

Transformation numérique : Méthodologie de conception et
d'intégration d'un jumeau numérique d'une chaîne
d'approvisionnement

par

Vincent PRUD'HOMME

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE LA MAÎTRISE
AVEC MÉMOIRE EN GESTION DE L'INNOVATION

M. Sc. A.

MONTRÉAL, LE 2 NOVEMBRE 2022

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Vincent Prud'Homme, 2022



Cette licence [Creative Commons](#) signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette œuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'œuvre n'ait pas été modifié.

PRÉSENTATION DU JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Michel Rioux, directeur de mémoire
Département de génie des systèmes à l'École de technologie supérieure

Mme Ivanka Iordanova, présidente du jury
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Tony Wong, membre du jury
Département de génie des systèmes à l'École de technologie supérieure

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 12 OCTOBRE 2022

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, je tiens à remercier mon directeur de recherche, monsieur Michel Rioux. À la fin de mes études au baccalauréat à l'ÉTS, ce n'était pas dans mes plans de faire de la recherche aux cycles supérieurs. Cependant, Michel m'a offert une opportunité très intéressante et il a su me soutenir ainsi que me guider durant ce laborieux processus, ce qui m'a finalement permis de livrer ce mémoire. Merci pour ton écoute et tes conseils Michel!

Je tiens également à remercier mes collègues de chez *SimWell Consulting & Technologies* : David Larivée, Jacinthe Éthier-Proulx, Maxime Leclerc, Pascalin Ngoko et Shirwa Mahdi. Nous avons travaillé sur un beau projet ensemble pendant plus d'un an et je suis très heureux du résultat ainsi que d'avoir fait votre connaissance. J'ai beaucoup appris avec vous durant cette dernière année. Un merci spécial à Alexandre Ouellet, CEO de SimWell pour l'opportunité de partenariat industriel.

Un merci à mon ami et mentor Dominique Nguyen de la Direction Solutions, Gestion intégrée des risques et Risque de marché du Mouvement Desjardins pour m'avoir permis de me libérer durant la semaine afin de rédiger ce mémoire malgré les projets importants sur lesquels nous travaillons depuis les dernières années. Je tiens aussi à remercier Serjik Sayad et Tony Prete de m'avoir soutenu dans ce processus.

Enfin, je me dois de remercier mes proches. Mon père Normand, ingénieur mécanique de carrière, lui-même diplômé de l'ÉTS, pour m'avoir transmis sa passion pour l'ingénierie et de m'avoir soutenu lors de toutes mes études. Ma mère, Guylaine, pour le constant support moral, l'accompagnement depuis toujours et le souci du travail bien fait. Bien évidemment, un merci à ma copine Mélissa pour son écoute et son soutien tout au long de la rédaction de ce mémoire. Pour finir, merci à mes amis et ma famille (mention spéciale à Lucie et Mario) pour tout l'amour.

Transformation numérique: Méthodologie de conception et d'intégration d'un jumeau numérique d'une chaîne d'approvisionnement

Vincent PRUD'HOMME

RÉSUMÉ

L'Industrie 4.0 est une révolution industrielle qui force les entreprises à être innovantes et d'effectuer la transformation numérique de leurs opérations manufacturières ou de service. Cette transition vers le numérique introduit de nouvelles technologies comme l'IoT, l'intelligence artificielle, l'infonuagique, l'intégration et la connectivité entre les systèmes, la cybersécurité, le *big data* et les jumeaux numériques. Bien que plusieurs secteurs industriels soient en pleine transformation et que plusieurs questions ne sont toujours pas répondues au sujet de ce concept qu'est l'Industrie 4.0, celle-ci porte un gage permettant un contrôle et une organisation plus efficace de la chaîne de valeur. En plus, ce concept a le potentiel d'apporter des avantages significatifs comme la réduction des délais de fabrication, de maintenance, une amélioration de la qualité et de la performance opérationnelles.

Le jumeau numérique (JN) est une technologie mise de l'avant par l'Industrie 4.0 et celle-ci suscite beaucoup d'intérêt de la part des industriels et universitaires. Il existe plusieurs types et applications d'un jumeau numérique, mais de façon générale, par définition, un JN est un modèle numérique d'un actif ou une entité physique qui s'adapte et évolue en fonction de son homologue. Ce projet de recherche s'intéresse principalement à l'application d'un jumeau numérique d'une chaîne d'approvisionnement à l'aide d'un modèle de simulation et l'apprentissage machine.

Ce mémoire se veut un témoignage de l'expérience acquise ainsi, que des enjeux et problèmes rencontrés durant la conception et le développement d'un jumeau numérique en collaboration avec la firme d'ingénierie *SimWell Consulting & Technologies*. Ces différents éléments se traduisent dans ce mémoire comme une stratégie de conception et de mise en œuvre. En d'autres termes, ce mémoire est un outil pertinent pour toutes personnes intéressées à développer un jumeau numérique. Cette connaissance permettra de démarrer de nouveaux projets avec une base plus solide et avec moins d'incertitude. Le projet en question s'est déroulé en quatre étapes méthodiques c.-à-d. : (1) Revue de la littérature sur les éléments pertinents au développement, (2) Conception et développement d'un jumeau numérique, (3) Rédaction d'une méthodologie de conception et d'intégration et (4) Validation de la stratégie avec un cas réel.

La méthodologie proposée aborde des sujets comme la validation des opportunités, l'expertise requise, la gestion du changement, la maturité numérique et organisationnelle, l'architecture technologique, le développement de produit, le coût, les risques et les enjeux de conception. L'application de la stratégie à un cas réel en particulier a permis de faire des observations et d'identifier certaines lacunes. Ces recommandations s'appliquent au cas d'étude, mais sont toutes autant pertinentes pour d'éventuels nouveaux projets.

Mots clés : Transformation numérique, Industrie 4.0, jumeau numérique, innovation, architecture des systèmes, big data, chaîne d'approvisionnement, simulation, apprentissage machine

Digital Transformation: Strategy for designing and integrating a simulation-based supply chain digital twin

Vincent PRUD'HOMME

ABSTRACT

Industry 4.0 is an industrial revolution that forces companies to be innovative and digitally transform their manufacturing or service operations. This transition to digital introduces new technologies such as IIoT, artificial intelligence, cloud computing, integration and connectivity between systems, cybersecurity, big data and digital twins. Although several industrial sectors are in transformation and many questions are still unanswered about this concept of Industry 4.0, it carries a guarantee allowing more effective control and organization of the value chain. This concept can bring significant advantages such as the reduction of manufacturing and maintenance times, and an improvement in quality and operational performance.

The digital twin is a technology promoted by Industry 4.0 and it is attracting a lot of interest from industry and academia. There are many types and applications of a digital twin. A digital twin is a digital model of an asset or physical entity that adapts and evolves based on its counterpart. This research project is interested in operationalizing a supply chain digital twin (SCDT) using a simulation model and machine learning.

This thesis is intended as a testimony of the experience acquired, the issues and problems encountered during the design and development of a digital twin in collaboration with the engineering firm SimWell Consulting & Technologies. The different elements reflected in this thesis translate into a design and implementation strategy. In other words, this thesis is a relevant tool for anyone interested in developing a digital twin. This knowledge makes it possible to start new projects with a more solid foundation and less uncertainty. The project in question took place in four methodical stages i.e.: (1) Literature review on elements relevant to development, (2) Design and development of the digital twin, (3) Drafting of a design and integration methodology and (4) Validation of the strategy with a real business case.

The proposed methodology addresses topics such as opportunity validation, required expertise, change management, digital and organizational maturity, technology, architecture, product development, cost, risk, and design issues. Using this methodology on a specific business case made it possible to make observations and identify certain shortcomings. These recommendations apply to the case study but are just as relevant for upcoming new projects.

