...] Mais avec, justement, l'impression 3D des gabarits de tropicalisation, c'est dans, à l'ordre de quelques secondes pour, tu sais, que tu le mettes en place et que tu l'enlèves par la suite. [...] avant c'était beaucoup plus manuel fait qu'il pouvait y avoir des erreurs de manipulation puis peut être <i>down the road</i> des malfonctionnalités des pièces. » - R6 - <i>Concepteur mécanique au département de la R&D, en charge de la recherche et développement, de la conception et de la mise en production.</i>
	«[...] la mesure en tant que telle ne sera pas pris par la personne, ça va être le banc de test qui va donner les mesures. [...] En fait, ce n'est pas l'humain, c'est l'ordinateur en fait qui va corriger, l'ordinateur fait moins d'erreur qu'une personne en tant que telle, d'erreurs d'inattentions du moins. » - R7 - <i>Superviseur de production à l'usine de fabrication, en charge de coordonner les RH, de faire le lien avec l'équipe de direction, celle des achats et celle de l'amélioration continue.</i>
	« [...] pour les clients aéronautiques, c'est 100% livrable à temps puis 0 non-conformité. Fait que tu sais, c'est ce que le 4.0 nous a permis de faire. [...] Donc, pour ne pas produire de la <i>scrap</i> , puis surtout d'assurer de ne pas livrer de la <i>scrap</i> non plus, dans

	<p>le fond, en n'ayant pas de système comme ça bien c'est facile d'en échapper puis de penser faire de la qualité, mais on n'en fait pas pour vrai. » - R10 - <i>Directeur R&D et du 4.0, responsable de la fabrication intégrée par ordinateur et de la conception.</i></p>
	<p>« [...] avec le logiciel, on dessine des pièces une par une puis après les pièces, une fois qu'elles sont dessinées, on fait des assemblages de pièces, on met plusieurs pièces ensemble. Puis après ça, ensuite on tombe dans la mise en plan; fait qu'à partir des pièces qu'on voit en 3D dans l'ordinateur, on fait des mises en plan avec [...] gain de temps puis moins de risque d'erreur aussi. » - R14 - <i>Ingénieur et chargé de projet au département des opérations.</i></p>
	<p>« [...] ça prend 2 jours complets scanner le secteur. [...] mais, quand on fait ça par exemple ça donne tellement beaucoup d'information qu'on le regagne au bout de la ligne. On le regagne en erreurs qu'on prévient. » - R14 - <i>Ingénieur et chargé de projet au département des opérations.</i>¹¹</p>
	<p>« [...] une production avec des humains va être impactée par si la personne est fatiguée, si la personne elle était stressée, elle pensait à autre chose cette journée et elle a oublié de faire telle, telle étape de la production. C'est peut-être un petit peu plus difficile d'atteindre la perfection parce que l'humain ne l'est pas. Fait que tu sais, on <i>deal</i> avec quand même certaines lacunes qui peuvent avoir un impact sur la qualité de notre produit au bout de la ligne. Fait que oui, les technologies, je pense, peuvent améliorer à ce niveau-là. » - R9 - <i>Directrice marketing et communications.</i></p>

¹¹ Il est question du scanneur 3D.

Gabarits de fabrication	
	<p>« Avec l'imprimante 3D [...] on a imprimé un gabarit de masquage par-dessus, donc, on vient clipper et quand la buse passe, bien elle passe par-dessus puis notre <i>board</i> ne reçoit pas de vernis. Ça évite beaucoup de manipulations de masquage, démasquage. Fait que ça on a créé tous les différents gabarits pour nos types de <i>boards</i> [...]. » - R2 - <i>Directeur des opérations manufacturières à l'usine de fabrication, en charge de l'équipe d'ingénierie de l'usine, du groupe d'achat et du groupe de production.</i></p>
	<p>« Un gabarit de fabrication, ça va être utilisé à l'usine puis ça a beaucoup d'utilités pour, disons, placer une pièce dans l'espace pour venir fixer la pièce [...] en faisant l'impression 3D qui a une grande précision, justement, on peut utiliser le gabarit pour venir s'assurer que nos produits soient toujours conformes et toujours assemblés de la même façon. » - R6 - <i>Concepteur mécanique au département de la R&D, en charge de la recherche et développement, de la conception et de la mise en production.</i></p>
	<p>« [...] Le fait que, justement, présentement on vient cacher avec un gabarit qui est fait en impression 3D, bien les gens n'ont pas besoin pratiquement de toucher au PCB ce qui fait qu'il y a beaucoup un terme de qualité qui est impliqué dans ça. [...] les bornes d'aujourd'hui vont durer beaucoup plus longtemps que ceux qu'on aurait faits au début. » - R7 - <i>Superviseur de production à l'usine de fabrication, en charge de coordonner les</i></p>

	<i>RH, de faire le lien avec l'équipe de direction, celle des achats et celle de l'amélioration continue.</i>
	« Puis, on a développé un outil avec la fabrication additive pour permettre aux équipes de service d'aller pouvoir retirer les <i>inserts</i> sans avoir à retirer la borne complètement, parce qu'on avait un haut taux de retours d'installateurs qui, au lieu de faire un vissage manuel, utilisaient des outils à percussion, donc des <i>power tools</i> , puis ce que ça faisait, c'est que ça brisait les filets des vis. » - R1 - <i>Directeur de l'assurance qualité, en charge de l'efficience et de l'efficacité organisationnelle ainsi que des normes ISO 9001.</i>
AMÉLIORATION DES PRODUITS	
	« [...] il y a soit des avis de changement qui vont être faits au niveau de la production, il peut y avoir des <i>reworks</i> faits en production [...]. Ça peut amener certaines, plusieurs décisions différentes là, mais oui, à partir de ces données-là. – R2 - <i>Directeur des opérations manufacturières à l'usine de fabrication, en charge de l'équipe d'ingénierie de l'usine, du groupe d'achat et du groupe de production.</i> ¹²
	« Oui, non, ça a un gros impact très positif là, plus on a de données, plus on a des données précises sur l'utilisation ou l'usure de nos produits bien on peut mettre nos efforts aux bons endroits pour s'assurer de maximiser la durée de vie du produit. [...] C'est le niveau de raffinement des produits est plus élevé, euhh. [...] Fais que le raffinement, les fonctions plus précises des produits plus durables, une meilleure connaissance des points faibles des produits, aussi le défi c'est de, c'est compliqué

¹² Il est question des mégadonnées.

	<p>d'arriver à quelque chose de simple, donc de développer un produit simple, quand je dis simple c'est à tous les niveaux : simple à fabriquer, simple à assembler, simple à utiliser. Ça nécessite beaucoup d'efforts et toutes ces données-là nous aident à, on a encore beaucoup de travail à faire, mais tous ces outils-là nous aident à développer un produit qui est le plus simple possible à utiliser pour tout le monde. » - R18 - <i>Copropriétaire et responsable de la R&D et de l'approvisionnement.</i></p>
	<p>« [...] je suis persuadé que d'avoir des données, d'être capable de les mesurer, d'être capable après ça de les analyser, nous amène vers de l'amélioration. Puis, tu sais, dans tous mes emplois j'ai été chercher et je cherche à avoir les données, d'être <i>data driven</i>, de baser nos décisions sur ça et non sur du <i>feeling</i> puis de l'appuyer sur des données. Non, non, c'est un <i>no brainer</i> que ça a que des avantages puis c'est la voie à aller. Je parle beaucoup au niveau d'opération, les données au niveau de la production, des ventes et tout ça, mais à plusieurs niveaux, oui, oui, ça améliore le produit, ça améliore notre qualité de service. » - R2 - <i>Directeur des opérations manufacturières à l'usine de fabrication, en charge de l'équipe d'ingénierie de l'usine, du groupe d'achat et du groupe de production.</i></p>
	<p>« [...] quand c'est fait ou si on a à retravailler des pièces existantes [...] c'est une amélioration en soi. Fais que oui, la pièce soit elle, peut-être qu'elle est plus solide, mais elle corrige un défaut ou un problème qui était survenu dans le passé. Exemple, on pouvait avoir un système de rappel qui ne ramenait pas complètement le fil. Bon bien, il y a eu des tests faits avec des imprimantes 3D pour refaire la tête si on veut du système de rappel et maintenant, bon bien, si on pense à la borne sur rue, elle</p>

	<p>est grandement améliorée, autant au niveau fiabilité, solidité, mais aussi de façon <i>manufacturing</i>, de façon d'assemblage. Plus faci, tu sais, plus facile à assembler, plus simple, plus simple, moins de temps d'assemblage, moins d'outils spéciaux. » - R2 - <i>Directeur des opérations manufacturières à l'usine de fabrication, en charge de l'équipe d'ingénierie de l'usine, du groupe d'achat et du groupe de production.</i></p>
	<p>« Ça veut dire que, en ayant accès à cette donnée d'information-là, ça te permet justement, tu parles de durabilité, c'est ça en bout de ligne, est-ce que ça ça te donne, si tu as accès à cette information-là, bien tu peux travailler après ça, parce que tu vas avoir de la donnée, à améliorer tes produits, donc augmenter ta durabilité, ta longévité de vie à tes produits. » - R16 - <i>Vice-président et responsable de la chaîne d'approvisionnement.</i></p>
	<p>« [...] définitivement, on a amélioré, on a simplifié certaines pièces, on a, etcetera. Fait que, un, il y a de l'optimisation au nombre de pièces, moins qu'il y avait de pièces à faire assembler, moins qu'il y a de risque de bris et ensuite on apprend de nos, tu sais chacune, chaque fois qu'on déploie une borne, il y a une acquisition de connaissance, d'expérience et c'est sûr que depuis les, à chaque année on améliore les choses. Chaque génération s'améliore et nous on a des données de plus en plus [...] » - R3 - <i>Directeur du marketing, responsable de la marque, du message, de la commercialisation, du design, de l'aspect digital, des partenariats avec des parties prenantes externes relatives à l'utilisation et de la branche de l'intelligence marketing.</i></p>
	<p>« [...] maintenant, on peut avoir les données en continu en temps réel et qui va nous permettre d'accélérer les cycles</p>

	<p>d'amélioration des cycles de vie du produit. [...] avec l'industrie 4.0, les différentes données qu'on peut en extraire, ça se fait en temps réel et le temps de réponse, on peut prédire là. On est beaucoup plus précis et c'est sûr que c'est une question d'implantation et de comment on l'implante, mais moi, de mon opinion, je pense que c'est, ceux, les industries, les entreprises qui vont savoir comment exploiter ça, vont avoir de loin un avantage commercial et compétitif qui va être significatif. Ce n'est pas juste une question de moi je suis moins cher. En fait, ils vont avoir un impact là-dessus, ils vont pouvoir maximiser potentiellement leurs coûts (de frais de création), leurs coûts de service et transmettre ces réductions-là aux clients qui va faire en sorte que le produit va mieux servir, va être plus abordable et va être de qualité supérieure. » - R3 - <i>Directeur du marketing, responsable de la marque, du message, de la commercialisation, du design, de l'aspect digital, des partenariats avec des parties prenantes externes relatives à l'utilisation et de la branche de l'intelligence marketing.</i></p>
	<p>« Être capable de comprendre c'est où que le bas blesse ou où est-ce que, si on investit tu sais, je dirais, où est-ce qu'on met nos priorités, ça règle 80% du problème au lieu que d'être dans l'anecdotique. Fait que ça c'est beaucoup l'aspect je dirais des données qu'on récolte qui vont nous aider à prendre des décisions puis à améliorer notre offre. Que ce soit des produits, des logiciels, des fois ça peut être des processus, ça peut être des services, c'est toutes des choses que la donnée devient clé. » - R5 - <i>Président directeur général, dirigeant le conseil exécutif et impliqué dans la commercialisation et le financement.</i></p>

	<p>« [...] c'est qu'on roule des rapports qui nous permettent d'identifier s'il y a un problème disons, les sessions de moins de 30 secondes, on sait qu'une recharge va durer entre une vingtaine de minutes jusqu'à quelques heures, une session qui dure moins de 30 secondes, en quelque part il y a eu quelque chose qui n'a pas fonctionné donc, si on le couple avec l'absence d'un arrêt volontaire de l'utilisateur, bien on peut ainsi se <i>collecter</i> des cas qui viennent populer nos rencontres qualité pour dire, écoutez pour ce type de bornes-là puis là on peut extraire est-ce que c'est tel type de véhicule, est-ce que c'est tel type de conditions de température, est-ce que c'est sur tel type de site, etcétera. Donc, on a quelques initiatives comme ça pour déceler des problèmes de qualité et améliorer par conséquent. » - R4 - <i>Directeur des produits ayant pour rôle de supporter le cycle de vie des produits.</i></p>
--	--

5.3 ENTRETIEN DES PRODUITS

Durant la phase d'utilisation des produits, l'I4.0 peut favoriser l'extension de leur durée de vie de diverses manières. Leur entretien peut grandement contribuer à allonger la durée de leur vie. Trois grandes catégories se démarquent en ce sens sous ce thème soit les actions correctives, l'entretien préventif ainsi que la mise à jour des produits.

5.3.1 ACTIONS CORRECTIVES

L'I4.0 permet de recueillir plusieurs données, et ce en temps réel. Ces données, si elles sont forées, structurées et analysées, offrent des informations riches concernant les défauts. Ces informations peuvent servir à diagnostiquer et cibler les réparations ou les actions correctives à effectuer afin d'agir au bon endroit avec les bons outils et les pièces de rechange nécessaires. Il est parfois question d'aller réparer les équipements, de modifier les logiciels ou même d'agir en amont et effectuer des changements au niveau de la fabrication. Ces données permettent donc de faire perdurer les produits plus longtemps ou d'en augmenter la qualité. Les actions correctives décrites ici sont relatives aux activités de maintenance des stratégies d'affaires d'EDVP dans lesquelles s'inscrivent les entreprises de notre échantillon.

Ces actions correctives prises à partir des données offertes par l'Internet des Objets sont bien résumées par un répondant, administrateur et gestionnaire des opérations dans une entreprise de fabrication et d'exploitation de produits électromécaniques :

« [...] toutes les données qu'on va chercher au niveau des non-conformités, au niveau des tests qui ont échoués, qui ont passés. Tu sais, on est capable après ça de scinder des problèmes, de faire des pareto, [...] Il y a des changements de procédés qui vont découler de ça, donc, assurément que, à partir des données, on est capable de prendre des actions correctives, d'améliorer le produit en place. » - R2 - *Directeur des opérations*

manufacturières à l'usine de fabrication, en charge de l'équipe d'ingénierie de l'usine, du groupe d'achat et du groupe de production.