Keywords: Digital transformation, Industry 4.0, digital twin, innovation, systems architecture, big data, supply chain, simulation, machine learning

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LA LITTÉRATURE.....	7
1.1 Introduction et stratégie	7
1.2 L'industrie 4.0 et la transformation numérique des entreprises.....	10
1.3 Simulation et jumeau numérique	13
1.4 Big data et architecture de données	17
1.5 Analytique, Intelligence d'affaires et Intelligence artificielle	22
1.6 Conclusion de la revue de littérature	27
CHAPITRE 2 ÉLÉMENTS DE CONCEPTION ET DE MISE EN ŒUVRE.....	29
2.1 Éléments de justification à la mise en œuvre.....	29
2.1.1 Opportunité organisationnelle.....	32
2.1.2 Opportunité technologique.....	34
2.1.3 Opportunité économique.....	35
2.2 Éléments de conception	36
2.2.1 Requis de démarrage pour la conception d'un jumeau numérique.....	36
2.2.2 Expertise requise	39
2.2.3 Contexte de prérequis dans l'entreprise – Maturité numérique	41
2.2.4 Gestion organisationnelle et du changement	43
2.2.5 Modèle de simulation.....	47

2.2.6 Architecture technologique	49
2.2.7 Développement de produit et Produit minimum viable (MVP).....	54
2.2.8 Documentation technique	57
2.3 Coûts, risques et enjeux	59
2.3.1 Structure des coûts et des connaissances	59
2.3.2 Risque de l'innovation	60
2.3.3 Enjeux de mise en œuvre d'un jumeau numérique	65
CHAPITRE 3 CAS PRATIQUE : JUMEAU NUMÉRIQUE APPLIQUÉ À UNE CHAÎNE D'APPROVISIONNEMENT	67
3.1 Mise en contexte du cas sous étude	67
3.2 Éléments de justifications à la mise en œuvre	68
3.3 Éléments de conception	68
3.3.1 Requis de démarrage pour la conception d'un jumeau numérique	68
3.3.2 Contexte de prérequis dans l'entreprise – Maturité de l'entreprise	70
3.3.3 Gestion organisationnelle et du changement	72
3.3.4 Modèle de simulation.....	74
3.3.5 Architecture technologique.....	75
3.3.6 Développement de produit et Produit minimum viable (MVP).....	77
3.3.7 Documentation technique	78
3.4 Coûts, risques et enjeux	79
3.4.1 Évaluation des coûts, gains et ROI	79
3.4.2 Évaluation des risques.....	83
3.4.3 Évaluation des enjeux	85

CHAPITRE 4 DISCUSSION SUR LA MISE EN ŒUVRE DU CAS SOUS ÉTUDE	87
4.1 Discussion sur les éléments à améliorer et pistes de solution.....	87
4.1.1 Retour sur la mise en place de l'équipe de projet	87
4.1.2 Retour sur le contexte de prérequis dans l'entreprise	88
4.1.3 Retour sur la gestion organisationnelle et du changement.....	90
4.1.4 Retour sur l'architecture technologique.....	92
4.1.5 Retour sur le Produit minimum viable (MVP)	93
4.1.6 Retour sur la documentation technique.....	96
4.1.7 Retour sur les enjeux de conception	96
CONCLUSION.....	99
RECOMMANDATIONS	103
ANNEXE I SCRIPT R DE LA FIGURE 3.3	105
LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	106

LISTE DES TABLEAUX

	Page	
Tableau 2.1	Le Pourquoi; Comment; Quoi d'un JN	31
Tableau 2.2	Priorités et prérequis pour la mise en œuvre d'un JN,	42
Tableau 2.3	Code de couleur	43
Tableau 2.4	Composantes des étapes du processus de gestion des données	50
Tableau 2.5	Niveaux de maturité d'un JN et détails des composantes	51
Tableau 2.6	Échelle des risques de l'innovation appliquée à un Jumeau numérique	63
Tableau 3.1	Mise en place de l'équipe de projet	69
Tableau 3.2	Évaluation de la maturité de l'entreprise	70
Tableau 3.3	Changements au niveau de l'individu	72
Tableau 3.4	Changement au niveau de l'organisation	73
Tableau 3.5	Modèle de simulation.....	74
Tableau 3.6	Niveau de maturité du JN	76
Tableau 3.7	Développement du produit et MVP	77
Tableau 3.8	Documentation technique	78
Tableau 3.9	Évaluation des risques.....	84
Tableau 3.10	Évaluation des enjeux	85
Tableau 4.1	Retour sur le contexte de prérequis dans l'entreprise.....	89

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1	Quantité de sources par sujet de recherche8
Figure 1.2	Quantité de sources par mot-clé8
Figure 1.3	Quantité de sources par type de publication9
Figure 1.4	Processus de la stratégie de recherche9
Figure 1.5	From Steam to the Internet of Things - Industry 4.0 via btelligent11
Figure 1.6	Lambda Architecture for Batch and Stream Processing, Amazon Web Services19
Figure 2.1	Innovation diffusion theory, tirée de Moore (2014)30
Figure 2.2	Adaptation de The "Start with Why" Golden Circle Model, tirée de Sinek (2011)31
Figure 2.3	The Business Model Canvas, Strategyze33
Figure 2.4	The Value Proposition Canvas, Strategyzer34
Figure 2.5	Synthèse de la méthode Spin Selling38
Figure 2.6	Pertinence pour l'organisation de s'engager dans un changement, adapté de Collerette et Al. (2012)43
Figure 2.7	Degrés de changement44
Figure 2.8	Adaptation du modèle ADKAR45
Figure 2.9	Processus haut niveau - Architecture big data pour l'analytique49
Figure 2.10	Architecture cloud d'un JN d'une chaîne d'approvisionnement basé sur un modèle de simulation – Niveau de maturité53
Figure 2.11	Cycle de développement PDCA vs. Agile54
Figure 2.12	Cycle itératif de développement55

Figure 2.13	Processus d'évolution de la solution – produit JN.....	56
Figure 3.1	Architecture technologique du JN – Cas sous étude.....	75
Figure 3.2	Calcul des coûts	79
Figure 3.3	Distribution des coûts	80
Figure 3.4	ROI et amortissement des coûts.....	81
Figure 3.5	Amortissement des coûts	82
Figure 3.6	Grille des risques.....	83
Figure 4.1	Produit minimum viable d'un JN.....	95

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

4IR	Fourth Industrial Revolution
WEF	World Economic Forum
IoT	Internet of Things
IIoT	Industrial Internet of Things
CPS	Cyber-Physical Systems
RAMI 4.0	Reference Architecture Model Industrie 4.0
DT	Digital Twin
JN	Jumeau Numérique
SCDT	Supply Chain Digital Twin
TI	Technologies de l'information
IoS	Internet of Services
IA	Intelligence artificielle
DES	Discrete-Event Simulation
SD	Systems Dynamic
ABM	Agent-Based Model
MS	Microsoft
BMC	Business Model Canvas
OLAP	Online Analytical Processing

DL	Deep Learning
ML	Machine Learning
ETL	Extract – Transform – Load
BA	Business Analytic
ERP	Enterprise Resource Planning
TMS	Transport Management System
WMS	Warehouse Management System
BI	Business Intelligence

INTRODUCTION

Mise en contexte

L'Industrie 4.0 met de l'avant la transformation numérique des entreprises autant manufacturières que de service à l'aide des nouvelles avancées technologiques comme l'Internet des Objets (IoT), le Big data, l'Infonuagique ainsi que l'Intelligence artificielle (IA). Le cœur de l'Industrie 4.0 est l'intégration verticale et horizontale ainsi que la fusion entre le monde physique et le monde virtuel. (Ghobakhloo & Fathi, 2019). Un jumeau numérique a pour concept de relier un actif physique (une machine, une usine, une chaîne d'approvisionnement) à un modèle numérique et peut ainsi permettre à l'entreprise de prendre des décisions autant tactiques que stratégiques soit au niveau des opérations ou bien de la gestion dans un environnement contrôlé et sans risque.

Le concept de jumeau numérique permet des opportunités et des avantages plutôt intéressants pour les différentes industries. À l'aide de cette technologie, les entreprises peuvent être innovantes et perturbatrices tout en améliorant leur efficacité ainsi que leurs productivités opérationnelles, réduire leurs risques, minimisez les coûts d'investissement et d'exploitation, d'augmenter leurs revenus et améliorer leur conformité réglementaire. (Wanasinghe et al., 2020).

L'industrie 4.0 possède un grand potentiel économique et plusieurs questions n'ont pas été encore résolues. Cependant, afin de pouvoir enclencher le vrai potentiel de cette nouvelle révolution industrielle, il est nécessaire de mettre de l'avant la connectivité entre les actifs physiques et leurs équivalents numériques. Il existe un intérêt marqué pour le concept de jumeau numérique et cet intérêt continue de grandir de façon exponentielle depuis les dernières années. Plusieurs industries dont le secteur manufacturier, construction, automobile, aéronautique, médical ainsi que les industries de la vente au détail, du pétrole et du gaz s'intéressent à ce concept avec des résultats de recherche se dénombrant approximativement entre 5000 et 25000 résultats. (Nguyen, Gosine, & Warrian, 2020).

Problématique de recherche

La problématique de ce projet de recherche est principalement la mise en œuvre d'un jumeau numérique d'une chaîne d'approvisionnements (*Supply Chain Digital Twin – SCDT*) à l'aide d'un modèle de simulation (événements discrets ou à base d'agent), l'infonuagique, l'apprentissage machine (ML), le *big data* ainsi que les concepts d'orchestration TI. Brièvement, l'idée est de trouver une façon afin de connecter toutes ces différentes technologies ensemble et que celles-ci fonctionnent de façon efficace.

Effectivement, bien que beaucoup d'entreprises s'intéressent à cette technologie, le concept de jumeau numérique est encore en développement et il y a plusieurs défis qui se doivent encore d'être surmontés. La pertinence d'effectuer un travail de recherche scientifique par rapport à cette technologie est plus qu'importante. Le développement d'un jumeau numérique nécessite de reconstruire, de repenser ou bien de reconfigurer des plateformes logicielles ainsi que le matériel informatique et les interconnexions infonuagiques des machines de production ou des actifs physiques. Le développement d'un JN peut donc impliquer des coûts importants ce qui peut avantagez à l'heure actuelle des entreprises disposant de plus de capital et de ressources humaines à leur disposition. (Barricelli, Casiraghi, & Fogli, 2019)

But de l'étude de cas

En collaboration avec la firme de génie-conseil en simulation *SimWell Consulting & Technologies*, le but de cette étude de cas est de développer un jumeau numérique robuste et performant appliqué à la chaîne d'approvisionnement en considérant tous les éléments à tenir en compte tels que les requis de démarrage, l'architecture et les facteurs de succès à la commercialisation. L'idée est de développer un jumeau numérique à l'aide d'un modèle de simulation développé avec l'outil *Anylogic*. Une simulation d'événements discrets ou par agent se rapproche en quelque sorte d'un jumeau numérique, mais bien évidemment ce n'est pas en temps réel. Il est donc question de concevoir une architecture afin d'alimenter en temps réel le modèle de simulation avec des données en simultané (IoT), statique ou bien provenant de système d'affaires et, par la suite, pouvoir utiliser les résultats à des fins stratégiques comme des décisions d'affaires ou opérationnels. Le rendu de ce document sera donc une marche à suivre afin de mettre en œuvre un jumeau numérique appliqué à la chaîne d'approvisionnement avec un cas sous étude.

Objectifs du projet

L'objectif principal est d'accompagner et d'aider l'entreprise *SimWell Consulting & Technologies* dans le développement d'un jumeau numérique robuste et viable à long terme. Cette étude cherche donc (1) à mettre de l'avant les différents concepts, avantages, enjeux, idées et solutions envisageables afin de permettre à *SimWell* de pouvoir développer cette technologie pour l'un de leurs clients et bien évidemment de pouvoir le commercialiser par la suite; (2) Le modèle de solution proposée dans ce mémoire de recherche doit pouvoir être mis à l'échelle selon les besoins commerciaux et (3) le rapport doit être présenté comme une marche de suivre afin de mettre en œuvre un jumeau numérique.

Afin de pouvoir arriver à atteindre l'objectif principal de ce mémoire, il est nécessaire d'envisager d'atteindre les sous-objectifs suivants :

- 1) Proposer une architecture permettant de supporter la solution de Jumeau numérique;
- 2) Déterminer et proposer une solution afin d'ingérer des sources de données différentes;
- 3) Listez les enjeux et opportunités quant au JN et la mise en œuvre;
- 4) Présenter un cas pratique;

Questions de recherche

Afin de concevoir et de mettre en œuvre un modèle de solution, il est nécessaire d'utiliser des technologies de pointe ainsi que de déterminer une architecture qui est appropriée afin de supporter la solution. Malgré des enjeux comme la réingénierie et les coûts qu'engendre le développement d'un Digital Twin - DT, l'enjeu principal identifié dans le cadre du projet par l'équipe de consultants et d'ingénieurs est la gestion et l'intégration des données sources, mais aussi la communication et l'intégration des différentes technologies. Il est donc juste, mais surtout pertinent de se poser les questions suivantes :

- 1) Quels sont les avantages d'un jumeau numérique?
- 2) Comment faire pour alimenter en temps réel le modèle de simulation avec des données de différents systèmes sources tout en s'assurant de la performance de celui-ci?
- 3) Comment faire afin de surmonter l'enjeu qui est l'ingestion des données en temps réel?
- 4) Quels sont les prérequis technologiques et le produit minimum viable?

Hypothèses

- Hypothèse 1 : Vu le contexte de partenariat industriel, le succès du projet et le niveau de détails de la solution sont en fonction de contraintes budgétaires et de temps.
- Hypothèse 2 : Le succès de la mise en œuvre dépend de la gestion du changement et de la bonne relation avec le partenaire d'affaires c.-à-d. le client. L'engagement complet de celui-ci est aussi un facteur important.

Méthodologie

Le contexte de partenariat industriel amène le chercheur à utiliser une méthodologie de recherche-action dans une boucle d'innovation vu que l'étude fournira des conclusions et recommandations qui s'appliquent directement à la réalité. La méthodologie consiste à (1) effectuer une revue de littérature sur les différents sujets comme la transformation numérique des entreprises, la simulation dynamique, les jumeaux numériques, l'architecture de données, le *big data*, l'IA et la science de la décision afin d'obtenir un portrait et de la visibilité sur les technologies et concepts proposés afin de développer la solution; (2) Travailler conjointement avec l'entreprise SimWell au développement d'un jumeau numérique; (3) Proposer un gabarit – marche à suivre quant à la conception et mise en œuvre d'un jumeau numérique et aborder les requis technologiques, les avantages, enjeux et concepts de gestion de l'innovation; (4) Appliquer le gabarit – marche à suivre à un cas pratique qui est de cas-ci la solution développée avec SimWell pour l'un de leurs clients; (5) Discuter par rapport au résultat et (6) proposer des recommandations.

CHAPITRE 1

REVUE DE LA LITTÉRATURE

1.1 Introduction et stratégie

Ce chapitre du mémoire porte sur la revue de la littérature quant aux différents sujets abordés dans le cadre de ce projet. Cette revue exhaustive a été conduite afin de prendre connaissance des technologies, enjeux et solutions envisageables concernant la mise en œuvre d'un jumeau numérique. Afin de conduire cette revue, les moteurs de recherche comme *Web of Science*, *Scopus*, *Compendex & Inspec*, *Google Scholar* et *Microsoft Academic* ont été utilisés afin de collecter plusieurs types de documents, tels que des papiers de conférence, articles scientifiques, chapitres de livre ainsi que des sondages. Vu l'intérêt exponentiel sur les jumeaux numériques dans les dernières années, la revue de littérature porte sur des sources avec une date de parution postérieure à 2011 et jusqu'au moment de la rédaction de cet ouvrage soit 2021-2022.

La stratégie utilisée est de faire une première itération de la recherche avec le mot-clé « *Digital Twin* ». Dans ce cas-ci, la base de données utilisée est *Scopus*, mais comme mentionné, d'autres bases de données ont été utilisées afin de collecter la documentation. Afin d'obtenir des sources qui sont en lien avec la problématique, la recherche a été raffinée sur les sujets qui se rapprochent de celle-ci c.-à-d. (1) *Engineering*, (2) *Computer Science*, (3) *Mathematics*, (4) *Business and Management* et (5) *Decision Science*. Les autres sujets sont considérés comme aberrants donc ceux-ci ont été exclus de la deuxième itération de la recherche. La figure 1.1 montre que le premier résultat soit la quantité de sources par sujet de recherche ($n = 1384$). La majorité des sources sont en lien avec l'ingénierie ainsi que la science informatique.

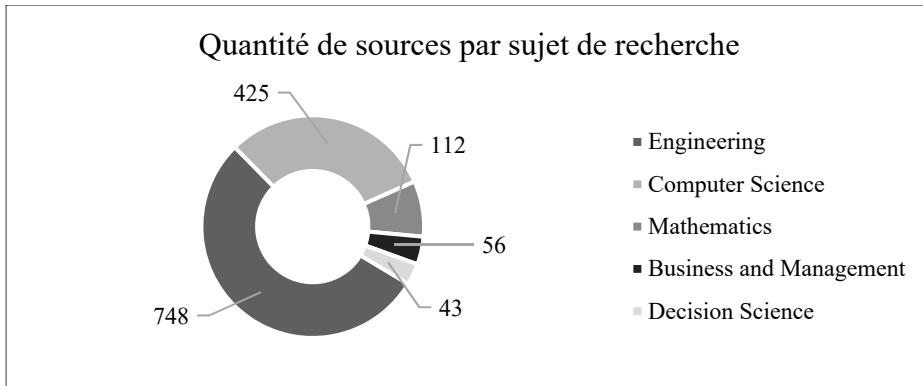


Figure 1.1 Quantité de sources par sujet de recherche

La deuxième étape consiste à filtrer sur les mots-clés qui sont en lien avec la problématique de recherche et les objectifs. Il y a beaucoup de mots-clés envisageables, mais seulement ceux contenant le plus de sources ont été retenus par souci de pertinence. La figure 1.2 montre le top 20 des mots-clés avec leur quantité respective de source. À la suite de ce filtre, le nombre de résultats est maintenant de 1164 documents ($n = 1164$).