« [...] toutes les données qu'on ressort des défaillances, des problèmes qualité, des non-conformités qu'on va monter, bon bien, on est capable de prendre des actions correctives pour, un, ne plus que ça se reproduise dans le champ. Donc, nos produits sont de meilleure qualité de changements en changements puis de mois en mois. » - R2 - *Directeur des opérations manufacturières à l'usine de fabrication, en charge de l'équipe d'ingénierie de l'usine, du groupe d'achat et du groupe de production.*

5.3.2 ENTRETIEN PRÉVENTIF

L'I4.0 permet de générer tant de données sur les objets à distance et en temps réel qu'il est possible, à l'aide de l'intelligence artificielle, de les structurer et d'en tirer des informations permettant de sonder l'état des produits, de déceler les variables et les facteurs qui entraînent des défauts et ainsi prévoir les entretiens à faire. Il est donc possible de faire une maintenance des produits avant qu'un bris ne survienne. De surcroît, il est possible de générer un plan d'entretiens préventifs permettant d'agir de manière coordonnée sur tous les produits en fonction de leur état et de leur utilisation, ainsi d'organiser l'ensemble des actions préventives au lieu de travailler à la pièce de manière réactive. Cela favorise l'extension de la durée de vie des produits en créant une continuité dans le fonctionnement des produits et en empêchant une coupure dans leur utilisation.

Pour démontrer le lien entre l'I4.0 et l'extension de la durée de vie des produits grâce à la prédiction de l'entretien sur les produits de son organisation, deux citations tirées d'entreprises utilisant plusieurs technologies de l'I4.0 sont ici exemplifiées. Voici celle d'un ingénieur électrique et fondateur de d'une entreprise œuvrant dans la fabrication et l'exploitation de produits électromécaniques :

« [...] si je suis capable d'ajouter de la prédictibilité qui, au lieu d'attendre que la borne elle lâche moi je vais savoir où est-ce que mes gens se déplacent techniquement puis je vais dire oups, quand tu passes par-là, *by the way* petite maintenance. On sait qu'après X temps, au Québec après 3 hivers, les câbles de cuivre ont tendance à desserrer. Tu sais on dit, vas-y parce que celle-là on a monitorer une petite fluctuation au niveau de la tension d'entrée, je dis n'importe quoi là mais je donne des exemples, bien si la personne va faire une maintenance préventive, mais qui a été prédit, je vais dire ça comme ça, de un je n'y vais pas pour rien, donc je sauve des coûts, et de deux bien il n'y a pas d'interruption de service parce que j'ai utilisé l'intelligence artificielle [...] » - R5 - *Président directeur général, dirigeant le conseil exécutif et impliqué dans la commercialisation et le financement.*

Voici maintenant les propos l'ingénieur mécanique dans une entreprise d'aéronautique et de hautes technologies :

« [...] quand on parle de système *IoT*, bien tu sais, en se connectant sur nos machines, bien on diagnostique aussi nos machines [...] on sait par exemple, s'il y a des alertes on pourra le savoir, donc je pense que sur la durabilité des équipements, admettons la notion de où les machines peuvent émettre des problèmes ou admettons émettre leur situation qu'on puisse prendre des actions, ça va assurément assurer une meilleure durabilité. [...] ça va permettre de faire une meilleure maintenance donc, meilleure maintenance ça va être de pouvoir réparer rapidement ou même de pouvoir prédire le bris de quelque chose. Fais que ça, c'est assurément directement lié avec la durabilité. » - R10 - *Directeur R&D et du 4.0, responsable de la fabrication intégrée par ordinateur et de la conception.*

Le lien entre le diagnostic et l'amélioration continue est indirect, mais est souligné par un mathématicien, formé en ventes, marketing et stratégies d'affaires dans une entreprise de fabrication et d'exploitation de produits électromécaniques :

« La première phase c'est vraiment de prédire la probabilité d'une panne, ça c'est un. Ensuite, une fois que, quand la panne se produit, on va regarder les signatures et les, comment je pourrais dire, les variables qui ont fait en sorte que la panne s'est produite et à partir, faire l'analyse de ces variables-là et regarder qu'est-ce qui peut se faire au niveau de l'amélioration soit que ça soit du matériel, du software, etcétera, etcetera » - R3 - *Directeur du marketing, responsable de la marque, du message, de la commercialisation, du design, de l'aspect digital, des partenariats avec des parties prenantes externes relatives à l'utilisation et de la branche de l'intelligence marketing.*

5.3.3 MISES À JOUR

Les mises à jour sont utiles pour prolonger la durée de vie des produits. En effet, elles peuvent servir à s'ajuster aux nouvelles technologies et tendances de l'industrie, à offrir une meilleure version logicielle, à augmenter le nombre de fonctionnalités d'un même produit ou à régler des bogues informatiques. L'I4.0 permet de les réaliser à distance.

L'ingénieur électrique en puissance et automatisme dans une entreprise de fabrication et d'exploitation de mobilier électromécaniques soutient que les mises à jour sont utiles pour maintenir les produits qui sont déjà en utilisation, et ce à distance, grâce à l'Internet des Objets :

« En fait, puisque les objets, l'ensemble de nos bornes ou presque sont connectées, bien ça nous permet aussi de faire des mises jour à distance. Donc, lorsqu'on détecte une amélioration, qu'elle soit basée sur un bogue littéralement un bogue fixe ou une nouvelle fonctionnalité qu'on veut développer, bien on peut les envoyer en *batch*, comme on dit, et mettre à

jour l'ensemble de nos bornes. Ça devient transparent pour le propriétaire de la borne, pour le client et comme ça, de cette façon-là, constamment on garde à jour à la meilleure version que l'on connaît de nos équipements qui offrent normalement le meilleur service. Donc, ça peut, ce n'est pas juste non plus du correctif là, c'est aussi d'augmenter la capacité d'une borne en termes de fonctionnalités tant que le matériel physique qui est installé le permet. » - R4 - *Directeur des produits ayant pour rôle de supporter le cycle de vie des produits.*

L'ingénieur informatique dans une entreprise de fabrication et d'exploitation de produits électromécaniques souligne que la connectivité permet aussi de maintenir l'ensemble des produits sans déranger la clientèle et ce, à distance :

« [...] l'intérêt c'est de pouvoir mettre à jour le logiciel à distance. Donc, on peut, par exemple la nuit, faire des déploiements, faire des mises à jour. S'il y a des bogues chez le client, bien on n'est pas obligé d'aller avec un ordinateur faire la correction sur la borne, tout ça peut se faire à distance. » - R1 - *Directeur de l'assurance qualité, en charge de l'efficacité et de l'efficacité organisationnelle ainsi que des normes ISO 9001.*

Le tableau 5.0 de la page suivante regroupe tous les extraits de verbatims traitant de l'entretien des produits et ce, divisés par les différentes catégories composant ce thème.

Tableau 5.0 : Extraits d'entrevues portant sur l'entretien des produits

ACTIONS CORRECTIVES	
	« Ok. Bien le ERP génère énormément de données. Donc, moi je l'utilise quand même passablement je dirais parce que, au niveau consommation du matériel, au niveau prévision des bornes. Donc, il faut se baser oui sur des projections, mais en même temps, les

	<p>projections sont basées sur l'historique. On monitore, on a plusieurs KPI qui sortent des données en fait, on extrait des valeurs de Divalto, de notre ERP qu'on traite en du Excel ou en traite en BI présentement puis on est capable d'avoir des dash board intéressants. Donc on valide nos livraisons à temps, on valide nos niveaux d'inventaire, nos taux de roulement, on valide les revenus, les marges. Il y a beaucoup, beaucoup, beaucoup de données, beaucoup de produits, ma production, ma productivité, mon taux d'heures scannées. Donc il y beaucoup de données qui sont disponibles dans le système ERP et qu'on va chercher de l'information et qu'on présente sous forme de tableaux et qu'on prend des actions correctives ou on prend des actions à partir de ces données-là. » - R2 - <i>Directeur des opérations manufacturières à l'usine de fabrication, en charge de l'équipe d'ingénierie de l'usine, du groupe d'achat et du groupe de production.</i></p>
	<p>« [...] disons que tu fabriques un produit, ok puis tu as de la donnée. Les gens du marketing disent ok, j'ai des réclamations [...] ça va te permettre d'avoir de la donnée, en voulant dire, hey il faut arrêter on a un problème, solutionner le problème puis faisons un plan d'action pour essayer d'arrêter le nombre de réclamations. Parce qu'on a monitoré les, disons, tous les problèmes qualité qu'on a eu. Fais que la donnée, c'est la donnée qui t'a permis de faire ça par l'analyse. Tu n'aurais pas pu faire l'analyse si tu n'as pas, analyser ça te prend de la donnée. » - R16 - <i>Vice-président et responsable de la chaîne d'approvisionnement.</i></p>
	<p>« Ça nous donne présentement une vue sur ce qui se passe, lorsque quelque chose se produit, un problème, on a la capacité d'aller lire, d'aller retourner, d'aller voir ce qui se passe. Donc, on est réactif, on collecte les données, mais on est quand même plutôt réactif à</p>

	<p>agir avec les données. Donc, présentement ça nous sert un peu de mémoire. Là où on veut aller, c'est justement là d'arriver à prédire d'automatiser des alarmes. Si on sait que tel type de situation, lorsqu'elle est, on est en présence des facteurs A B C, bien on pourrait automatiquement réaliser l'action Y [...] » - R4 - <i>Directeur des produits ayant pour rôle de supporter le cycle de vie des produits.</i>¹³</p>
	<p>« Puis, on a développé un outil avec la fabrication additive pour permettre aux équipes de service d'aller pouvoir retirer les inserts sans avoir à retirer la borne complètement, parce qu'on avait un haut taux de retours d'installateurs qui, au lieu de faire un vissage manuel, utilisaient des outils à percussion, donc des power tools, puis ce que ça faisait, c'est que ça brisait les filets des vis. » - R1 - <i>Directeur de l'assurance qualité, en charge de l'efficience et de l'efficacité organisationnelle ainsi que des normes ISO 9001.</i></p>
	<p>« [...] toutes les données qu'on va chercher au niveau des non-conformités, au niveau des tests qui ont échoué, qui ont passé. Tu sais, on est capable après ça de scinder des problèmes, de faire des pareto, [...] Il y a des changements de procédés qui vont découler de ça, donc, assurément que, à partir des données, on est capable de prendre des actions correctives, d'améliorer le produit en place. » - R2 - <i>Directeur des opérations manufacturières à l'usine de fabrication, en charge de l'équipe d'ingénierie de l'usine, du groupe d'achat et du groupe de production.</i></p>
	<p>« [...] toutes les données qu'on ressort des défaillances, des problèmes qualité, des non-conformités qu'on va monter, bon bien, on est capable de prendre des actions correctives pour, un, ne plus</p>

¹³ Il est question des mégadonnées.

	<p>que ça se reproduise dans le champ. Donc, nos produits sont de meilleure qualité de changements en changements puis de mois en mois. » - R2 - <i>Directeur des opérations manufacturières à l'usine de fabrication, en charge de l'équipe d'ingénierie de l'usine, du groupe d'achat et du groupe de production.</i></p>
	<p>« Donc, ça nous revient, soit du service, soit du customer ex et selon le diagnostic, bon bien, il y a soit des avis de changement qui vont être fait au niveau de la production, il peut y avoir des reworks faits en production, il peut y avoir des upgrades faits dans le champ aussi. Ça peut amener certaines, plusieurs décisions différentes là mais oui, à partir de ces données-là. » - R2 - <i>Directeur des opérations manufacturières à l'usine de fabrication, en charge de l'équipe d'ingénierie de l'usine, du groupe d'achat et du groupe de production.</i></p>
ENTRETIEN PRÉVENTIF	
	<p>« [...] si on a des problèmes, on est capables de les détecter, on est capable d'interagir, on est capable d'aller chercher de l'information d'utilisation sur la borne pour essayer de comprendre dans quel contexte, comment reproduire les problèmes et tout ça. » - R1 - <i>Directeur de l'assurance qualité, en charge de l'efficience et de l'efficacité organisationnelle ainsi que des normes ISO 9001.</i></p>
	<p>« [...] on crée des dash board, des outils internes pour dire, bien ok, cette borne-là est installée [...] on est rendu à 9000 cycles, c'est peut-être le temps de préparer, potentiellement, un remplacement et aussi, en regardant, on peut faire, on travaille vers, mon équipe travaille sur un, je pourrais dire, un programme de modélisation prédictive. Parce que dans le fond, il y a des signatures. Nous, on regarde des données brutes et on regarde les logs. » - R3 - <i>Directeur</i></p>

	<p><i>du marketing, responsable de la marque, du message, de la commercialisation, du design, de l'aspect digital, des partenariats avec des parties prenantes externes relatives à l'utilisation et de la branche de l'intelligence marketing.</i></p>
	<p>« On sait aussi que, par exemple on a la géolocalisation [...] où il y a une pièce qui brise souvent, on est capable d'aider l'équipe de service pour préparer des pièces pour cette région-là et pour créer un plan de maintenance, avec le client, pour s'assurer que nos bornes sont tout le temps opérationnelles le plus possible. » - R3 - <i>Directeur du marketing, responsable de la marque, du message, de la commercialisation, du design, de l'aspect digital, des partenariats avec des parties prenantes externes relatives à l'utilisation et de la branche de l'intelligence marketing.</i></p>
	<p>« La prochaine étape pour nous est d'arriver à créer des automatismes avec ça. Donc, de détecter des patrons soit de défaillance ou des patrons qui génèrent des futurs bris. Donc, s'assurer d'offrir une maintenance prédite donc en termes d'envoyer les gens avant que ça brise puis s'assurer d'offrir le service continuellement. Donc on a présentement assez bien installé les points de lecture, on capture les données, on les rapporte. Maintenant, c'est de réussir à mettre une couche d'intelligence là-dedans pour prédire et accélérer le service des bornes. » - R4 - <i>Directeur des produits ayant pour rôle de supporter le cycle de vie des produits.</i></p>
	<p>« [...] quand on parle de système IoT, bien tu sais, en se connectant sur nos machines, bien on diagnostique aussi nos machines [...] on sait par exemple, s'il y a des alertes on pourra le savoir, donc je pense que sur la durabilité des équipements, admettons la notion de</p>