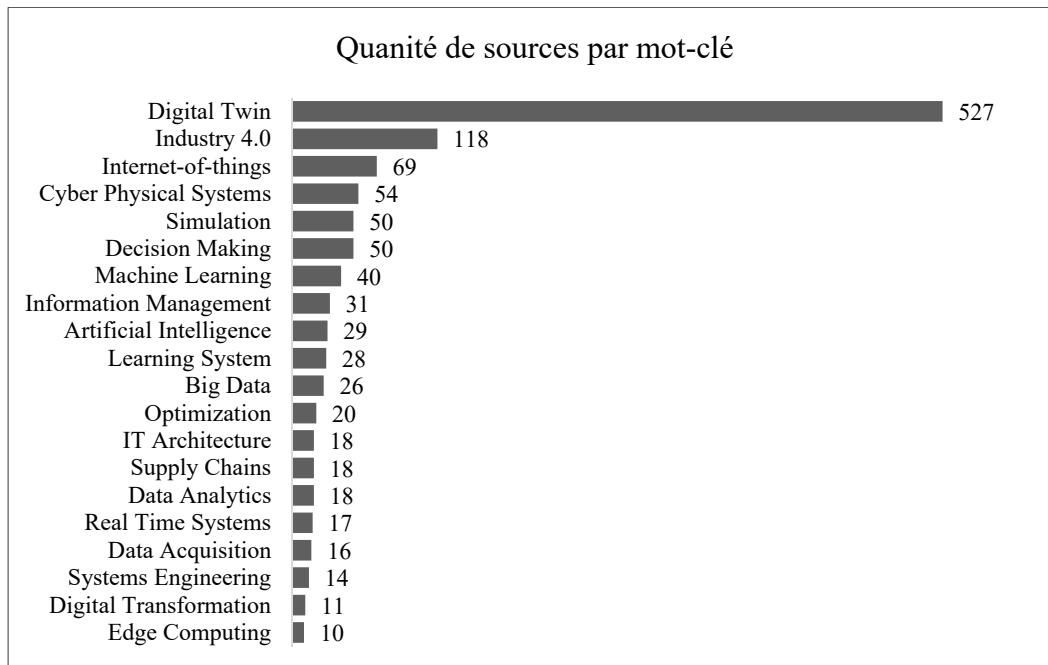


Figure 1.2 Quantité de sources par mot-clé

La dernière étape de la recherche est de filtrer sur les années de parution entre 2011 à 2021 afin d'obtenir les articles les plus pertinents. Le résultat de la recherche permet donc d'obtenir un résultat de 641 documents ($n = 641$) divisés entre (1) *Article*, (2) *Conference Paper*, (3) *Review*, (4) *Book Chapter* et (5) *Editorial* comme présenté à la figure 1.3.

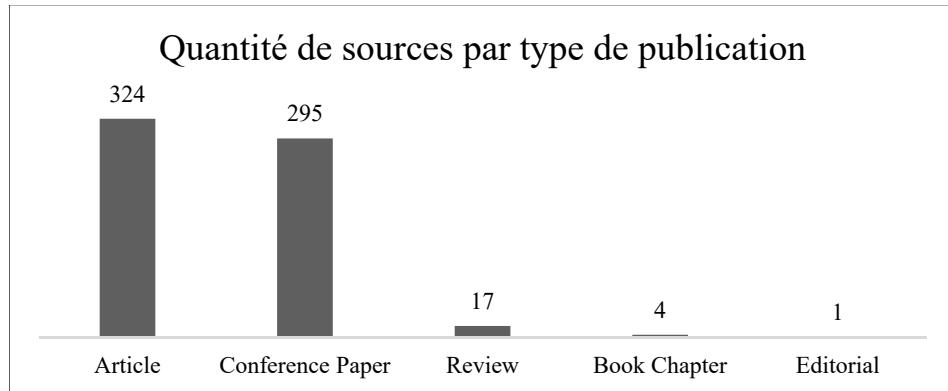


Figure 1.3 Quantité de sources par type de publication

Le processus global de la stratégie quant à la recherche des sources, de la documentation ainsi que la suite du projet de recherche est représentée par le diagramme de la figure 1.4

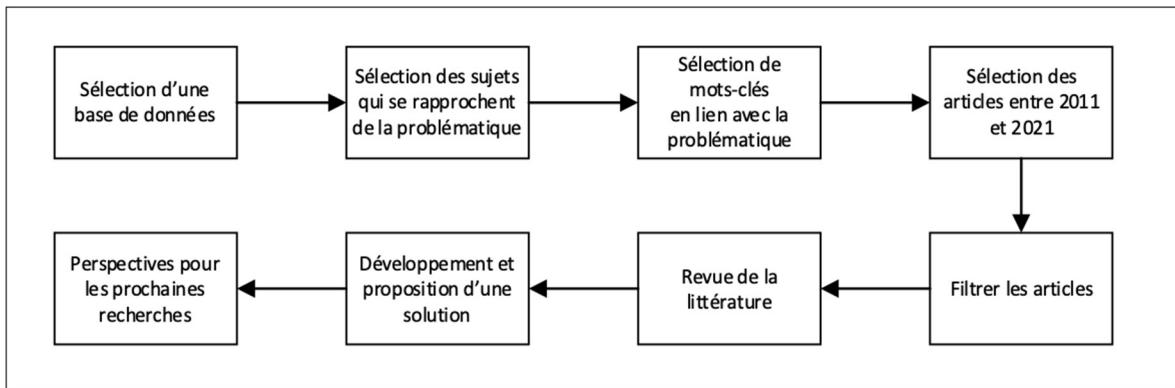


Figure 1.4 Processus de la stratégie de recherche

Le processus de recherche de la documentation et des sources a permis de déterminer que la revue de la littérature doit être logiquement structurée en 4 grandes parties distinctes, car ces différentes connaissances sont pertinentes au développement et à la conception d'une solution afin de résoudre la présente problématique de recherche. Les parties sont les suivantes : (1) l'industrie 4.0 et la transformation numérique des entreprises; (2) la simulation et jumeau numérique (3) le *big data* et l'architecture TI et (4) l'intelligence artificielle, l'analytique et l'intelligence d'affaires.

1.2 L'industrie 4.0 et la transformation numérique des entreprises

L'intérêt envers l'Industrie 4.0 (I4), *Fourth Industrial Revolution* (4IR) ou *Smart Manufacturing* depuis le *World Economic Forum* (WEF) de 2016 n'arrête pas de grandir et le concept est de plus en plus adopté par une multitude d'entreprises dans divers domaines et secteur d'activités afin de moderniser la production manufacturière. Effectivement, en 2014, la firme McKinsey prédisait que la numérisation verticale et horizontale de la chaîne de valeur atteindrait un taux de 80% dans les 5 prochaines années. Le terme Industrie 4.0 allie une variété de technologies comme l'Internet des objets (IoT), l'intelligence artificielle (AI), l'infonuagique, l'intégration verticale et horizontale des systèmes – *cyber-physical systems* (CPS), le *Big Data*, l'analytique, la cybersécurité et la simulation. Ces technologies permettraient, selon les études, un meilleur contrôle ainsi qu'une organisation plus efficace de la chaîne de valeur pour tout le cycle de vie des produits, ce qui engendre une réduction des délais de fabrication, une amélioration de la qualité des produits et des performances opérationnelles. (Kamble, Gunasekaran, & Gawankar, 2018).