	<p>où les machines peuvent émettre des problèmes ou admettons émettre leur situation qu'on puisse prendre des actions, ça va assurément assurer une meilleure durabilité. [...] ça va permettre de faire une meilleure maintenance donc, meilleure maintenance ça va être de pouvoir réparer rapidement ou même de pouvoir prédire le bris de quelque chose. Fais que ça, c'est assurément directement lié avec la durabilité.» - R10 - <i>Directeur R&D et du 4.0, responsable de la fabrication intégrée par ordinateur et de la conception.</i></p>
	<p>« La première phase c'est vraiment de prédire la probabilité d'une panne, ça c'est un. Ensuite, une fois que, quand la panne se produit, on va regarder les signatures et les, comment je pourrais dire, les variables qui ont fait en sorte que la panne s'est produite et à partir, faire l'analyse de ces variables-là et regarder qu'est-ce qui peut se faire au niveau de l'amélioration soit que ça soit du matériel, du software, etcétera, etcétera » - R3 - <i>Directeur du marketing, responsable de la marque, du message, de la commercialisation, du design, de l'aspect digital, des partenariats avec des parties prenantes externes relatives à l'utilisation et de la branche de l'intelligence marketing.</i></p>
	<p>« [...] vu qu'ils sont connectés puis qu'on est capable de voir leur état, s'il y a de quoi qui, des choses anormales qu'on peut voir sur le réseau [...]. Être proactif aussi sur voir ce qui peut s'en venir, certaines problématiques, contrairement qu'avant, si tu as moins d'information, des fois tu es plus dur d'analyser puis tu vois souvent les problèmes quand ils arrivent. Tandis que présentement, on est capable de voir, en ayant un état de la borne connectée, bien, normalement, effectivement on est capable de corriger les problèmes avant que ça nous pette dans face. » - R7 - <i>Superviseur</i></p>

	<p><i>de production à l'usine de fabrication, en charge de coordonner les RH, de faire le lien avec l'équipe de direction, celle des achats et celle de l'amélioration continue.</i></p>
	<p>« Je sais que de votre côté, c'est plus le volet durabilité qui vous intéresse. Mais moi, à ce niveau-là, je pense que si on développe davantage toute notre maintenance préventive, ces amas de données, je le vois là on essaie des fois, je dirige des actions correctives pour qu'on trouve des problèmes puis des fois, on voit, tu as de la donnée ou la donnée n'est pas assez structurée, pas assez bien organisée. Nos, les bornes ne sont pas assez précises dans les données qu'elles nous donnent. Plus on va développer ça, plus on va pouvoir automatiser cette saisie-là, on va être en mesure de détecter encore mieux les problèmes puis, même de les détecter avant qu'ils ne se produisent. » - R1 - <i>Directeur de l'assurance qualité, en charge de l'efficience et de l'efficacité organisationnelle ainsi que des normes ISO 9001.</i></p>
	<p>« [...] si je suis capable d'ajouter de la prédictibilité qui, au lieu d'attendre que la borne elle lâche moi je vais savoir où est-ce que mes gens se déplacent techniquement puis je vais dire oups, quand tu passes par-là, by the way petite maintenance. On sait qu'après X temps, au Québec après 3 hivers, les câbles de cuivre ont tendance à desserrer. Tu sais on dit, vas-y parce que celle-là on a monitorer une petite fluctuation au niveau de la tension d'entrée, je dis n'importe quoi là mais je donne des exemples, bien si la personne va faire une maintenance préventive, mais qui a été prédit, je vais dire ça comme ça, de un je n'y vais pas pour rien, donc je sauve des coûts, et de deux bien il n'y a pas d'interruption de service parce que j'ai utilisé l'intelligence artificielle [...] » - R5 -</p>

	<i>Président directeur général, dirigeant le conseil exécutif et impliqué dans la commercialisation et le financement.</i>
MISES À JOUR	
	« Les requis augmentent et c'est là que les nouvelles fonctionnalités et cette évolution rapide là va peut-être être ce qui va amener des cycles de vie un peu plus court là. Un besoin d'ajouter davantage de fonctionnalités. Donc, ça devient important de planifier les cycles de vie des produits, des produits avec des cycles de vie évolutifs dans le temps avec une architecture ouverte et modulaire et évolutive pour permettre justement de palier à cette innovation qui se fait à vitesse beaucoup plus accélérée qu'au début de la compagnie. » - R4 - <i>Directeur des produits ayant pour rôle de supporter le cycle de vie des produits.</i>
	« [...] l'intérêt c'est de pouvoir mettre à jour le logiciel à distance. Donc, on peut, par exemple la nuit, faire des déploiements, faire des mises à jour. S'il y a des bogues chez le client, bien on n'est pas obligé d'aller avec un ordinateur faire la correction sur la borne, tout ça peut se faire à distance. » - R1 - <i>Directeur de l'assurance qualité, en charge de l'efficience et de l'efficacité organisationnelle ainsi que des normes ISO 9001.</i>
	« En fait, puisque les objets, l'ensemble de nos bornes ou presque sont connectées, bien ça nous permet aussi de faire des mises jour à distance. Donc, lorsqu'on détecte une amélioration, qu'elle soit basée sur un bogue littéralement un bogue fixe ou une nouvelle fonctionnalité qu'on veut développer, bien on peut les envoyer en batch, comme on dit, et mettre à jour l'ensemble de nos bornes. Ça devient transparent pour le propriétaire de la borne, pour le client

	<p>et comme ça, de cette façon-là, constamment on garde à jour à la meilleure version que l'on connaît de nos équipements qui offrent normalement le meilleur service. Donc, ça peut, ce n'est pas juste non plus du correctif là, c'est aussi d'augmenter la capacité d'une borne en termes de fonctionnalités tant que le matériel physique qui est installé le permet. » - R4 - <i>Directeur des produits ayant pour rôle de supporter le cycle de vie des produits.</i></p>
--	---

5.4 RÉSISTANCES À L'UTILISATION DES TECHNOLOGIES DE L'INDUSTRIE 4.0

Plusieurs raisons ont été émises concernant le refus ou l'hésitation à utiliser les technologies de l'I4.0 au cours des entretiens. Il est possible de les catégoriser sous trois thèmes soit en raison des propriétés de la matière, du comportement des utilisateurs d'aller vers une consommation de renouvellement ainsi que des barrières à l'entrée, c'est-à-dire des difficultés à implémenter les technologies dans l'entreprise.

5.4.1 PROPRIÉTÉS DE LA MATIÈRE

La matière elle-même est un élément souligné par plusieurs répondant pour justifier le refus, l'impossibilité ou l'inutilité d'utiliser la technologie de la fabrication additive qu'ils possèdent dans leur entreprise, soit l'imprimante 3D utilisant le plastique. Ils argumentent le fait que ce plastique est peu résistant, ne permet pas de faire des tests de durabilité, n'est pas suffisamment esthétique ou imprime des objets parfois trop petits pour leurs besoins. De plus, certains répondants soutiennent que la durée de vie d'un produit dépend beaucoup des matériaux qui le composent et que les avancées de l'I4.0 seront éphémères et ne pourront dépasser la durabilité que la matière peut conférer.

Les éléments qui jouent en défaveur de l'utilisation de l'impression 3D de plastique sont évoqués par cet ingénieur mécanique œuvrant dans une entreprise de fabrication et d'exploitation de produits électromécaniques :

« Fait que l'impression 3D, c'est très intéressant pour du, peut-être du petit volume, du petit volume rapide, mais pour du haut volume, il y a d'autres méthodes de fabrication qui sont l'injection plastique qui va nécessairement avoir un meilleur fini de surface puis avoir peut-être des meilleures propriétés, fait qu'il y a énormément de types ou de plastique pour l'injection plastique. [...] L'impression 3D, étant donné que c'est plusieurs fines couches, ça va toujours avoir une apparence peut-être non

finie, sauf si on vient la peindre par-dessus par la suite. Mais encore là, le plastique n'est pas aussi résistant » - R6 - *Concepteur mécanique au département de la R&D, en charge de la recherche et développement, de la conception et de la mise en production.*

Voici un avis plus tranché concernant l'apport des matériaux à l'extension de la durée de vie des produits évoqués par le fondateur d'une entreprise de fabrication d'outillage :

« [...] ce qui peut amener le changement dans la durée de vie d'un produit, ce n'est pas seulement sa conception, c'est les matériaux qui sont utilisés, c'est la matière. » - R15 - *Président directeur général de l'entreprise.*

Enfin, lors d'une question de clôture d'interview, voici ce qu'un ingénieur électrique en puissance et automatisation dans une entreprise de fabrication et d'exploitation de produits électromécaniques a énoncé concernant les technologies de l'I4.0 en général :

« [...] la limitation matérielle compétitionne très fort avec le 4.0 puis que le gain qui sera fait par le 4.0 ne sera pas éternel, il va rapidement être rattrapé par la limitation matérielle de ce que le produit peut faire en soi. »
- R4 - *Directeur des produits ayant pour rôle de supporter le cycle de vie des produits.*

5.4.2 CONSOMMATION DE RENOUVELLEMENT

Certains répondants évoquent le fait que les consommateurs souhaitent renouveler leurs biens plutôt que les faire perdurer plus longtemps et qu'en cela, l'I4.0 n'est pas le seul ou parfois pas du tout un gage de durabilité. C'est particulièrement le cas dans les industries où les tendances fluctuent rapidement comme dans celles du prêt-à-porter et des véhicules.

C'est le cas d'un ingénieur électrique en puissance et automatisme dans une entreprise de fabrication et d'exploitation de produits électromécaniques :

« Oui, bien en fait, c'est ce que je me disais dans ma réflexion. J'ai, je vois, il y a une vague de fond que la majorité des choses deviennent des consommables. Donc, beaucoup de choses qui se réparaient avant il n'y a pratiquement plus de réparation. On change pour le prochain produit parce que justement la technologie évolue plus vite et il y a une nouvelle fonctionnalité, un nouveau besoin plus ou moins requis, mais qui excite l'acheteur, qui va le forcer plus à acheter un nouveau produit, une nouvelle génération que d'augmenter la durée de vie de son produit précédent. » - R4 - *Directeur des produits ayant pour rôle de supporter le cycle de vie des produits.*

« [...] les gens restent beaucoup plus dans une consommation de renouvellement. Les compagnies d'auto ont même tendance à offrir des plans de renouvellement de véhicules moyennant une mensualité plus élevée, on a toujours un véhicule neuf. Cette force de consommation là est peut-être plus forte que la pérennité que peut amener le 4.0. » - R4 - *Directeur des produits ayant pour rôle de supporter le cycle de vie des produits.*

Dans d'autres cas, ce sont les normes qui dictent le moment de renouveler un bien et dans certaines industries, ces normes datent d'il y a longtemps et n'ont pas changées en fonction des avancées quant à la durabilité ou la qualité des produits d'aujourd'hui. C'est ce qu'évoque un ingénieur mécanique dans une entreprise d'aéronautique et de hautes technologies :

« [...] dans le monde militaire, quand ils fabriquent par exemple des douilles pour l'armement, c'est tellement normé depuis des années qu'après X mille cycles ils changent le die, fait qu'ils ne se questionnent pas à savoir il est-tu encore bon, un peu, beaucoup, ils changent. Fait qu'encore là, c'est comme si l'industrie est comme cannée dans des standards puis ils ne sortent pas vraiment de là. » - R10 - *Directeur R&D*

et du 4.0, responsable de la fabrication intégrée par ordinateur et de la conception.

5.4.3 BARRIÈRES À L'ENTRÉE

Certains répondants expriment des réticences à l'utilisation ou l'acquisition de certaines technologies propres à l'I4.0. C'est le cas des logiciels de dessin ou de simulation entre autres ou encore de l'utilisation plus large des technologies de suivi par capteurs RFID. Les arguments pour cette résistance sont ceux du coût d'acquisition, du temps nécessaire à leur programmation, à leur utilisation ou à l'apprentissage de leur fonctionnement. En effet, les répondants évoquent la loi de l'offre et la demande et le fait que les consommateurs ne sont pas prêts à payer ce que vaudrait une augmentation de la durabilité par les technologies de l'I4.0.

Le juste prix, c'est-à-dire ce que le consommateur est prêt à payer pour le bien, est un élément soulevé par ce répondant, ingénieur mécanique dans une entreprise de fabrication d'outillage :

« [...] c'est toujours le défi de jusqu'où on monte la qualité sans dépasser un peu la ligne dans le sable que le consommateur au bout va être prêt à payer pour un produit. Donc, il y beaucoup ça qui joue. Évidemment on pourrait faire un produit tout le temps, on pourrait toujours faire un produit plus durable, plus blindé qui est indestructible, mais il y a toujours un coût rattaché à ça là. » - R17 - *Coordonnateur de la recherche et développement, en charge de diriger les ingénieurs du département.*

Le temps nécessaire à l'utilisation des étiquettes de suivi RFID dans l'usine de fabrication est trop demandant pour les effectifs disponibles selon cette professionnelle œuvrant dans une entreprise de fabrication de mobilier électromécanique :

« C'est qu'on n'est pas encore assez, on n'est pas beaucoup d'employés puis c'est sûr que oui, on a beaucoup de pièces mais ça demanderait plus

de temps si on veut. Il faudrait se mettre à zapper tous les produits, ça demanderait de la main-d'œuvre de plus. On est limité. » - R20
Planificatrice de production et acheteuse.

Le tableau 6.0 présente tous les extraits de verbatims qui concernent les résistances à l'utilisation de l'industrie 4.0 et ce, selon les différentes catégories.

Tableau 6.0 : Extraits d'entrevues portant sur la résistance à l'utilisation des technologies de l'industrie 4.0

PROPRIÉTÉS DE LA MATIÈRE	
	« Si on imprimait du métal, je vous dirais qu'on peut plus facilement valider la durabilité du produit, mais ce n'est pas ce genre de technologie-là pour valider. Puis là on ferait des essais en corrosion, en chambre environnementale avec des produits chimiques, tout ça. Pour la durabilité de nos produits, ce n'est pas tant, la fabrication additive ce n'est pas là qu'il y a la plus grande valeur ajoutée à mon avis. » - R1 - <i>Directeur de l'assurance qualité, en charge de l'efficience et de l'efficacité organisationnelle ainsi que des normes ISO 9001.</i>
	« [...] la limitation matérielle compétitionne très fort avec le 4.0 puis que le gain qui sera fait par le 4.0 ne sera pas éternel, il va rapidement être rattrapé par la limitation matérielle de ce que le produit peut faire en soi. » - R4 - <i>Directeur des produits ayant pour rôle de supporter le cycle de vie des produits.</i>
	« [...] ce qui peut amener le changement dans la durée de vie d'un produit, ce n'est pas seulement sa conception, c'est les matériaux qui sont utilisés, c'est la matière. Dans la vie, tout s'améliore, je veux dire. Je regarde il y a des résines aujourd'hui qui n'existaient pas il y a 20 ans, qu'on utilise dans le plastique pour faire des produits qui sont beaucoup plus

	<p>résistantes, qui sont beaucoup plus solides donc, oui, j'ose espérer que les produits... Par contre, si on regarde une pelle en acier, bien l'acier qu'on utilise aujourd'hui, c'est le même acier qu'on utilisait il y a 20 ans puis c'est le même acier qu'on utilisait il y a 50 puis c'est le même processus. Donc, c'est tout aussi durable, nos pelles en acier étaient tout aussi durables il y a 20 ans qu'elles le sont aujourd'hui. » - R15 - <i>Président directeur général de l'entreprise.</i></p>
	<p>« Fais que l'impression 3D, c'est très intéressant pour du, peut-être du petit volume, du petit volume rapide, mais pour du haut volume, il y a d'autres méthodes de fabrication qui sont l'injection plastique qui va nécessairement avoir un meilleur fini de surface puis avoir peut-être des meilleures propriétés, fait qu'il y a énormément de types ou de plastique pour l'injection plastique. [...] L'impression 3D, étant donné que c'est plusieurs fines couches, ça va toujours avoir une apparence peut-être non finie, sauf si on vient la peindre par-dessus par la suite. Mais encore là, le plastique n'est pas aussi résistant » - R6 - <i>Concepteur mécanique au département de la R&D, en charge de la recherche et développement, de la conception et de la mise en production.</i></p>
	<p>« Mais, c'est que le problème, c'est que l'imprimante 3D imprime des choses trop petites. Nous la plupart de nos pièces, c'est des grosses pièces de plusieurs plusieurs mètres de longueur puis de hauteur. C'est là l'aspect, je te dirais, peut-être plus pour les pièces plus petites, ça serait moins, bien ça serait plus comparable à faire en impression 3D avant. Mais pour des grosses pièces que, comme des fois on fait des structures que ça mesure, tu sais un bâtiment là. Fais que là, ça</p>

	<p>c'est plus complexe à modéliser en 3D. » - R14 - <i>Ingénieur et chargé de projet au département des opérations.</i></p>
	<p>« Non, on ne l'utilise pas. C'est un genre de solveur qui maximiserait certains paramètres en en faisant varier d'autres, non on n'utilise pas ça. Ça serait, bien tu sais, je sais que ça se fait, j'ai déjà vu des exemples de ça ou des formations de ça mais en tant que tel ça demande quand même beaucoup de temps de programmation, de tout paramétrer ça pour que ça le fasse puis nous, dans le fond, chaque design est quand même assez unique qu'on ne repart pas nécessairement d'un autre fichier ou. Comme si on faisait tout le temps exemple une pièce x, différentes versions, différentes formes, différentes fonctions, mais elle serait toujours la même géométrie de base, on pourrait peut-être l'optimiser de façon automatique, mais, pour nous, ce n'est pas à valeur ajoutée de passer du temps pour programmer un peu cette intelligence artificielle-là pour l'utiliser. » - R17 - <i>Coordonnateur de la recherche et développement, en charge de diriger les ingénieurs du département.</i></p>
	<p>« [...] on n'utilise pas l'imprimante pour des pièces de production. Nos produits sont principalement en acier, en acier ou en aluminium, dépendant des accessoires. Donc, s'il y a une pièce qui brise ou qui faiblit anormalement puis qu'il faut la remplacer ou la solidifier ça va être fait avec le vrai matériel. » - R19 - <i>Président, copropriétaire et responsable des finances, des ventes et du marketing.</i></p>
	<p>« [...] quand ils veulent faire évoluer une pièce, ils vont l'imprimer en 3D pour voir de quoi ça a l'air mais tu sais ce</p>

	n'est pas quelque chose qu'on pourrait apposer en production parce que ce n'est pas assez solide de toute façon. » - R20 - <i>Planificatrice de production et acheteuse.</i>
CONSOMMATION DE RENOUVELLEMENT	
	« Oui, bien en fait, c'est ce que je me disais dans ma réflexion. J'ai, je vois, il y a une vague de fond que la majorité des choses deviennent des consommables. Donc, beaucoup de choses qui se réparaient avant il n'y a pratiquement plus de réparation. On change pour le prochain produit parce que justement la technologie évolue plus vite et il y a une nouvelle fonctionnalité, un nouveau besoin plus ou moins requis, mais qui excite l'acheteur, qui va le forcer plus à acheter un nouveau produit, une nouvelle génération que d'augmenter la durée de vie de son produit précédent. » - R4 - <i>Directeur des produits ayant pour rôle de supporter le cycle de vie des produits.</i>
	« [...] les gens restent beaucoup plus dans une consommation de renouvellement. Les compagnies d'auto ont même tendance à offrir des plans de renouvellement de véhicules moyennant une mensualité plus élevée, on a toujours un véhicule neuf. Cette force de consommation là est peut-être plus forte que la pérennité que peut amener le 4.0. » - R4 - <i>Directeur des produits ayant pour rôle de supporter le cycle de vie des produits.</i>
	« [...] dans le monde militaire, quand ils fabriquent par exemple des douilles pour l'armement, c'est tellement normé depuis des années qu'après X mille cycles ils changent le die, fait qu'ils ne se questionnent pas à savoir il est-tu encore bon, un peu, beaucoup, ils changent. Fait qu'encore là, c'est comme

	<p>si l'industrie est comme cannée dans des standards puis ils ne sortent pas vraiment de là. » - R10 - <i>Directeur R&D et du 4.0, responsable de la fabrication intégrée par ordinateur et de la conception.</i></p>
	<p>« [...] nos produits ont toujours été reconnus comme étant durables puis ça a toujours été dans nos valeurs d'offrir quelque chose qui va durer au fil des années puis qu'en fait tu vas changer parce que tu es tanné de la couleur plus que ton vêtement n'est plus bon. » - R11 - <i>Responsable du marketing et des communications.</i></p>
BARRIÈRES À L'ENTRÉE	
	<p>« [...] c'est toujours le défi de jusqu'où on monte la qualité sans dépasser un peu la ligne dans le sable que le consommateur au bout va être prêt à payer pour un produit. Donc, il y beaucoup ça qui joue. Évidemment on pourrait faire un produit tout le temps, on pourrait toujours faire un produit plus durable, plus blindé qui est indestructible, mais il y toujours un coût rattaché à ça là. » - R17 - <i>Coordonnateur de la recherche et développement, en charge de diriger les ingénieurs du département.</i></p>
	<p>« On l'a vérifié, je pense, la possibilité avec ces technologies-là, mais pour l'instant on n'est pas encore en mesure de le faire physiquement. C'est parce que je pense que c'était encore trop dispendieux. » - R11 - <i>Responsable du marketing et des communications.</i>¹⁴</p>

¹⁴ Il est question de l'acquisition d'un logiciel de dessin permettant la simulation par ordinateur.

	<p>« [...] c'était bien, mais qu'en même temps, il était difficile d'utiliser le logiciel » - R11 - <i>Responsable du marketing et des communications.</i>¹⁵</p>
	<p>« Mais pour l'instant, on n'a pas, tu sais le RFID ça peut aller loin là. On aurait pu avoir, à chaque fois que ça scan, on l'associe à un client puis on peut lui envoyer des offres personnalisées, on pourrait justement suivre le manteau, bon il a été acheté à telle heure, à telle date. [...] on pourrait le connecter avec notre système de publicité, la géolocalisation des clients, la géolocalisation des produits, mais. Tu sais, tout ça a des coûts aussi puis pour l'instant ça ne valait pas la peine en termes d'efficacité si on veut d'aller jusque-là. » - R11 - <i>Responsable du marketing et des communications.</i></p>
	<p>« [...] la seule affaire qui va justifier de faire le saut dans les nouvelles technologies, ça va être la demande. Autrement dit, il est inutile de créer des produits ou de s'automatiser tant que le marché n'aura pas répondu avec une commande [...] Mais si je n'ai pas une réponse du marché, ça ne donne rien, tu vas perdre ton argent, tu vas perdre ton temps. » - R13 - <i>Président, en charge de la conception et du développement de marchés.</i></p>
	<p>« C'est qu'on n'est pas encore assez, on n'est pas beaucoup d'employés puis c'est sûr que oui, on a beaucoup de pièces mais ça demanderait plus de temps si on veut. Il faudrait se mettre à zapper tous les produits, ça demanderait de la main-d'œuvre de plus. On est limité. » - R20 - <i>Planificatrice de production et acheteuse.</i>¹⁶</p>

¹⁵ Il est question du logiciel de simulation par ordinateur.

¹⁶ Il est question du RFID.

5.5 CADRE CONCEPTUEL

Les résultats démontrent que l'I4.0 peut supporter l'extension de la durée de vie des produits de diverses manières. Trois grands axes transversaux de soutien se dégagent des éléments soulevés par les entrevues soit les possibilités que ces technologies offrent pour identifier des facteurs et des informations pertinentes, pour valider les idées, les informations et les concepts ainsi que pour prévoir les actions à réaliser ou les changements dans l'environnement.

5.5.1 IDENTIFICATION

Dans un premier temps, plusieurs éléments émanant des résultats démontrent que les technologies permettent d'identifier des indicateurs, des variables et des facteurs déterminants pour les entreprises. En effet, les données récoltées par les produits, mais aussi au cours du processus de production et dans l'environnement de l'entreprise, sont par la suite analysées ce qui permet la création d'historiques et de statistiques. Ces informations servent à identifier les modes d'utilisation, les éléments qui font défaut, les erreurs de fabrication, l'état des produits en service et les facteurs qui mènent ou qui entourent les bris et les défauts, en plus des tendances et des besoins de la clientèle. Le fait d'identifier ces éléments permet aux entreprises de créer des produits en adéquation avec les besoins des utilisateurs et des clients, de concevoir des produits durables et de qualité, de les améliorer en cours de production, d'améliorer leur manufacture, de réduire les erreurs de production et d'améliorer la maintenance des produits. C'est donc autant pour la conception, la fabrication que pour la maintenance et l'entretien que l'identification est utile et profitable. Cela appuie les suppositions de Akundi et Lopez (2021) qui suggèrent que l'ingénierie des systèmes basée sur des modèles permettrait de colliger des informations fournissant des indices pour identifier les prérequis et les risques que les méthodes basées sur la documentation ne seraient pas en mesure de déceler. Cela va aussi dans le sens de la synthèse réalisée par Ertz et al. (2022) affirmant que les mégadonnées contribuent à identifier les stratégies de maintenance les plus appropriées pour prolonger la durée de vie des produits. Ingemarsdotter et al. (2020) stipulent que l'Internet des Objets offre l'opportunité d'identifier la condition des produits au fil du temps, permettant d'identifier les améliorations à apporter à la conception. Enfin, cela va aussi dans le

sens du cadre conceptuel développé par Ren et al. (2019) qui concluent que le forage des mégadonnées supporte l'identification des besoins des clients au niveau de la conception ainsi que des défauts permettant le diagnostic pour soutenir l'entretien des produits.

5.5.2 VALIDATION

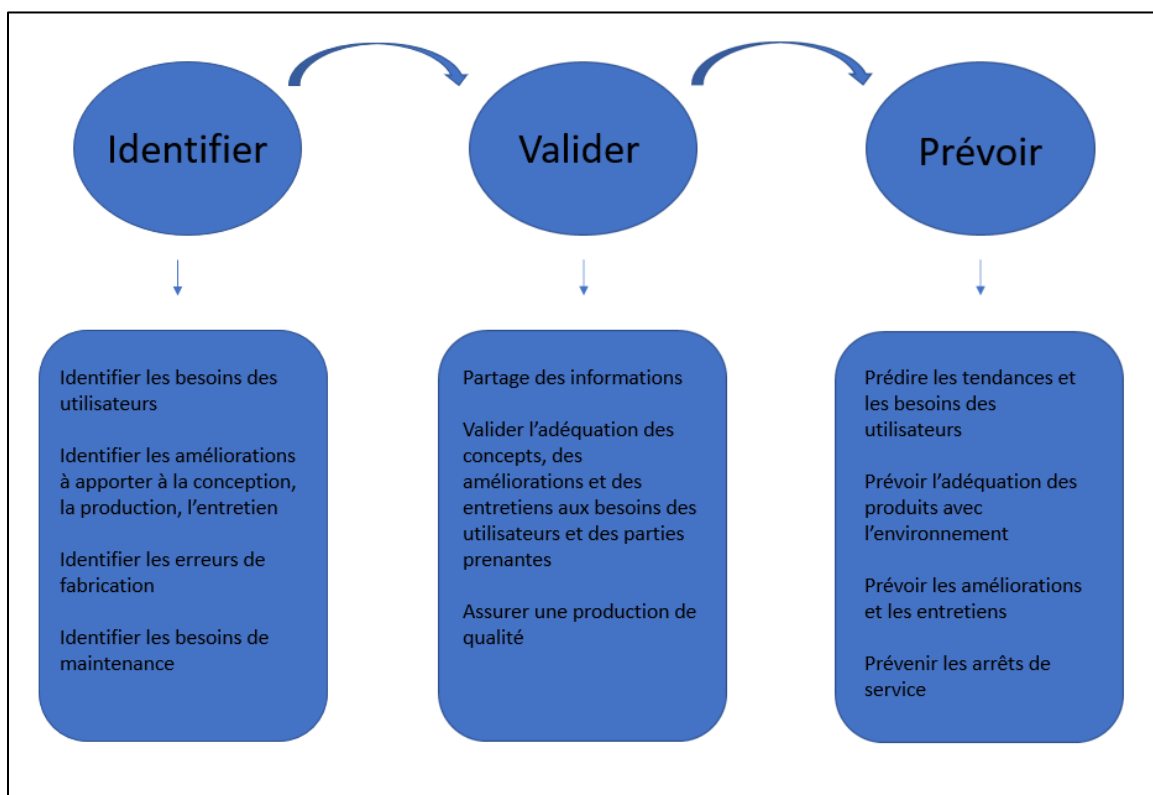
Le deuxième axe de soutien que fournit l'I4.0 à l'EDVP est la validation des idées, des concepts, des rendus et des actions à réaliser. En effet, l'analyse et le partage de données, d'informations basées sur ces dernières, à distance et en temps réel ainsi que le prototypage rapide par la fabrication additive favorisent les échanges et le partage concernant la conception, l'amélioration et la fabrication des produits. De plus, les informations obtenues dans le processus de fabrication par les bancs de tests par exemple servent à assurer la qualité et réduire les erreurs. Enfin, les données d'utilisation permettent des entretiens adéquats en fonction des besoins des produits, rendant plus facile la prise de décision quant aux actions à prendre. Lin et al. (2019) ont démontré par leur étude que les informations sur les caractéristiques critiques de qualité partagées via une plateforme d'information nuagique entre les parties prenantes d'une chaîne logistique offrent un feed-back permettant l'amélioration de la conception, favorisant la stabilité des processus et proposant des systèmes de maintenance. Cela permet une conception plus robuste et de meilleurs critères de sélections pour les fournisseurs. Les capteurs présents sur les bancs de test durant la phase de fabrication permettent aussi une validation des rendus et de la qualité produite avant la livraison aux utilisateurs. Cela confirme les suppositions d'Akundi et Lopez (2021) qui avaient identifié, dans leur enquête sur l'ingénierie des systèmes basée sur des modèles, que ces derniers sont en mesure de « supporter la conception, la spécification ainsi que la vérification et la validation des activités dans un large éventail de systèmes » (Traduction libre d'Akundi et Lopez, 2021, p. 107). De cette manière, une adéquation aux besoins, aux requis et aux environnements est facilitée, assurant une pertinence aux produits et à leurs améliorations. Leurs fonctions peuvent donc être cohérentes durant une plus longue période. Cela est en accord avec les conclusions d'Agrawal et al (2021) qui concluent que « l'implication des clients par l'utilisation de la numérisation est nécessaire pour créer des solutions innovantes et des produits circulaires et durables » (traduction libre d'Agrawal et al, 2021, p.769).