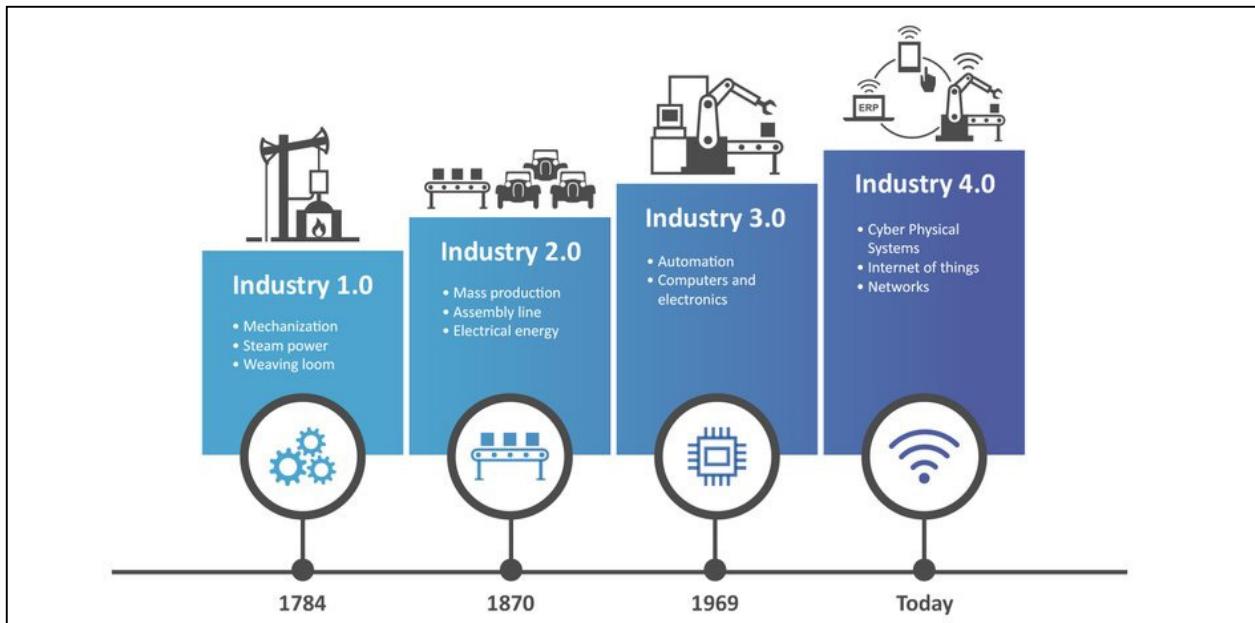


Figure 1.5 From Steam to the Internet of Things - Industry 4.0 via btelligent

Effectivement, les technologies comme l'IA, l'infonuagique et l'analytique de données transforment déjà de façon drastique les entreprises à travers le monde. À ce sujet, Akter et al., (2020) soulève que les investissements en intelligence artificielle pour automatiser la chaîne de valeur atteindra 191 milliards \$ d'ici 2025 avec une croissance annuelle de 36.6% et que 91.6% des entreprises Fortune 100 investissent dans l'analytique de données.

La transformation numérique des entreprises est ce qui permet de combiner les différentes technologies ainsi que les compétences afin de transiter vers l'Industrie 4.0. C'est ce qui a attiré l'intérêt dans les récentes publications de recherche vu la complexité et les différents enjeux de cette transformation industrielle et technologique. La grande question mais surtout le défi de cette transition est : Comment faire? Par où commencer? C'est pourquoi plusieurs modèles d'architecture, de gabarit - *framework* et de solutions d'intégration sont proposés dans la littérature déjà existante afin d'aider les entreprises à transitionner vers ce concept.

Premièrement, la *German Electrical and Electronic Manufacturers Association* (ZVEI) a développé un modèle afin de supporter les initiatives de transformations numériques visant à transiter vers l'Industrie 4.0. Le modèle *Reference Architecture Model Industrie 4.0 (RAMI 4.0)* a pour objectif d'expliquer comme approcher le déploiement de l'Industrie 4.0, et ce d'une manière structurée. Le modèle proposé se découpe en plusieurs niveaux tels que (1) Business; (2) Functional; (3) Information; (4) Communication; (5) Integration et (6) Asset. (Schweichhart, 2016). Les niveaux se définissent et se traduisent comme suit :

- 1) Business** : Définir les processus organisationnels
- 2) Functional** : Définir les fonctions des actifs
- 3) Information** : Identifier les données nécessaires
- 4) Communication** : Rendre accessible l'information (données)
- 5) Integration** : Effectuer la transition du monde réel à celui de numérique
- 6) Asset** : Effectuer la réplication d'un actif physique en numérique

Cependant, comme mentionné, la transition – la transformation vers le numérique des entreprises apporte son lot de complexité quant à l'intégration de nouvelles technologies, mais aussi la maintenance de celles-ci. Selon Hoyer et al. (2020), il existe 3 grands niveaux de complexité qui doivent être pris en compte quant à l'intégration de technologies innovantes pour transitionner vers l'Industrie 4.0. La première complexité est la *Implementation Complexity*, la deuxième complexité est la *System of Systems Management Complexity* et la troisième est la *Technological Complexity*. Les différentes complexités de transformation se définissent ainsi :

- 1) Implementation Complexity:** Cette complexité prend comme hypothèse que l'intégration de technologies innovantes augmente le niveau de complexité des processus et les différentes relations entre les systèmes augmentent la complexité du processus d'implémentation.

- 2) **System of Systems Management Complexity:** Cette complexité prend comme hypothèse qu'une entreprise intelligente peut être considérée comme un système de systèmes, c.-à-d. que le système complexe est une résultante de plusieurs systèmes interconnectée entre eux et qu'un système qui n'est pas intégré au système rajoute de la complexité.
- 3) **Technological Complexity:** Cette complexité prend comme hypothèse que la connexion entre plusieurs entités augmente la quantité de données qui doivent être traitées résultant par une augmentation de la complexité du système.

Finalement, malgré les nombreux avantages qu'apporte ces nouvelles technologies, Ghobakhloo & Fathi, (2019) soulignent le fait que les universitaires sont toujours incertains à propos de la création de valeur qu'apporte la numérisation manufacturière néanmoins les nombreux avantages. Cependant, malgré tout, il est très intéressant de constater que les études ont démontré que les investissements importants en TI apportent aux entreprises une augmentation de leur performance et de leur productivité.

1.3 Simulation et jumeau numérique

Simulation

La simulation des opérations et de la logistique est une méthode clé pour la mise en œuvre d'un système de support à la décision dans le cadre des activités de contrôle et de la planification. Effectivement, tel que le mentionne Tako & Robinson, (2012), dans le cadre de la logistique et de la gestion de la chaîne d'approvisionnement, des systèmes de support à la décision basé sur un modèle de simulation apportent des solutions à plusieurs problèmes et enjeux autant à un niveau tactique, stratégique et opérationnel. L'utilisation de la simulation permet aux organisations de se donner un avantage concurrentiel important lors du développement, du déploiement ainsi que lors de l'exécution de ses plans et stratégies.

Un modèle de simulation permet de virtualiser des processus en testant des modèles virtuels qui évoluent dans le temps et d'état avant même de les appliquer au « monde réel ». (Agalianos, Ponis, Aretoulaki, Plakas, & Efthymiou, 2020). De plus, la simulation a prouvé pouvoir apporter plusieurs avantages tels que le mentionne Agalianos et al., (2020) dans sa recherche à ce sujet. Celui-ci liste les cinq avantages suivants :

- Prédiction de la performance – Latence, utilisation et goulot d'étranglement;
- Indiquer l'interaction entre les différentes parties prenantes d'un système;
- Évaluer les différents scénarios et leurs avantages;
- Apporter une base de connaissances sur la configuration du système;
- Soutenir la prise de décision stratégique et/ou tactique;

À l'occasion de sa recherche sur l'optimisation de stratégie d'approvisionnement, Ngoko, P.Z. (2019) effectue un sommaire des différentes méthodes de simulation. Il existe trois grandes méthodes de simulation quant à la modélisation de simulation: (1) Dynamique des systèmes; (2) Simulation à base d'agents et (3) Simulation d'évènements discrets. Le *whitepapers Multimethod Simulation Modeling for Business Applications* de The AnyLogic Compagny vient appuyer les définitions suivantes :

- **Dynamique des systèmes (SD)** : La dynamique des systèmes est la méthode de simulation la plus ancienne, initialement développée au MIT en 1950. Cette méthode est utilisée pour la modélisation stratégique et se concentre au niveau organisationnel et de gestion de l'entreprise représentant ainsi une vue généralisée d'un système complexe. Cette méthode est basée sur le diagramme de stock et de flux ce qui signifie qu'un processus quelconque est considéré comme un flux entre un stock.

- **Simulation d'évènements discrets (DES)** : La méthode de simulation d'évènements discrets se voit comme une méthode à plus bas niveau que la dynamique des systèmes et considère un système comme un processus. La simulation d'évènements discrets est modélisée comme un *process flowchart* qui se rapproche d'un diagramme de processus qui est souvent utilisé dans les entreprises pour définir un processus d'affaires. Cette méthode est utilisée dans des secteurs industriels autant manufacturiers que de service.
- **Simulation à base d'agents (ABM)** : La méthode de simulation à base d'agents est la méthode la plus récente entre les trois. Grâce à la capacité de calcul des ordinateurs du 21^e siècle, cette méthode a pu être mise de l'avant sur le marché et avoir un grand succès. Dans ce cas-ci, la simulation à base d'agents décrit un système comme étant un ensemble d'objets en interactions avec leurs propres comportements. Celle-ci [la méthode] peut être utilisée pour des problèmes à haut et bas niveau en termes de détails ainsi que de modéliser des problèmes au niveau de la chaîne d'approvisionnement ou bien épidémiologique.