5.5.3 PRÉVISION

Le dernier axe de soutien que l'I 4.0 fournit à l'extension de la durée de vie des produits est celui de permettre la prévision des besoins ou des actions à réaliser. Les informations fournies par l'identification et ensuite validées sont ainsi susceptibles de prédire ou de prévenir dans les champs de la conception, de la fabrication et de l'entretien des produits. En effet, la conception est facilitée par le fait qu'il est possible de prédire des tendances dans les éléments requis par les clients ou les utilisateurs tels les charges ou l'achalandage que doivent être capables de supporter les produits. Ertz et al. (2022) soutiennent que les mégadonnées contribuent à l'amélioration de la conception des produits par des prédictions basées sur l'analyse du comportement des utilisateurs. Les informations validées par les technologies sont aussi utilisées dans le champ de la fabrication par l'amélioration des produits en fonction de l'utilisation et dans le champ de l'entretien pour prévenir les arrêts de service des produits ou faire des mises à jour adéquates. En effet, il est maintenant possible de créer des plans d'entretien préventifs basés sur les historiques et les indicateurs identifiés, permettant aux entreprises d'être proactives plutôt que réactives et offrant une utilisation continue aux utilisateurs. Ren et al. (2019), ayant élaboré un cadre conceptuel à la frontière entre la manufacture intelligente se servant des mégadonnées et le cycle de vie des produits, avaient d'ailleurs suggéré la possibilité de créer des services d'entretien préventifs comme étant une des applications à l'analyse des mégadonnées. En effet, selon eux, l'analyse de l'état des produits permet d'identifier des indicateurs clés précepteurs de défauts pour prévoir un entretien préventif. L'étude de cas de Bressanelli et al. (2018) suppose aussi que l'analyse des mégadonnées permet de fournir les informations nécessaires aux algorithmes de maintenance préventive et prédictive. En plus du support aux entretiens préventifs, les informations fournies grâce à l'industrie 4.0 permettent d'outiller le personnel attiré à l'entretien quant aux pièces qui sont à changer et aux outils qu'ils doivent utiliser. Ingemarsdotter et al. (2020) stipulent que l'Internet des Objets, rapportant de l'information sur l'état des produits, permet de développer une maintenance préventive et d'informer les techniciens quant aux pièces de rechange à apporter lors des appels de services.

Voici un schéma qui permet de visualiser le soutien qu'apporte les technologies de l'I4.0 étudiées dans la présente recherche aux différentes activités de conception, production et maintenance des produits qu'exercent les entreprises qui exploitent un modèle d'affaires d'EDVP afin de permettre l'extension de leur durée de vie, les liens qui unissent ces apports et les activités qui y sont associées.

Figure 3 : Schématisation des axes de soutien de l'industrie 4.0 à l'extension de la durée de vie des produits à travers les activités de l'entreprise



CHAPITRE 6

DISCUSSION

6.1 ANALYSE DES RÉSULTATS

Le but de cette étude est de fournir des connaissances concernant l'apport de l'I4.0 à la durabilité des produits et plus précisément à l'extension de la durée de vie des produits. Dans un premier temps, une revue de littérature a été menée afin de circonscrire l'état des recherches à ce jour dans ce domaine. Des verbatims d'entrevues ont été analysés par codage ouvert, axial et sélectif afin d'explorer les thèmes qui s'en dégagent en regard de l'objectif de la recherche. Il ressort des résultats que les technologies composant l'I4.0 sont utiles à différentes étapes du cycle de vie des produits soit durant leur conception, durant leur fabrication puis durant leur utilisation. De plus, certaines résistances à son utilisation ont été identifiées.

Les résultats suggèrent que la conception est la phase qui bénéficie le plus de l'apport des technologies de l'industrie 4.0 en regard à l'extension de la durée de vie des produits. En effet, c'est dans cette section que l'on retrouve le plus d'énoncés de la part des répondants. Il est ici important de souligner que les entreprises comprises dans l'échantillon se situent toutes dans la typologie de concepteurs de produits de qualité selon le classement des modèles d'affaires d'extension de la durée de vie des produits réalisé par Ertz et al., (2019a). Les données démontrent que les technologies permettent de transformer et d'optimiser les méthodes de conception entre autres par le fait qu'elles fournissent des informations tirées de données concordant mieux à la réalité et aux besoins des consommateurs. En effet, cela contraste avec les méthodes traditionnelles qui consistaient à se fier à des informations que l'on pourrait qualifier d'anecdotiques puisque les données étaient beaucoup moins

nombreuses. Le nombre de calculs que rend possibles l'intelligence artificielle via les logiciels de dessins et de simulation permet aussi une plus grande évaluation des possibilités, parfois aussi d'alternatives plus complexes qui renvoie à des concepts plus simples à assembler et donc plus solides et durables. Le prototypage est facilité par la fabrication additive qui offre des rendus d'une complexité et d'une précision qui se rapprochent encore une fois de la réalité et qui permettent de visualiser les attentes avant de procéder à la fabrication et de les personnaliser. On bénéficie d'ailleurs de ces caractéristiques depuis plusieurs années dans le monde médical pour la « création de modèles anatomiques, pour la planification chirurgicale ainsi que pour la conception, la construction et la personnalisation d'implants prothétiques » (traduction libre de Douglas, 2014, p.2). Les informations qu'il est possible de colliger via l'Internet des Objets et le web participent à assurer une adéquation entre la conception et les besoins et désirs des utilisateurs, favorisant ainsi une utilisation plus durable des produits. En outre, le partage de mégadonnées, rendu possible par les télécommunications, favorise les échanges entre les acteurs impliqués dans le processus de conception soit les équipes de recherche et développement, de marketing ainsi que les clients et utilisateurs, afin encore une fois d'assurer une correspondance entre la conception et les besoins.

L'I4.0 concourt à prolonger la durée de vie des produits par les améliorations qu'elle assure au processus de fabrication. Tout d'abord et encore une fois, les mégadonnées, analysées et organisées, fournissent des informations dont les bases sont solides et collées à la réalité. Ces informations basées sur des historiques permettent d'établir des processus de fabrication stables et donc de créer une production d'une plus grande qualité de manière constante. De plus, la précision des outils électroniques et des capteurs permet d'assurer une qualité totale des produits finaux et d'éliminer les erreurs humaines qui se glissaient avant leur utilisation. La fabrication additive permet une personnalisation et un degré de précision plus grand, réduisant la manutention et encore une fois les erreurs ou les défauts qui diminuaient la durée de vie des produits. Enfin, les capteurs implantés dans les produits permettent de colliger des données relatives à l'utilisation des produits, à leurs faiblesses et défauts fréquents durant leur utilisation. Ainsi il est possible de créer des boucles itératives

d'amélioration des produits en les modifiant pour éliminer certaines défauts précoces ou en les adaptant aux comportements des utilisateurs.

Les technologies identifiées dans cette étude participent à l'extension de la durée de vie des produits durant la phase d'utilisation des produits en supportant leur maintenance et leur entretien. Encore une fois, il est démontré dans ce thème que les données analysées fournissent des informations basées sur la réalité, sur des historiques d'utilisation et de fonctionnement. Ces informations permettent de déterminer les raisons aux problématiques ainsi que les variables et les facteurs de défauts. Il est donc possible de cibler les actions correctives à apporter, mais encore mieux, de prévoir des entretiens avant que les bris ne surviennent, évitant toute coupure de service. Rejeb et al. (2022) concluent dans leur revue de littérature que l'Internet des Objets supporte la servitisation par le fait qu'il permet de prévoir des entretiens préventifs et d'améliorer la coordination, ce qui est un avantage pour les utilisateurs qui bénéficient d'un service plus fiable. On passe donc d'une manière réactive à une manière proactive de faire l'entretien des produits. Les entreprises utilisent aussi ces indicateurs et ces informations pour faire l'entretien de leurs propres équipements de fabrication tels les machines et outils. Enfin, les informations que fournissent les sites web et les données d'utilisation supportent les choix quant aux mises à jour afin que ces dernières collent aux besoins des utilisateurs et à l'environnement. Ces mises à jour sont facilitées par l'Internet des Objets, faisant en sorte qu'il soit possible de les faire à distance et à des moments opportuns en lien avec l'utilisation des produits. Ce faisant, de nouvelles fonctionnalités peuvent être ajoutées aux produits, profitant à l'extension de leur durée d'utilisation.

Enfin, l'adoption des technologies de l'I4.0 n'est pas uniforme dans les entreprises interviewées. Certaines résistances à son implémentation se dégagent en lien avec l'extension de la durée de vie des produits. Tout d'abord, en raison du comportement des utilisateurs qui recherchent parfois une consommation de renouvellement, préférant le changement pour suivre les modes et les tendances, et ce même si l'objet est encore en état de fonctionner. Cela décourage l'utilisation des technologies à des fins de prolongation de

la durée de vie des produits. D'autre part, le juste prix que les consommateurs sont prêts à investir sur les produits ne permet pas toujours les investissements nécessaires à l'implantation de certaines technologies dans les entreprises. En effet, ces coûts sont relatifs parfois aux équipements eux-mêmes, mais aussi à ceux d'une main-d'œuvre qualifiée et compétente à ce titre ou de la formation des employés en place et du temps à investir pour implanter les changements. De plus, un manque de connaissances ou de confiance dans les performances de certaines technologies semble aussi bloquer à certains égards. Enfin, la durabilité liée aux matériaux de fabrication est très importante et comporte une pondération importante en ce qui a trait à la longévité des produits. De ce fait, malgré l'introduction de certaines nouvelles technologies, la matière présente soit un frein ou un élément supplantant ces dernières en ce qui concerne la durabilité. Ce phénomène se démontre dans l'utilisation de la fabrication additive de plastique, produisant des objets trop fragiles ou peu esthétiques, les rendant impossibles à être commercialisés tels quels. Cela se produit aussi en ce qui a trait à l'augmentation de la longévité des produits qui sont déjà très durables comme des pièces d'acier par exemple. Il est intéressant de reconnaître que ce frein peut devenir un levier, car, en effet, un objet conçu dans une matière très résistante et durable peut alors être modifié, ajusté, mis à jour et amélioré à plusieurs reprises et voir sa durée de vie ainsi augmenter. Zang et al. (2021) dans Yang et al. (2022) ont d'ailleurs stipulé que, dans l'industrie des pièces automobiles, la qualité des produits repose particulièrement sur le choix de matières premières. Yang et al. (2022) ont donc démontré que l'apprentissage automatique, une branche de l'intelligence artificielle, peut servir à analyser les données relatives à la matière afin de participer à la fabrication de pièce automobile de haute qualité.

6.2 EMPHASE SUR LA CONCEPTION

La présente étude s'intéressant à identifier les contributions que l'I4.0 apporte à l'extension de la durée de vie des produits dans les entreprises performant des activités relatives à des modèles d'affaires d'EDVP, il est intéressant de constater certaines régularités relatives aux types d'entreprises qui y participent. En effet, tout d'abord, toutes les entreprises contenues dans l'échantillon sont des concepteurs de produits de qualité, type de

modèle d'affaires d'extension de la durée de vie des produits identifié par Ertz et al (2019a). Ce type d'entreprises met l'emphase sur une conception supérieure tout réalisant dans certains cas aussi des activités de maintenance sur ses produits. De plus, une des entreprises interrogées est intégrée verticalement et une autre exploite les produits qu'elle fabrique. Ces deux entreprises ont davantage intérêt à créer des produits durables et possédant une plus longue durée de vie.

De ce fait, une attention marquée est placée sur la conception des produits et sur la recherche et développement dans l'ensemble des entreprises interviewées. Il est aussi à noter que c'est dans le thème de la conception que nous retrouvons le plus de références et que toutes les technologies étudiées par cette étude s'y retrouvent. C'est aussi sous ce thème que la fabrication additive revient le plus souvent, par le fait qu'elle participe avec précision à la création de prototypes et qu'elle permet de s'assurer de répondre aux besoins et désirs des clients.

CHAPITRE 7

IMPLICATIONS THÉORIQUES

7.1 CONTRIBUTIONS THÉORIQUES DE L'ÉTUDE

La littérature concernant l'apport de l'industrie 4.0 à l'extension de la durée de vie des produits est encore peu étayée. La revue de littérature du présent mémoire témoigne de l'aspect exploratoire des recherches dans ce domaine, qui se situent majoritairement dans des études théoriques basées sur des revues de littératures systématiques (Khan, 2021, Jabbour et al., 2020, Rosa et al., 2020 et Ertz et al., 2022) ou des études qualitatives empiriques (Charnely et al., 2019, Ingemarsdotter et al., 2021, Aziz et al., 2021 et Ertz et al., 2021). Les liens entre l'industrie 4.0 et l'extension de la durée de vie des produits sont démontrés par la littérature mais sont peu supportés par des études empiriques. À titre d'exemple, Ertz et al. (2022), au terme de leur revue systématique de littérature regroupant les recherches conceptuelles et empiriques du domaine de l'EDVP et de l'I4.0 concluent que :

« Les technologies émergentes promeuvent l'EDVP à chaque phase du cycle de vie du produit par (1) l'amélioration de la conception du produit et des processus de production ainsi que par la conception en vue de la réparation; (2) la promotion de l'accessibilité incluant la location, mutualisation et la mise en commun; (3) le support à l'entretien des produits ce qui inclut la maintenance, les conseils, la formation et les services de consultation; (4) la facilitation de la redistribution du produit à travers différentes activités comme le don, l'échange et l'achat seconde main; (5) la récupération du produit à travers la réparation ou le réusinage, la remise à neuf, le réemballage ou le reconditionnement. » (Traduction libre de Ertz et al., 2022, p. 134)

Toutefois, cette même revue de littérature est suivie d'une planification des futures recherches à effectuer afin de valider les découvertes exploratoires déjà réalisées. Entre autres, une des avenues proposées est d'explorer plus en profondeur ce que les technologies émergentes peuvent apporter à l'EDVP par des recherches qualitatives et quantitatives.

Le présent mémoire est une pierre de plus dans l'édifice afin de répondre aux besoins d'explorer d'avantage les stratégies d'extension de la durée de vie des produits dans le but de réduire la consommation et le rejet de matières premières. Ce besoin a aussi été souligné par Khan (2021) dans sa revue de littérature dont les résultats ont démontré l'importance de poursuivre les recherches concernant le développement de modèles d'affaires durables et de méthodes de conception permettant une économie de fonctionnalité, soutenant l'EDVP particulièrement durant la phase d'utilisation du produit. Le présent mémoire démontre, par des données empiriques, que l'I4.0 est à même d'améliorer la conception et la maintenance des produits et ce, dans des entreprises optant pour des modèles d'affaires ayant pour stratégie la qualité des produits ou l'offre de services permettant l'utilisation de leurs produits.

Alors que la revue systématique de littérature de Rosa et al. (2020) avait confirmé que plusieurs technologies de l'I4.0 avaient une influence positive sur le cycle de vie des produits dans une perspective d'économie circulaire, les mégadonnées et leur analyse n'avaient pas livrées de preuve de leur apport ou soutien en ce sens. Le présent mémoire comble cette lacune en démontrant que le forage et l'analyse des mégadonnées récoltées par l'Internet des Objets permet de mieux connaître les faiblesses des produits, les défauts fréquents, les variables qui les influencent ainsi que les comportements des utilisateurs ce qui favorise l'entretien préventif, les mises à jour pertinentes et les ajustements au niveau de la fabrication des produits. Enfin, Rosa et al. (2020) concluent à un manque évident de littérature concernant le type de contribution que l'I4.0 offre à l'EDVP. Le présent mémoire offre, par son cadre conceptuel, une réponse à ce manque en décrivant les trois grands axes de soutien qu'apporte l'I4.0 à l'EDVP.

Cette recherche se trouve en lien avec les travaux d'Ertz et al. (2019a et 2019b) qui explorent des modèles d'affaires focalisant sur l'extension de la durée de vie des produits. En effet, toutes les données proviennent d'entreprises réalisant des activités d'extension de la durée de vie des produits, particulièrement des activités relatives à l'amélioration de la conception et de la production, comme décrites par Baker et al. (2014), des activités relatives à l'entretien regroupant des actions de maintenance et des services de soutien ou de consultation ainsi que des activités de reprise telle la réparation. Les résultats démontrent que les technologies numériques servent les activités d'amélioration de la conception dans les phases de conception et de fabrication du produit alors qu'elles sont utiles à celles d'entretien et de reprise au cours de la phase d'utilisation du produit.

Cette étude se trouve également en lien avec les travaux d'Ertz et al. (2022) qui s'intéressent aux stratégies que les entreprises utilisant les technologies numériques pourraient appliquer pour prolonger la durée de vie des produits. Cette dernière recherche étant basée sur une revue de littérature systématique, elle suggère d'abord d'étudier l'industrie 4.0 selon 4 grandes technologies qui sont les mêmes que dans la présente recherche soient la fabrication additive, l'Internet des Objets, les mégadonnées et l'intelligence artificielle. De plus, elle représente les contributions de l'industrie 4.0 à l'EDVP au cours de toutes les phases du cycle de vie du produit. Il est intéressant de noter que la présente étude comble une lacune importante, soulignée par leurs travaux, concernant le manque d'exemples pour soutenir le fait que les technologies numériques sont capables de favoriser l'amélioration de la conception du produit. En effet, ils démontrent qu'une meilleure conception est en mesure de permettre d'autres activités d'EDVP quoique peu de modèles d'affaires focalisent leurs stratégies sur l'amélioration de la conception. La présente recherche est donc pertinente en ce que la majorité de ses résultats se retrouvent dans la phase de conception du produit. C'est en partie en raison du fait que toutes les entreprises de l'échantillon ont comme modèle d'affaires la conception de produits de qualité. En effet, certaines entreprises oeuvrent dans des secteurs où les produits se doivent d'être de haute qualité comme dans le domaine médical ou de la santé, militaire ou automobile. De plus, plusieurs font du commerce interentreprise ce qui justifie le besoin d'offrir des produits de qualité alors que d'autres font du commerce au détail et ont choisis de se positionner comme concepteurs de produits durables. Dans

une moindre mesure, la présente étude démontre que les technologies numériques interagissent entre elles pour offrir leur soutien à l'EDVP. Enfin, la présente recherche comble directement un élément identifié par Ertz et al. (2022) comme étant une avenue de recherche future soit de fournir une évaluation de la manière dont les technologies de l'industrie 4.0 contribuent à l'EDVP. La présente étude empirique confirme d'ailleurs plusieurs contributions de l'industrie 4.0 à l'EDVP pour les activités de conception améliorée et de maintenance identifiées dans la revue de littérature d'Ertz et al. (2022). C'est en effet le cas lorsqu'il est question d'amélioration de la conception due à la facilitation du prototypage par la fabrication additive, à l'amélioration de la planification grâce aux logiciels de simulation et aux historiques retracés grâce à l'IoT et à une meilleure correspondance aux besoins que cela favorise. L'amélioration des processus de production est aussi assurée par l'I4.0 et cela se démontre dans la présente étude lorsqu'il est question des bancs de tests qui permettent un meilleur contrôle des opérations et une réduction des erreurs ainsi que lorsqu'il est démontré que les informations forées à travers les mégadonnées récoltées par l'IoT permettent l'optimisation de la fabrication, par l'amélioration de la production et donc des produits, en identifiant les défauts fréquents et les faiblesses dans les produits. Enfin, l'I4.0 supporte effectivement une meilleure maintenance des produits, comme l'a suggéré Ertz et al. (2022), par le fait que les technologies permettent de mieux diagnostiquer les problèmes mais surtout de planifier la maintenance à faire en vue d'éviter les bris; il est alors question d'entretiens préventifs. De plus, l'IoT permet aussi de réaliser des mises à jour sur les produits, réglant parfois des problématiques, augmentant les fonctionnalités ou assurant une meilleure correspondance des produits aux besoins des utilisateurs.

Cependant, la présente étude ne démontre pas de lien entre l'industrie 4.0 et les stratégies d'accessibilité et de redistribution selon le cadre du MAEDVP (Ertz et al., 2019a), et ce, ni entre les consommateurs, ni entre consommateurs et entreprises, ni entre les entreprises. Cela pourrait s'expliquer par la nature de l'échantillon qui est constitué de petites entreprises du domaine de la fabrication et qui ont comme mission la vente de produits neufs de haute qualité, surtout pour les entreprises (B2B).

Les résultats du présent mémoire ont démontré certaines résistances à l'utilisation des technologies par les répondants et les entreprises. Il est intéressant de reconnaître que le virage numérique n'est pas réalisé de manière complète dans l'ensemble des entreprises interrogées. Bien que les résistances identifiées dans la présente étude ne relèvent pas du scepticisme ou de la motivation des répondants, les pensées et comportements des consommateurs entrent en jeu. En effet, on dit que les clients préfèrent encore de nouveaux produits plutôt que des biens renouvelés. Il serait intéressant ici de poursuivre les recherches en s'intéressant aux perceptions des consommateurs face à la responsabilité de l'entreprise en lien avec leur niveau de responsabilité quant à leur comportement. Est-ce que le fait qu'une organisation diffuse publiquement ses processus pour l'EDVP et propose des produits à plus longue durée serait relié à une augmentation de l'adoption des consommateurs à ce type de produits? Le fait d'identifier les éléments qui favoriseraient une consommation durable pourrait soutenir l'adoption des technologies permettant l'EDVP par les entreprises.

Enfin, les coûts de formation et ceux reliés aux équipements technologiques restent un frein à l'adoption de l'industrie 4.0. Les connaissances à ce sujet gagneraient à être étudiées afin de définir quels sont les coûts relatifs à la mise en œuvre des différentes technologies, quelles sont les connaissances nécessaires, quelles sont les manières de les développer et quels sont les bénéfices qui en résultent. Des incitatifs institutionnels et politiques existent pour réduire les effets reliés aux coûts et formations, est-il nécessaire de mieux les faire connaître ?

CHAPITRE 8

IMPLICATIONS MANAGÉRIALES

8.1 CONTRIBUTIONS MANAGÉRIALES DE L'ÉTUDE

Les conclusions de cette étude valident les technologies numériques comme étant des facilitateurs et des piliers de support aux stratégies d'affaires des entreprises désirant réaliser des activités d'EDVP ou désirant s'inscrire dans des modèles d'affaires d'EDVP. Elles démontrent en quoi l'I4.0 favorise l'économie circulaire, plus particulièrement durant le cycle de conception, de fabrication et d'utilisation des produits, leurs permettant de rester dans la boucle d'utilisation plus longtemps.

Cette étude offre plusieurs contributions managériales. Elle est tout d'abord pertinente pour les gestionnaires d'organisations qui souhaitent s'inscrire dans des stratégies d'EDVP et qui utilisent ou prévoient utiliser les technologies. Elle démontre les aspects que les technologies peuvent favoriser ce qui peut permettre de cibler les actions à poser, de les prioriser et d'évaluer les outils à se procurer.

La présente étude démontre donc que l'impression 3D favorise grandement l'amélioration de la conception en ce qu'elle permet de valider plus rapidement les idées, par le prototypage, et ce parmi plusieurs acteurs du processus de création, que ce soit dans l'équipe de recherche et développement, dans celle du marketing et de la mise en marché et même directement avec les clients ou les utilisateurs. La multiplication des points de validation favorise une progression rapide des prototypes et des idées, permettant dans un temps souvent limité d'améliorer la conception et l'adéquation aux besoins des utilisateurs et de l'environnement. Il est aussi démontré par les résultats que la fabrication additive

permet la production de gabarits adaptés aux situations particulières que requiert la fabrication. Les organisations peuvent ainsi mieux saisir les avantages que leur procureraient l'utilisation de la fabrication additive.

D'autre part, il est démontré que les objets connectés possédant des capteurs collectent des informations qui, une fois analysés et organisés, fournissent des opportunités très appréciables au regard de la durabilité. En effet, ces informations permettent de mieux cerner les utilisateurs et leurs comportements d'utilisation ainsi que le comportement des produits face aux différents usages ou aux changements dans l'environnement. Ainsi, il est plus facile pour les organisations d'améliorer les produits déjà en opération, d'en améliorer la fabrication et, surtout, d'améliorer leur entretien. En effet, ces informations deviennent particulièrement utiles en regard de la durabilité car elles permettent de planifier l'entretien et la maintenance des produits afin d'agir au bon moment et au bon endroit avec les bons outils et les bonnes pièces de remplacement au besoin et ce, de manière préventive, permettant ainsi une utilisation continue des produits et une satisfaction accrue des utilisateurs. L'internet des objets démontre aussi son utilité en ce qui concerne la possibilité d'améliorer les produits à distance par les mises à jour ou la prévention de bogues informatiques par exemple. Enfin, l'internet des objets permet de mieux connaître les utilisateurs et de communiquer avec eux de manière rapide, fréquente et pertinente. En effet, les données concernant leurs comportements d'achat, d'utilisation et les données permettant d'identifier des tendances permettent aux organisations d'adapter et de prévoir des produits en adéquation avec l'environnement. De plus, la possibilité que l'IoT offre concernant les communications est très utile. Le fait de pouvoir entrer en relation de manière fréquente et à distance avec les différents acteurs de la chaîne de création, de production et d'utilisation augmente la possibilité de valider les idées et les besoins. Le partage de quantités de données massives, sous forme de documents ou d'images, permet aussi de meilleures explications et une validation d'autant plus fiable.

Les mégadonnées récoltées par l'internet des objets doivent être transformées et analysées mais offrent alors des informations très utiles et pertinentes en vue de la durabilité des

produits. Elles offrent d'abord la possibilité d'identifier des variables et des indicateurs significatifs concernant l'environnement ou le comportement des produits en fonction de leur utilisation ou des conditions environnantes. Ces indications permettent ensuite de mieux faire correspondre les produits à leur environnement ou à leur utilisation. Cette correspondance assure une meilleure satisfaction et une meilleure utilisation des produits. Elle évite de devoir reprendre la conception ou de devoir en ajuster la fabrication. Les mégadonnées peuvent, à plus long terme, exprimer des historiques, des statistiques et des tendances. Cela aide la prise de décision des gestionnaires quant à la conception, la fabrication et l'entretien des produits.

L'intelligence artificielle devient pratiquement incontournable pour bénéficier des avantages des technologies numériques que fournissent l'IoT et les mégadonnées. Elle permet de forer parmi les données et de les faire « parler ». C'est elle qui pourra découvrir les historiques et les tendances. De surcroît, elle permet une si grande capacité de calculs complexes qu'elle est en mesure de simuler plusieurs réponses à un même problème ou à un même besoin de conception, assurant de découvrir les meilleures solutions en fonction des besoins et des réquisitions des clients ou de l'environnement. La complexité des calculs qu'elle offre permet parfois des conceptions qui deviennent au final plus solides car elles comportent moins de points de fragilité. De plus, elle réduit le temps de calcul ce qui est un avantage qu'il est possible de mettre au service de la durabilité dans le processus de conception.

La présente étude permet aussi aux organisations de cibler les technologies à privilégier en fonction de leur modèle d'affaires ou en fonction de leurs besoins et objectifs. La conception est mise de l'avant comme phase du produit que l'I4.0 favorise. Les stratégies d'affaires basées sur la conception peuvent permettre à la fois de prolonger la durée de vie des produits mais aussi de planifier leur entretien et leur mise à jour plus facilement et plus pertinemment. Les résultats de l'étude confirment le potentiel des technologies numériques à des fins de qualité des produits, offrant des arguments pour sécuriser les investisseurs afin de financer les achats à faire pour s'avancer dans l'I4.0.

Le présent mémoire est aussi utile pour les acteurs impliqués dans le développement économique. C'est le cas des institutions en droit de légiférer mais aussi des organismes de soutien ou de conseils au développement économique. Les confirmations obtenues par les conclusions de l'étude permettent d'asseoir des bases afin de justifier les orientations à adopter quant aux politiques à mettre en place ou aux orientations à prévoir afin de stimuler le mouvement vers une économie durable par une économie circulaire. Elle donne des arguments de plus pour les acteurs de ce secteur pour qu'ils stimulent les entreprises à emprunter la voie du numérique ou à l'exploiter d'avantage, réalisant à la fois l'objectif de rendre efficace leur existence et de réduire la production de déchets de manière durable.

L'aspect des résistances à l'utilisation des technologies numériques est particulièrement utile pour les organismes de développement économiques ainsi que pour les institutions gouvernementales. En effet, elles permettent d'identifier les aspects à favoriser afin de surmonter les freins à l'adoption des technologies numériques et de supporter leur adoption en vue de l'EDVP. Ces freins sont parfois réels ou perçus. Il serait intéressant de valider leur proportion dans les entreprises et de cibler lesquels sont prioritaires à adresser par secteur ou par région. Des incitatifs, des actions palliatives ou facilitantes pourraient être offertes aux organisations comme des services conseils, de la formation ou la possibilité de faire l'essai de différentes technologies et cela en vue de favoriser l'adoption de l'I4.0.