En quelques mots, le choix de la méthode (SD, DES ou ABM) devrait être fait selon le type de problème à résoudre et l'objectif du modèle de simulation, car chaque méthode a ses propres forces et faiblesses ainsi que ses technicités distinctes. (Tako & Robinson, 2012)

Jumeau numérique (JN)

Malgré l'introduction du concept de JN, il y a de cela bientôt presque 20 ans par Michael Grieves à l'université du Michigan, la littérature n'a jamais vraiment décrit formellement la définition et les caractéristiques de ce concept. Effectivement, depuis les dernières années vu la montée en popularité de l'Industrie 4.0, les jumeaux numériques (JN) suscitent beaucoup d'intérêt dans le milieu industriel et celui-ci est étudié dans le milieu scientifique ainsi qu'universitaire. À la suite d'un sondage effectué dans le cadre d'une étude par Barricelli et al., (2019), celui-ci met de l'avant les différentes définitions, caractéristiques et domaines d'application d'un jumeau numérique proposé dans la littérature scientifique.

Dans son étude, il définit les JN comme des machines (physiques et/ou virtuelles) ou des modèles informatiques qui simulent un actif physique. Un actif/entité physique peut autant bien être une machine, une usine, une chaîne d'approvisionnement ou même un processus et un humain. Cependant, il est intéressant de noter qu'un jumeau numérique n'est pas simplement un modèle de simulation, mais bien un modèle vivant qui évolue comme étant l'homologue direct d'une entité physique. Il est donc important de ne pas confondre ces deux concepts. Dans le cadre de ses recherches sur les jumeaux numériques et le *big data*, Tao et al., (2018), avance qu'un JN est composé d'une structure en trois parties: (1) Produit physique; (2) Produit numérique; (3) Système de communication de données qui attache les parties physiques et numériques. La partie communication d'un JN est très importante, car il est primordial qu'il y ait une synchronisation complète et une intégration en continu du système. Dans le cadre de cette recherche, l'étude s'intéresse au concept de jumeau numérique appliqué à la chaîne d'approvisionnement – *supply chain digital twin (SCDT)* basé sur un modèle de simulation. Dans ce sens, Ivanov & Dolgui, (2020) décrivent un jumeau numérique d'une chaîne d'approvisionnement comme étant une combinaison de simulation, d'optimisation et d'analyse de données.

Le jumeau numérique doit pouvoir refléter l'état actuel de la chaîne d'approvisionnement en incluant des données sur le transport, l'inventaire, la demande ainsi que la capacité. Cependant, outre le grand potentiel d'un modèle de simulation, un jumeau numérique a pour objectif d'être une source de connaissance et il est nécessaire d'avoir une architecture technologique robuste afin de supporter les différents éléments. Effectivement, l'architecture doit permettre de stocker l'état actuel (*real time*) ainsi que les données historiques et permettre aux *end-users* d'en tirer des données pouvant être exploitées. (Korth, Schwede, & Zajac, 2019)

1.4 Big data et architecture de données

Big data

Comme l'explique Gamache, Sébastien (2019), le terme « Big Data » représente le volume massif de données structurées ainsi que non structurées trop complexes que même les techniques de gestion de base de données et de logiciels traditionnels ne peuvent les traiter. La gestion des données de masse – *Big data* est donc un facteur de succès important quant à la réussite de l'intégration et la mise en œuvre de technologies innovantes pour transiter vers l'Industrie 4.0. En effet, une bonne gestion des données de masse permet aux entreprises de générer de l'information pertinente pour les opérations et services dont l'objectif est de permettre à celle-ci de prendre des décisions tactiques ou stratégiques résultant ainsi d'une création de valeur.

Le *big data* industriel ce définit par « *les 5 V* » c.-à-d. : (1) Volume, (2) Variété, (3) Véracité, (4) Vélocité et (5) Valeur.

- 1) **Volume** : Quantité de données créées sur une période;
- 2) **Variété** : Données structurées, semi-structurées, non structurées et Machine;
- 3) **Véracité** : Incertitude, fiabilité et confidentialité des données;
- 4) **Vélocité** : Vitesse à laquelle de nouvelles données sont générées;
- 5) **Valeur** : Valeur des données;

Effectivement, les systèmes intelligents sont axés principalement sur les données donc, il est important de mettre en place une infrastructure solide afin de les supporter. Selon Khan et al. (2017), la collecte de données, le traitement, le transport, l'intégration, la transformation, le stockage, le calcul ainsi que l'extraction sont les enjeux principaux de la gestion des données de masses dans un contexte d'Industrie 4.0. Par exemple (Korth et al., 2019) vulgarise très bien le lien étroit entre la logistique et les données de masse.

Il mentionne que les systèmes de logistique tels que les entrepôts, centres de distribution, environnement de production ainsi que les réseaux d'approvisionnement peuvent être considérés comme des systèmes complexes qui interagissent entre eux résultant pas la génération d'une multitude de processus ce qui cause une masse importante de données devant être stockées, traitées et exploitées. Tel que le mentionne Wanasinghe et al., (2020), dans le monde connecté d'aujourd'hui, les données sont au cœur d'une meilleure compréhension des différentes interactions. Afin d'éviter des risques, il est nécessaire d'effectuer la planification et la prise de décisions sur l'état en temps réel de l'entreprise, c'est donc pourquoi il est important d'avoir une architecture de gestion des données pouvant soutenir ceci. Dans la cadre de la gestion des données de masses, il est important que les technologies utilisées rencontrent les requis suivants : (1) Puissance de traitement pour les calculs complexes; (2) Capacités de traitement des données évolutives, tolérance aux pannes, stockage temporaire et permanent; (3) Traitement parallèle adapté au traitement de grandes collections de données; (4) Environnements appropriés pour l'exécution des traitements. (Vossen, 2014)

Architecture de données

Il existe une multitude de modèles d'architecture répondant spécifiquement à des besoins et requis d'entreprises, cependant dans la littérature provenant des références dans le domaine c.-à-d. Google, AWS, Microsoft, Databricks, on retrouve deux principaux modèles d'architecture pour la gestion des données de masses c.-à-d., les modèles (1) Lambda et (2) Kappa.

1) Lambda

L'architecture Lambda est une méthode conçue dans l'objectif de gérer une énorme quantité de données de façon hybride en utilisant la méthode par lot (*batch*) et en temps réel (*real-time processing*) et permet une agilité au niveau de la gestion des données, une flexibilité quant à la mise à l'échelle ainsi qu'un excellent niveau de disponibilité.

Ce modèle d'architecture de données est composé de trois couches distinctes c.-à-d. (1) *Batch Layer*, (2) *Serving Layer* et (3) *Speed Layer* ou le *Stream Layer*.

Premièrement, la couche *Batch Layer* a pour utilité de gérer les données brutes et d'agréger celles-ci pour les rendre accessibles par la suite dans la couche *Serving Layer* sous différentes vues. Finalement, vu que l'agrégation des données en lot nécessite une certaine période, la couche *Speed Layer* permet d'avoir accès à des vues en temps réel de données qui ne sont pas encore traitées dans la couche *Batch Layer*. Une requête sur la couche *Serving Layer* et *Speed Layer* permet d'avoir une visibilité complète sur les données. Malgré sa complexité, ce modèle offre une haute tolérance quant aux pannes matérielles et humaines.