Cette étude étant une étape de plus dans un processus vers une économie plus organique, les conclusions peuvent amener les autorités à s'intéresser et à engager des études terrain auprès des entrepreneurs régionaux ou nationaux afin de mieux connaître l'état de l'utilisation de l'I4.0 au service de l'EDVP actuellement. Cela permettrait d'encore mieux cibler les secteurs à privilégier par des incitatifs politiques ou économiques pertinents.

CHAPITRE 9

LIMITES, CONSÉQUENCES ET AVENUES DE RECHERCHE

9.1 LIMITES, CONSÉQUENCES ET AVENUES DE RECHERCHE

Les résultats publiés dans cette étude fournissent plusieurs contributions intéressantes, particulièrement pour les instances décisionnelles gouvernementales, les organismes de soutien économiques, les institutions universitaires ainsi que pour les parties prenantes des entreprises, particulièrement de celles qui fabriquent et exploitent ou de celles qui sont intégrées verticalement. Tout d'abord, soulignons que la présente étude confirme que certaines technologies de l'I4.0 sont bénéfiques au développement durable via des activités économiques circulaires d'extension de la durée de vie des produits. Les éléments qui sont favorisés sont identifiés et trois grands axes de soutien sont relevés. Ces éléments ont le potentiel d'offrir des arguments et de servir de guide et d'aide à la décision quant aux visions stratégiques de management ou de politiques pour un développement durable axé sur le numérique.

La présente étude comprend un échantillon que l'on pourrait considérer restreint à peu d'entreprises. Qui plus est, ces entreprises ont toutes le même modèle d'affaires d'extension de la durée de vie des produits qui est celui de concepteurs de produits de qualité selon la typologie réalisée par Ertz et al. (2019a). Ceci fait en sorte que les résultats sont très pointus et peu généralisables à l'ensemble des modèles d'affaires d'extension de la durée de vie des produits. De plus, la taille des entreprises interrogées étant très diversifiées, il est difficile d'évaluer les processus et les modèles d'affaires sur une même base. Les résistances à l'adoption des technologies peuvent particulièrement être très différentes selon la taille de l'entreprise. Des études concernant l'adoption à l'industrie 4.0 par les PME pourraient aider

à comprendre le phénomène, à mieux cerner les éléments qui favorisent ou freinent cette adoption, ainsi que les circonstances qui entourent l'intérêt des organisations envers les technologies. Cependant, la diversité des industries touchées et des fonctions que les répondants occupent dans celles-ci permet de brosser un portrait assez juste de ce type d'entreprises. D'autres chercheurs pourraient établir des portraits plus larges regroupant d'autres modèles d'affaires d'extension de la durée de vie des produits et/ou réaliser la recherche sur un échantillon regroupant des entreprises de différentes provenances afin d'élargir les résultats de la présente recherche, de brosser des portraits selon les industries, les régions, les pays ou les niveaux de développement des nations étudiées par exemple.

Il est intéressant que la présente étude ait fait émerger certaines résistances à l'utilisation des technologies de l'I4.0, résultats qui n'étaient pas attendus en regard de la question et du sujet de recherche. Ces résultats, bien que montrés, restent probablement partiels ou biaisés en raison du fait que ni la méthodologie de recherche ni les questions du guide d'entrevue ne les avaient pris en compte. Ces résistances pourraient faire l'objet d'études plus approfondies à différentes échelles afin d'évaluer le degré de leur implication dans l'implémentation des entreprises et afin d'identifier les moyens à prendre pour les diminuer. Les recherches de Raj et al (2020) portant directement sur le sujet ont précédemment démontré que les barrières à la mise en œuvre des technologies numériques sont différentes pour les économies en développement (entreprise en Inde) et les économies développées (entreprises en France). Des recherches concernant toutes les barrières ainsi que les facteurs bénéfiques à l'adoption de l'I4.0 seraient pertinentes autant pour les entreprises en regard de leurs décisions stratégiques que pour les acteurs de la scène politique et législative à des échelles régionales ou nationales.

CONCLUSION

En réponse à la production toujours plus grande de déchets résultant de notre mode de production et de consommation, les notions de développement durable et d'économie circulaire sont développées et mises de l'avant. Cela implique des changements dans les façons de produire et d'utiliser les biens. L'extension de la durée de vie des produits est un concept qui est inclus dans l'économie circulaire et qui exprime le fait d'utiliser un bien plus longtemps ou de multiplier les cycles de son utilisation. Les technologies numériques appliquées aux activités des entreprises forment actuellement une nouvelle révolution industrielle qui est nommée industrie 4.0. Comment ces nouvelles technologies utilisées par les entreprises peuvent-elles favoriser l'extension de la durée de vie des produits? Voilà la question sur laquelle repose la présente étude.

Les données qui en ressortent indiquent que les technologies bénéficient à l'extension de la durée de vie des produits aux différentes phases du cycle de vie du produit, soit durant sa conception, sa production et son utilisation. C'est par une meilleure planification basée sur des données, enrichie par la simulation, par la facilitation du prototypage et soutenue par une aisance dans les communications qu'il est possible de mieux correspondre aux besoins des utilisateurs et de fabriquer des produits durables et de qualité. La fabrication est améliorée par un meilleur contrôle des opérations et la réduction d'erreurs et les données récoltées sur l'utilisation des produits permettent l'amélioration des produits dans la phase de production. Enfin, en phase d'utilisation, les technologies permettent de mieux diagnostiquer les actions correctives à apporter, les données d'utilisation permettent d'instaurer des plans d'entretien préventifs et l'ajout de fonctionnalités ou de possibilités est possible par des mises à jour à distance. De ces résultats émergent trois grands axes de soutien que fournit l'industrie 4.0 à l'extension de la durée de vie des produits soit l'identification, la validation et la prévision. En effet, les données récoltées, stockées et analysées permettent d'identifier des facteurs et des variables qui influencent le fonctionnement des produits et qui fournissent des informations concernant les comportements des utilisateurs et les tendances dans l'environnement. La validation est favorisée par les modes de communication qui

permettent, en temps réel et sans se déplacer, le transfert de grandes quantités de données sous des formes faciles à interpréter. La rapidité des technologies de simulation et de prototypage favorise aussi une plus grande quantité de points de validation durant les processus de conception ou d'amélioration. Enfin, la prédiction est rendue possible grâce aux informations basées sur des données solides fournies par des capteurs permettant de s'assurer que les éléments et les phénomènes sont garantis de certitude et permettant de lier les facteurs aux résultats pour planifier les actions à poser en fonction des événements dans l'environnement. Dans un autre ordre d'idées, les données offrent aussi suffisamment d'information pertinente concernant certaines résistances énoncées par les entreprises à l'utilisation des technologies numériques pour qu'ils soient énoncés dans les résultats, bien que cela n'était pas le but de la recherche. Les propriétés de la matière, les comportements des consommateurs préférant dans certaines industries la consommation de renouvellement et les barrières à l'entrée que sont les coûts, la méconnaissance, la formation et la gestion du changement sont les principaux arguments énoncés. Étant donné que la recherche n'avait pas comme objet l'étude de ces résistances, ces résultats doivent être interprétés avec nuance, mais ils inspirent vers de nouvelles avenues de recherches afin de mieux cerner ce qui retient l'adoption de l'industrie 4.0.

Une meilleure conception semble être l'élément qui ressort, à la fois par le fait qu'il y a davantage de données sur ce sujet et à la fois car les entreprises de l'échantillon sont toutes impliquées dans des activités centrées sur la conception de produits de qualité. De plus, il est clair que les entreprises qui sont intégrées verticalement ou qui exploitent leurs produits ont un plus grand intérêt à faire perdurer leurs produits plus longtemps.

Ces résultats et conclusions mettent en lumière les avantages que peuvent receler l'industrie 4.0 pour l'économie circulaire et le développement durable et sont en mesure de nourrir l'argumentaire des institutions qui voudraient guider les entreprises vers ce mouvement inévitable et souhaitable.

LES RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Agrawal, R., Wankhede, V. A., Kumar, A., Upadhyay, A. et Garza-Reyes, J. A. (2021). Nexus of circular economy and sustainable business performance in the era of digitalization. *International Journal of Productivity and Performance Management*, 71(3), 748-774. <https://doi.org/10.1108/IJPPM-12-2020-0676>
- Akundi, A. et Lopez, V. (2021). A review on application of model based systems engineering to manufacturing and production engineering systems. *Procedia Computer Science*, 185, 101–108. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.05.011>
- Awan, U., Shamim, S., Khan, Z., Zia, N. U., Shariq, S. M. et Khan, M. N. (2021). Big data analytics capability and decision-making: the role of data-driven insight on circular economy performance. *Technological Forecasting & Social Change*, 168. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.120766>
- Aziz, N. A., Adnan, N. A. A., Wahab, D. A. et Azman, A. H. (2021). Component design optimisation based on artificial intelligence in support of additive manufacturing repair and restoration: current status and future outlook for remanufacturing. *Journal of Cleaner Production*, 296. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126401>
- Baccino, T. (2009). Prototypage. *Document numérique*, 12, 133-144. <https://www.cairn.info/revue--2009-2-page-133.htm>.
- Beier, G., Niehoff, S., Ziems, T. et Xue, B. (2017). Sustainability aspects of a digitalized industry—A comparative study from China and Germany. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 4(2), 227-234. <https://doi.org/10.1007/s40684-017-0028-8>
- Beier, G., Ullrich, A., Niehoff, S., Reißig, M. et Habich, M. (2020). Industry 4.0: how it is defined from a sociotechnical perspective and how much sustainability it includes - a literature review. *Journal of Cleaner Production*, 259. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120856>
- Belk, R. (2014). You are what you can access: Sharing and collaborative consumption online. *Journal of Business Research*, 67(8), <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2013.10.001>
- Bocken, N. M., Short, S. W., Rana, P. et Evans, S. (2014). A literature and practice review to develop sustainable business model archetypes. *Journal of Cleaner Production*, 65, 42-56. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.11.039>

- Boyчук Duchscher, J. E. et Morgan, D. (2004). Grounded theory: reflections on the emergence vs. forcing debate. *Journal of Advanced Nursing*, 48(6), 605-612. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2648.2004.03249.x>
- Bressanelli, G., Adrodegari, F., Perona, M. et Saccani, N. (2018). The role of digital technologies to overcome circular economy challenges in PSS business models: an exploratory case study. *Procedia CIRP*, 73, 216-221. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.03.322>
- Commission mondiale sur l'environnement et le développement, Gagnon, L., Mead, H.-L. et Brundtland, G. H. (1988). *Notre avenir à tous*. Éditions du Fleuve.
- Burns, B. (2010). Re-evaluating obsolescence and planning for it. Dans T. Cooper (dir.), *Longer lasting products – Alternatives to the throwaway society* (39-60). T. Cooper.
- Charnley, F., Tiwari, D., Hutabarat, W., Moreno, M., Okorie, O. et Tiwari, A. (2019). Simulation to enable a data-driven circular economy. *Sustainability*, 11(12), 3379–3379. <https://doi.org/10.3390/su11123379>
- Coppin, B. (2004). *Artificial intelligence illuminated*. Jones & Bartlett Publisher. https://books.google.ca/books?id=LcOLqodW28EC&printsec=frontcover&hl=fr&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false
- Cox, J., Griffith, S., Giorgi, S. et King, G. (2013). Consumer understanding of product lifetimes. *Resources, Conservation & Recycling*, 79, 21–29. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.05.003>
- De Mauro, A., Greco, M. et Grimaldi, M. (2016). A formal definition of big data based on its essential features. *Library Review*, 65(3), 122–135. <https://doi.org/10.1108/LR-06-2015-0061>
- den Hollander, M. C., Bakker, C. A. et Hultink, E. J. (2017). Product design in a circular economy: development of a typology of key concepts and terms: key concepts and terms for circular product design. *Journal of Industrial Ecology*, 21(3), 517–525. <https://doi.org/10.1111/jiec.12610>
- Douglas, T. S. (2014). Additive manufacturing: From implants to organs. *SAMJ: South African Medical Journal*, 104(6), 408-409. <http://dx.doi.org/10.7196%2FSAMJ.7915>

- Ertz, M. et Patrick, K. (2020). The future of sustainable healthcare: extending product lifecycles. *Resources, Conservation, and Recycling*, 153. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104589>
- Ertz, M., Leblanc-Proulx S., Sarigöllü E. et Morin, V. (2019a). Made to break? a taxonomy of business models on product lifetime extension. *Journal of Cleaner Production*, 234, 867–880. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.264>
- Ertz, M., Leblanc-Proulx S., Sarigöllü E. et Morin, V. (2019b). Advancing quantitative rigor in the circular economy literature: new methodology for product lifetime extension business models. *Resources, Conservation & Recycling*, 150. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104437>
- Ertz, M., Deschênes, J. et Sarigöllü, E. (2021a). From user to provider: switching over in the collaborative economy. *Sustainability*, 13(10), 5662–5662. <https://doi.org/10.3390/su13105662>
- Ertz, M., Sun, S., Boily, É., Quenum, G. G. Y., Patrick, K., Laghrib, Y., Hallegatte, D., Bousquet, J. et Latrous, I. (2021b). Les produits augmentés : la contribution de l'industrie 4.0 à la consommation durable. Dans Dekhili (dir.), *Le marketing au service du développement durable*.
- Ertz, M., Sun, S., Boily, E., Kubiak, P. et Quenum, G. G. Y. (2022). How transitioning to industry 4.0 promotes circular product lifetimes. *Industrial Marketing Management*, 101, 125–140. <https://doi.org/10.1016/j.indmarman.2021.11.014>
- Fonds des Nations Unies pour la population. (2021). *Population mondiale*. <https://www.unfpa.org/fr/data/world-population-dashboard>
- Forti V., Baldé C.P., Kuehr R. et Bel G. (2020). *The global e-waste monitor 2020: Quantities, flows and the circular economy potential*. United Nations University (UNU)/United Nations Institute for Training and Research (UNITAR) – co-hosted SCYCLE Programme, International Telecommunication Union (ITU) & International Solid Waste Association (ISWA),
- Frosch, R. A. et Gallopoulos, N. E. (1989). Strategies for manufacturing. *Scientific American*, 261(3), 144–152. <https://www.jstor.org/stable/24987406?seq=1>
- Gupta, S., Chen, H., Hazen, B. T., Kaur, S. et Santibañez Gonzalez, E. D. R. (2019). Circular economy and big data analytics: a stakeholder perspective. *Technological Forecasting and Social Change*, 144, 466–474. <https://www-sciencedirect-com.sbiproxy.uqac.ca/science/article/>

- Ghobakhloo, M. (2020). Industry 4.0, digitization, and opportunities for sustainability. *Journal of Cleaner Production*, 252. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119869>
- Götz M. et Jankowska, B. (2017). Clusters and industry 4.0 - do they fit together? *European Planning Studies*, 25(9), 1633–1653. <https://doi.org/10.1080/09654313.2017.1327037>
- Han, X., Hu, C. et Lin L. (2019). A study on the impact of China's urbanization on the quantity of municipal solid waste produced. *Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy*. <https://doi-org.sbiproxy.uqac.ca/10.1177%2F0734242X19886912>
- Hofmann, E. et Rüsç Marco. (2017). Industry 4.0 and the current status as well as future prospects on logistics. *Computers in Industry*, 89, 23–34. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2017.04.002>
- Ingemarsdotter, E. K., Jamsin, E. et Balkenende A. R. (2020). Opportunities and challenges in IoT-enabled circular business model implementation – A case study. *Resources, Conservation & Recycling*, 162, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105047>
- Jabbour, A. B. L. de S., Jabbour, C. J. C., Foropon, C. et Filho, M. G. (2018). When titans meet – can industry 4.0 revolutionise the environmentally-sustainable GEM manufacturing wave? the role of critical success factors. *Technological Forecasting and Social Change*, 132, 18–18. <https://doi-org.sbiproxy.uqac.ca/10.1016/j.techfore.2018.01.017>
- Jabbour, C. J.C., Fiorini, P. D. C., Ndubisi, N. O., Queiroz, M. M., et Piato Éderson Luiz. (2020). Digitally-enabled sustainable supply chains in the 21st century: a review and a research agenda. *Science of the Total Environment*, 725. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138177>
- Joshi, A. D. et Gupta, S. M. (2019). Evaluation of design alternatives of end-of-life products using internet of things. *International Journal of Production Economics*, 208, 281–293. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2018.12.010>
- Kagermann, H., Helbig, J., Hellinger, A. et Wahlster, W. (2013). *Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0: Securing the future of German manufacturing industry; final report of the Industrie 4.0 Working Group*. Forschungsunion. <https://www.din.de/blob/76902/e8cac883f42bf28536e7e8165993f1fd/recommendations-for-implementing-industry-4-0-data.pdf>

- Kaza, S, Yao, L. C., Bhada-Tata, P et Van Woerden, F. (2018). *What a waste 2.0: A global snapshot of solid waste management to 2050*. World Bank. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/30317>
- Khan, M. A., Mittal, S., West, S. et Wuest, T. (2018). Review on upgradability - a product lifetime extension strategy in the context of product service systems. *Journal of Cleaner Production*, 204, 1154–1168. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.329>
- Khan, I. S., Ahmad, M. O. et Majava, J. (2021). Industry 4.0 and sustainable development: a systematic mapping of triple bottom line, circular economy and sustainable business models perspectives. *Journal of Cleaner Production*, 297. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126655>
- Laitala, K. et Klepp, I, G. (2020). What affects garment lifespans? International clothing practices based on a wardrobe survey in China, Germany, Japan, the UK, and the USA. *Sustainability*, 12(21), 9151. <https://doi.org/10.3390/su12219151>
- Le Moigne, R. (2014). *L'économie circulaire: Prix ACA BRUEL HEC*. Dunod.
- Lin, K.-P., Yu, C.-M. et Chen, K.-S. (2019). Production data analysis system using novel process capability indices-based circular economy. *Industrial Management & Data Systems*. <https://doi.org/10.1108/IMDS-03-2019-0166>
- McDonough, W. et Braungart, M. (2010). *Cradle to cradle: Remaking the way we make things*. North Point Press.
- Mihelcic, J. R., Crittenden, J. C., Small, M. J. et Shonnard, D. R. (2003). Sustainability science and engineering: the emergence of a new metadiscipline. *Environmental Science & Technology*, 37(23), 5314–5324. <https://doi.org.sbiproxy.uqac.ca/10.1021/es034605h>
- Minghua, Z., Xiumin, F., Rovetta, A., Quchang, H., Vincentini, F., Bingkai, L., Giusti, A. et Yi, L. (2009). Municipal solid waste management in Pudong new area, China. *Waste Management (New York, N.y.)*, 29(3), 1227–33. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.07.016>
- Nosalska, K., Piątek, Z. M., Mazurek, G. et Rządca, R. (2020). Industry 4.0: coherent definition framework with technological and organizational interdependencies. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 31(5). <https://www.emerald.com/insight/publication/issn/1741-038X>

- Nußholz, J. L. K. (2018). A circular business model mapping tool for creating value from prolonged product lifetime and closed material loops. *Journal of Cleaner Production*, 197(P1), 185–194. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.112>
- Osterwalder, A., Pigneur, Y. et Tucci, C. (2005). Clarifying business models: Origins, present, and future of the concept. *Communications of the Association for Information Systems*, 16. <https://doi.org/10.17705/1CAIS.01601>
- Osterwalder, A., Pigneur, Y. et Tucci, C. (2010). *Business model generation: a handbook for visionaries, game changers, and challengers*. Wiley. <https://ebookcentral.proquest.com/lib/uqac-ebooks/detail.action?docID=581476>
- Perren, R. et Kozinets, R. V. (2018). Lateral exchange markets: How social platforms operate in a networked economy. *Journal of Marketing*, 82(1), 20-36. <https://doi.org/10.1509%2Fjm.14.0250>
- Raj, A., Dwivedi, G., Sharma, A., Lopes, de S. J. A. B. et Rajak, S. (2020). Barriers to the adoption of industry 4.0 technologies in the manufacturing sector: an inter-country comparative perspective. *International Journal of Production Economics*, 224. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.107546>
- Ren, S., Zhang, Y., Liu, Y., Sakao, T., Huisingh, D. et Almeida, C. M. V. B. (2019). A comprehensive review of big data analytics throughout product lifecycle to support sustainable smart manufacturing: A framework, challenges and future research directions. *Journal of Cleaner Production*, 210, 1343-1365. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.025>
- Rifkin, J. (2014). *La nouvelle société du coût marginal zéro : l'Internet des Objets, l'émergence des communaux collaboratifs et l'éclipse du capitalisme*. (Chemla Françoise & P. Chemla, Trans.). Les Liens qui Libèrent. <https://international-scholarvox-com.sbiproxy.uqac.ca/book/88904203>
- Rivera, J. L. et Lallmahomed, A. (2016). Environmental implications of planned obsolescence and product lifetime: a literature review. *International Journal of Sustainable Engineering*, 9(2), 119–129. <https://doi.org/10.1080/19397038.2015.1099757>
- Rosa, P., Sassanelli, C., Urbinati, A., Chiaroni, D. et Terzi, S. (2020). Assessing relations between Circular Economy and Industry 4.0: a systematic literature review. *International Journal of Production Research*, 58(6), 1662-1687. <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1680896>

- Rotich, K. H., Zhao, Y. et Dong, J. (2006). Municipal solid waste management challenges in developing countries – Kenyan case study. *Science direct*, 26(1). <https://doi-org.sbiproxy.uqac.ca/10.1016/j.wasman.2005.03.007>
- Rupp, M., Schneckenburger, M., Merkel, M., Börret, R. et Harrison, D. K. (2021). Industry 4.0: a technological-oriented definition based on bibliometric analysis and literature review. *Journal of Open Innovation*, 7(1). <https://doi.org/10.3390/joitmc7010068>
- Sauerwein, M., Doubrovski, E. L., Balkenende, A. R. et Bakker, C. A. (2019). Exploring the potential of additive manufacturing for product design in a circular economy. *Journal of Cleaner Production*, 226. <https://doi-org.sbiproxy.uqac.ca/10.1016/j.jclepro.2019.04.108>
- Selvefors, A., Rexfelt, O., Renström, S. et Strömberg H. (2019). Use to use - a user perspective on product circularity. *Journal of Cleaner Production*, 223, 1014–1028. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.117>
- Solczak, R. (2013). *Planned obsolescence: a question of consumerism and production of waste*. [Thèse de doctorat, Centria university of applied sciences]. Theseus.fi. https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/55575/Solczak_Robert.pdf?sequ
- Stahel, W. R. (1982). *The product life factor. An inquiry into the nature of sustainable societies: The role of the private sector*. (Series: 1982 Mitchell Prize Papers), NARC. <https://p2infohouse.org/ref/33/32217.pdf>
- Stahel, W. R. (2016). The circular economy. *Nature*, 531(7595), 435. <https://doi.org/10.1038/531435a>
- Strauss, A. et Corbin, J. (1990). *Basics of qualitative research: Grounded theory procedures and techniques*. Newbury Park, CA: Sage.
- Sun, S. (2021). How does the collaborative economy advance better product lifetimes? A case study of free-floating bike sharing. *Sustainability*, 13(1434). <https://doi.org/10.3390/su13031434>
- Tariq, M. U. (2021). Role of industry 4.0 in maintaining sustainable production and services. *Handbook of Smart Materials, Technologies, and Devices*. https://doi.org/10.1007/978-3-030-58675-1_18-1
- UN – United Nations. (2015). *Sustainable Development Goals*. United Nations <https://sdgs.un.org/fr/goals>

- Whalen, K. A. (2019). Three circular business models that extend product value and their contribution to resource efficiency. *Journal of Cleaner Production*, 226, 1128–1137. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.128>
- Whalen, K. A., Milios, L. et Nussholz, J. (2018). Bridging the gap: barriers and potential for scaling reuse practices in the swedish ict sector. *Resources, Conservation & Recycling*, 135, 123–131. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.07.029>
- Wang, L., Liu, Z., Liu, A. et Tao, F. (2021). Artificial intelligence in product lifecycle management. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 114(3-4), 771–796. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-06882-1>
- Winter, J. (2020). The evolutionary and disruptive potential of industrie 4.0. *Hungarian Geographical Bulletin*, 69(2), 83–97. <https://doi.org/10.15201/hungeobull.69.2.1>
- World Economic Forum. (2020). *Global electronic waste up 21% in five years, and recycling isn't keeping up*. World Economic Forum. <https://www.weforum.org/agenda/2020/07/global-electronic-waste-recycling-management>
- World Economic Forum. (2021). *The global risks report 2021, 16th Edition*. World Economic Forum. http://www3.weforum.org/docs/WEF_The_Global_Risks_Report_2021.pdf
- Yamaguchi, S. (2018). *International trade and the transition to a more resource efficient and circular economy: A concept paper*. Trade and Environment Working Papers –OECD Publishing. <http://dx.doi.org/10.1787/847feb24-en>
- Yang, X., Zheng, Q., Hu, Y., Chen, R., Wang, X. et Liu, Y. (2022). Research on high-quality development of auto parts manufacturing industry based on machine learning model. *Scientific Programming*, 2022, 3659742. <https://doi.org/10.1155/2022/3659742>
- Yu, S. et Lee, J. (2019). The effects of consumers' perceived values on intention to purchase upcycled products. *Sustainability*, 11(4), 1034–1034. <https://doi.org/10.3390/su11041034>

ANNEXE 1

Guide d'entrevue pour le projet de recherche Durabilité des objets et technologie

A. Présentation (5 min)

- Remerciement et bienvenue
- Présentation de l'intervieweur
- Enregistrement audio et vidéo
- Assurance de la confidentialité
- Obtention du consentement du participant (formulaire de consentement)
- Pas de bonnes ou mauvaises réponses
- Honnêteté et spontanéité
- L'intervieweur éteint son cellulaire
- Discussion à l'ordre du jour : Durabilité des objets et technologie

Définir durabilité des objets :

Définir brièvement les technologies étudiées :

- Vulgarisez dans la mesure du possible □ Avez-vous des questions?

B. Introduction et activité d'échauffement (3 min)

Le chercheur se présente et demande au participant de se présenter et de présenter son organisation

- Nom et Prénom
- Fonction, ancienneté
- Nom de l'organisation
- Taille de l'organisation (effectif, chiffre d'affaires)
- Secteur

Section I : Présentation générale

Le répondant en tant qu'individu

Je vais commencer par vous demander de vous présenter

- Parcours
- Poste actuel
- Rôle et responsabilités au sein de l'entreprise

L'entreprise représentée par le répondant

Pouvez-vous décrire votre entreprise

- Taille, année d'existence... -
- Industrie, Activité...

Section II : L'industrie 4.0

Selon vous, qu'est-ce que l'industrie 4.0 et comment a-t-elle modifié les pratiques en entreprises ?

- **L'Industrie 4.0 fait référence à la transformation de l'industrie et des systèmes de production grâce à l'introduction des nouvelles technologies. Comment cette définition s'applique à votre secteur d'activité? Sur votre entreprise?**
- De quelle manière votre entreprise fait partie de l'industrie 4.0 ?
- Quel a été les effets de l'industrie 4.0 sur votre activité/entreprise?
- Quelle(s) technologie(s) propre à l'industrie 4.0 utilisez-vous dans votre organisation?-
- Avez-vous modifié certaines pratiques afin d'intégrer ces technologies dans vos activités?

Section III : Les technologies Fabrication additive

Comment utilisez-vous la fabrication additive ?

- Depuis quand?
- Que vous apporte la Fabrication additive ?
- **Quel est l'impact de la Fabrication additive sur la durabilité de vos produits?**
- Conception libre
- Complexité des formes
- Personnalisation et adaptation
- Localisation
- Durabilité
- Standardisation et compatibilité

Internet des Objets

Comment utilisez-vous l'Internet des Objets ?

- Depuis quand?

- Que vous apporte l'Internet des Objets ?

Quel est l'impact de l'Internet des Objets sur la durabilité de vos produits?

- Surveillance et suivi
- Contrôle à distance et autocontrôle
- Soutien analytique et intelligence d'affaires
-

Méga données

Comment utilisez-vous les Méga données ?

- Depuis quand?
- Que vous apportent les méga données?

Quel est l'impact des méga données sur la durabilité de vos produits?

- Volume
- Variété
- Vitesse
- Vérité

Intelligence artificielle

Comment utilisez-vous l'intelligence artificielle ?

- Depuis quand?
- Que vous apporte l'intelligence artificielle ?

Quel est l'impact de l'intelligence artificielle sur la durabilité de vos produits?

- Systématisation
- Intelligence
- Automatisation

En terminant, est-ce qu'il y a quelque chose que tu aimerais rajouter et que l'on n'a pas abordé?

Merci de votre précieuse collaboration

ANNEXE 2

Ce mémoire a fait l'objet d'une approbation éthique accordée à Mme Myriam Ertz, professeure au département des sciences économiques et administratives de l'Université du Québec à Chicoutimi et directrice du présent mémoire ainsi qu'à Florian Gasteau en tant que co-chercheur affilié à l'Université du Québec à Chicoutimi. Le numéro du certificat éthique est le 2021-634.