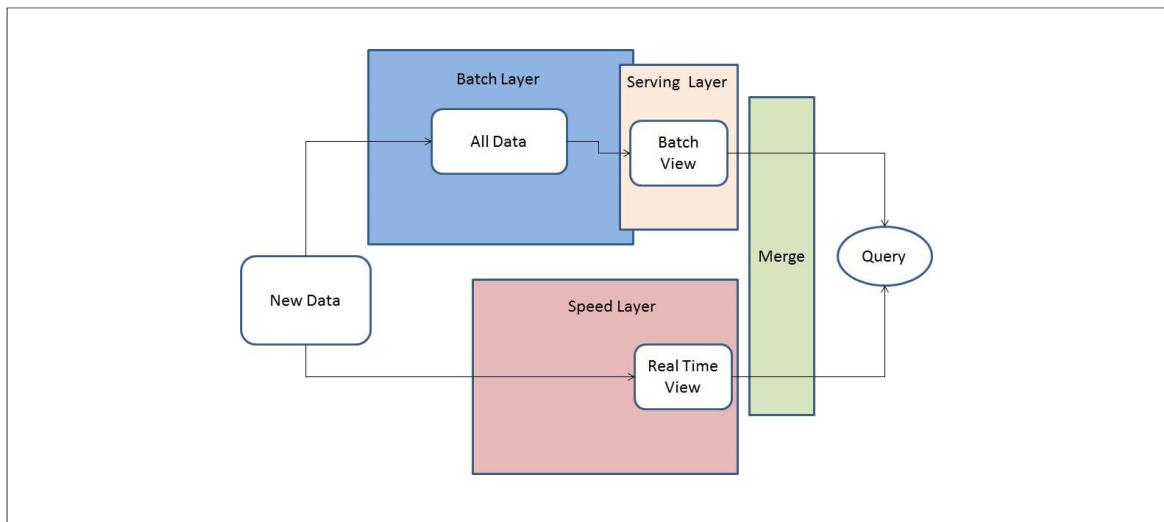


Figure 1.6 Lambda Architecture for Batch and Stream Processing, Amazon Web Services

2) Kappa

L'architecture Kappa est une alternative simplifiée à la méthode Lambda qui a plusieurs contraintes, car celle-ci effectue le calcul et la gestion des données dans deux endroits différents. Cette architecture propose donc d'utiliser seulement un chemin afin d'effectuer la gestion des données massives ce qui veut dire que chaque source de données est considérée comme un flux de données. Contrairement au modèle Lambda, celui-ci n'utilise que deux couches, soit *Stream Layer* et *Serving Layer*.

Tel que mentionné dans l'étude de (Feick, Kleer, & Kohn, 2018), celui-ci avance que les processus de développement liés au modèle Kappa comme (1) l'implémentation, (2) le débogage, (3) maintenance du code sont beaucoup plus simple que le modèle Lambda. Il soulève aussi que les deux modèles d'architecture ne peuvent être comparés entre eux, car le modèle doit être choisi selon l'objectif de la solution. En bref, l'approche Kappa privilégie la simplicité au lieu de l'efficacité.

Néanmoins les deux modèles présentés dans cette section, il est intéressant de constater que selon la documentation - *whitepapers* de Microsoft, la majorité des modèles d'architecture *big data* comportent les composantes suivantes : (1) Sources de données, (2) Stockage des données, (3) Traitement par lots, (4) Ingestion de messages en temps réel, (5) Traitement de flux, (6) Magasin de données analytiques, (7) Analyse et rapports et (8) Orchestration.

1) Sources de données : Les sources de données peuvent être soit des fichiers statiques, données en temps réel, logs de systèmes, applications développées, *in-house* ou bien des bases de données d'entreprise. Ces données peuvent autant bien être structurées, semi-structuré que non-structuré.

- 2) **Stockage des données** : Le stockage de données reçoit un volume massif de données dans différents formats, il est donc nécessaire de placer les données dans des espaces de fichiers distribués. Les outils généralement utilisés sont soit un lac de données – *data lake* ou un espace de stockage de grands objets binaire - *Blob*
- 3) **Traitement par lots** : Dans le cadre de la gestion de données massives, les solutions d'architecture Big Data doivent comporter une étape de traitement des données par lot afin de filtrer, agréger et préparer les données pour des fins d'analyse et de rapport. Le traitement par lots consiste à lire les données sources, de les traiter selon le besoin et d'écrire de nouveaux fichiers pour être éventuellement stocké dans un magasin de données analytique. Pig ou Hive sont des technologies qui ont pour objectifs de réaliser ce genre d'opérations.
- 4) **Ingestion de messages en temps réel** : Dans l'optique que la solution Big data, comporte des données en temps réel comme les solutions IoT, il est nécessaire d'avoir une façon afin de capturer les informations en temps réel et de les traiter. Les services d'ingestion en temps réel comme Apache Kafka, Amazon Kinesis, Microsoft Event Hub ou Google Pub/Sub ont pour objectif d'effectuer ce genre de traitement.
- 5) **Traitement de flux** : L'étape de traitement de flux consiste à traiter les données en temps réel en vue d'analyse ou de stockage en filtrant et agrégeant celles-ci. Les technologies comme Apache Storm et Spark peuvent être utilisées afin d'effectuer ce traitement et d'envoyer les données dans le magasin de données d'analytique ou directement à la couche d'analyse et de rapports pour fin d'analyse en temps réel.
- 6) **Magasin de données analytique** : Le magasin de données analytique a comme rôle de fournir des données dans un format structuré pouvant être interrogé par des outils d'analyse. Selon les besoins, cette couche peut soit être une base de données SQL, NoSQL (non relationnel), un entrepôt de données, ou bien un service nuage comme Azure Synapse ou Databricks.

- 7) Analyse et rapports :** En général, une solution Big data a pour objectif de fournir des données pour des fins d'analyse et de rapports. C'est pourquoi il est nécessaire d'avoir une couche de modélisation, d'explorations et de visualisations de données afin de pouvoir exploiter les données via un tableau de bord ou autres solutions. Il est possible d'utiliser des outils conçus à cet effet comme MS Power BI ou MS Excel. Il est aussi possible d'utiliser des technologies et/ou langages de programmation comme Jupyter Notebook, R ou Python pour développer des modèles d'analyse.
- 8) Orchestration :** Finalement, les architectures Big data ont besoin d'une couche d'orchestration afin de gérer les différents workflows de transformations et de déplacement des données. Microsoft propose leur solution *in-house* Azure Data Factory sinon, Apache Oozie avec Apache Sqoop ont pour objectif de répondre à ce besoin.

1.5 Analytique, Intelligence d'affaires et Intelligence artificielle

Analytique et Intelligence d'affaires

L'intérêt grandissant dans l'utilisation des systèmes d'intelligence d'affaires et de l'analyse des données permettent aux dirigeants d'entreprise de se baser sur les données afin de soutenir leurs décisions stratégiques ou tactiques. Effectivement, les entreprises qui utilisent des systèmes d'intelligence d'affaires performent davantage que leur concurrent dans leur secteur. Les données peuvent générer de l'information avec beaucoup de valeur si celles-ci sont bien exploitées. Par exemple : (1) Il est possible pour les entreprises d'améliorer la vitesse de leurs processus; (2) Comprendre davantage leurs clients ainsi que leurs besoins ou bien (3) améliorer l'innovation. (Huang, McIntosh, Sobolevsky, & Hung, 2017)

Le *Analytic Continuum* définie par Gartner met de l'avant les niveaux de maturité en termes d'analytique d'affaires. Il y a quatre niveaux c.-à-d. (1) *Descriptive*, (2) *Diagnostic*, (3) *Predictive* et (4) *Prescriptive*. Dans le cadre de leur recherche *Analytics Maturity Models*, Król & Zdonek, (2020) décrivent les quatre niveaux ainsi :

- 1) **Descriptive** : L'analytique descriptive est la première source d'information pour les équipes de gestion. Ce type d'analyse permet la caractérisation des données et de répondre à la question – qu'est-ce qui s'est passé? Ce type d'analytique est utilisé dans plusieurs divisions d'une entreprise comme les opérations, la logistique, la finance et le marketing, car elle permet d'apprendre et de comprendre la réalité. Les types de technologie utilisée sont par exemple : Fichier (*Flatfile*, Excel, XML); OLAP – Traitement analytique en ligne; entrepôt de données; système de gestion de base de données relationnel.
- 2) **Diagnostic** : L'analytique diagnostique consiste à répondre à la question – pourquoi est-ce arrivé? Ce type d'analytique a pour objectif de collecter des données, de systématiser celles-ci à des intervalles de temps définis pour par la suite, les analyser et les interpréter. Ultimement, il est donc question de détecter les régularités et les différentes relations quantitatives entre les variables grâce aux données historiques. Nonobstant, vu un certain délai de traitement et d'analyse, les actions prises par rapport aux données ont un certain retard.
- 3) **Predictive** : L'analytique prédictive consiste à la modélisation ainsi qu'à la préparation de simulations et de prévisions. Il est question d'analyser les données en temps réel ainsi que les données historiques en se concentrant sur des prévisions afin d'avoir une idée de ce qui peut arriver et de répondre à la question – qu'est-ce qui va arriver? Cette méthode d'analytique a pour objectif de prédire les évènements et les différentes tendances. En d'autres mots, l'analytique prédictive apprend en se basant sur des données historiques (c.-à-d. des expériences) afin de prédire un comportement.

Dans le cadre d'un modèle prédictif, cela permet au modèle de prendre des décisions et apprendre au fur et à mesure. Par exemple : L'analytique prédictive est utilisée dans le cadre de la maintenance prévisionnelle (Maintenance 4.0) afin de prédire les pannes de machine.

- 4) Prescriptive :** L'analytique prescriptive est le dernier niveau de maturité en termes d'analytique. Celle-ci va à un niveau plus loin avec les résultats de l'analyse prédictive et effectue des recommandations sur les prévisions. En d'autres mots, l'analytique prescriptive utilise la simulation et l'apprentissage machine pour tester différents scénarios pour par la suite suggérer des actions à entreprendre et permet de répondre à la question – quelles actions doit-on entreprendre? À l'aide de l'intelligence artificielle et l'analyse de données, il est donc possible d'automatiser et d'optimiser le processus de prise de décisions et de diminuer les interactions ou interventions humaines.

Une forte capacité d'analyse et un facteur clé dans la transformation numérique d'une entreprise. Effectivement, une organisation qui souhaite être compétitive dans son secteur d'activité, mais surtout dans ce qu'on appelle l'économie numérique se doit d'investir dans des ressources humaines, mais aussi dans leurs processus et bien évidemment les technologies d'analytique de données. (Carlsson, 2018), (Pappas, Mikalef, Giannakos, Krogstie, & Lekakos, 2018). Cependant, l'obtention de forts moyens d'analyse n'est pas chose facile, car il y a beaucoup d'éléments à tenir en compte dans les requis, les enjeux et les contraintes au niveau de l'acquisition des données. Dans un contexte d'analytique appliquée à l'optimisation de la logistique, Yan et al., (2019) explique que les données de logistique doivent être collectées durant l'entièreté du processus soit du début à la fin de la chaîne en tenant en compte tous les éléments, les installations, les équipements et les outils ainsi que les opérations.

Évidemment, afin d'obtenir toutes ces informations, l'organisation ce soit d'avoir un minimum de maturité numérique et doit posséder d'important levier financier à court terme ainsi que des talents, mais le problème mit de l'avant, est qu'en réalité, les entreprises se doivent d'effectuer des investissements à long terme ainsi que durables. Bref, on peut en comprendre qu'une forte capacité d'analyse passe en premier par une acquisition de données de qualité avec des investissements à long terme et durables.

Survol de l'Intelligence artificielle (IA)

Cette partie de la revue de la littérature s'intéresse en particulier à l'application de l'intelligence artificielle dans le cadre de l'Industrie 4.0 et la transformation numérique des entreprises. Les théories sur l'intelligence artificielle sont en développement depuis déjà des décennies. L'IA peut être brièvement défini comme une machine possédant des capacités intellectuelles semblables à celles de l'homme. C'est une combinaison de technologies informatiques permettant une prise de décisions rationnelles dans des situations et des contextes complexes. Au fil des années les concepts d'apprentissage par expérience – *machine learning (ML)* et d'apprentissage profond – *deep learning (DL)* ont fait leur apparition. L'apprentissage par expérience se veut comme étant un sous-ensemble de l'IA permettant aux machines « d'apprendre » par expériences avec des données et l'apprentissage profond se veut comme étant un sous-ensemble de l'apprentissage par expérience (ML) permettant la classification et catégorisation d'informations. (Akter et al., 2020).

L'intelligence artificielle – l'apprentissage machine a pris en grande popularité depuis les dernières années (Angelov, Soares, Jiang, Arnold, & Atkinson, 2021) et est entre autres une technologie clé à la transformation numérique des entreprises vers l'Industrie 4.0. Effectivement l'AI peut-être jumelé à des outils, activités et autres technologies tels que les plans de maintenance dans le cadre de la maintenance prédictive ainsi que la simulation d'évènements discrets.

Par exemple, Krause (2020) propose de jumeler l'intelligence artificielle à un modèle de simulation d'évènements discrète tout en expliquant comment l'IA peut améliorer les DES. L'idée est que les données de résultats de la simulation d'un environnement de production alimentent et entraînent le réseau de neurones profonds – *deep neural network (DNN)* pour finalement en tirer des cédules de production optimisées. Toujours dans le cadre de la transformation numérique, Czvetkó et al., (2022) met de l'avant comment l'apprentissage machine peut jouer un rôle important dans l'amélioration du cycle de vie de gestion des processus d'affaires. Les données générées par ses processus peuvent être exploitées, analysées et explorées à l'aide de méthodes de forage de données pour découvrir par exemple des goulots d'étranglement, valider la conformité et mettre de l'avant des améliorations quant aux processus.

Effectivement, les outils, approches et méthodes de l'apprentissage machine peuvent aider à l'automatisation ainsi qu'à l'optimisation des processus grâce aux différents algorithmes. Elle permet d'identifier des modèles ainsi que des relations dans un grand volume de données hétérogènes dans l'objectif d'appuyer la prise de décision.

Sinon, Vélez Sánchez & Hurtado Cortés, (2022) expliquent comment l'apprentissage machine est utilisé dans le cadre d'un modèle de maintenance prédictive d'une pompe industrielle. Dans ce cas précis, l'objectif de l'étude est de pouvoir assigner une faute ou non-faute selon certaines conditions de l'équipement à l'aide d'un modèle de détection et de classification alimentée par des métriques. Finalement, l'idée est d'amener l'algorithme d'apprentissage machine à détecter et identifier des fautes avec un bon niveau précision.

1.6 Conclusion de la revue de littérature

La revue de littérature a permis de faire un état des lieux des différentes technologies et parties prenantes qui doivent être considérés afin de rencontrer l'objectif de ce projet qui consiste à la conception et la mise en place d'une marche à suivre pour la réalisation d'un jumeau numérique. La clarification et la compréhension de certaines notions ont permis d'identifier les dépendances et les liens entre différents concepts.

La transformation numérique des entreprises apporte son lot de complexité et d'enjeux, mais il y a beaucoup de potentiel et d'avantages reliés à ces nouvelles technologies. En effet, on remarque les grandes possibilités d'un modèle de simulation jumelé aux données de masses, la connectivité des systèmes et l'intelligence artificielle (IA) résultant ainsi en un jumeau numérique pouvant être appliquées à la chaîne d'approvisionnement.

Comme présenté dans la sous-section *Méthodologie*, l'approche recherche-action au lieu de théorique est favorisé dans le cadre de ce mémoire. Cette approche permet de rédiger un rapport sur un cas concret vécu en entreprise basée sur des connaissances acquises lors de la revue de la littérature et d'expériences. La prochaine section de ce mémoire consiste à détailler une méthodologie pour la conception et les différents éléments devant être considérés.

CHAPITRE 2

ÉLÉMENTS DE CONCEPTION ET DE MISE EN ŒUVRE

Ce chapitre a pour objectif de mettre de l'avant les différents éléments jugés importants lors du processus de conception et de mise en œuvre d'un jumeau numérique. Les différents éléments ont été identifiés à la suite d'acquis lors de la revue de la littérature ainsi que par expériences lors de la conception et le développement d'un jumeau numérique appliqué à la chaîne d'approvisionnement en collaboration avec le partenaire *Simwell Consulting & Technologies*. Le chapitre suivant se divise en trois sous-chapitres c.-à-d. : (1) Éléments de justifications à la mise en œuvre; (2) Éléments de conception et (3) Coûts, risques et enjeux. Il est important de préciser qu'il n'est pas possible de généraliser vu que cette méthodologie est la résultante d'un seul cas.

L'innovation est le processus qui permet de développer une solution nouvelle pour satisfaire un besoin. (Gardoni & Navar, 2017)

2.1 Éléments de justification à la mise en œuvre

Le développement d'une solution ou d'un produit innovant tel qu'un jumeau numérique apporte son lot de risques et amène plusieurs impacts au niveau organisationnel ainsi qu'économique et peut engendrer des coûts monétaires très importants. C'est pourquoi il est donc nécessaire de justifier les différentes opportunités auprès des acheteurs avant de passer à l'étape de conception. Premièrement, avant tout, avant même le processus de conception et de mise en œuvre, il est nécessaire de devoir convaincre les acheteurs. Effectivement, tel que l'explique Moore (2014), ce ne sont pas tous les acheteurs qui ont le même comportement envers une innovation et que 84% d'entre eux ne sont pas enclin l'adopter et aller de l'avant vu qu'il est difficile de justifier les gains.

Le concept et la technologique de jumeau numérique intéresse de plus en plus l'industrie et la technologie commencent à se démocratiser davantage.

Les types d'acheteurs tels que les *Innovators* et *Early Adopters* n'ont pas besoin d'être convaincus, car ces entreprises sont intéressées par l'innovation et les nouvelles technologies. Cependant, il est nécessaire de convaincre davantage les entreprises qui se situent dans le profil d'acheteur *Early Majority*, *Late Majority* et *Laggards*, car ceux-ci sont à la recherche d'une solution complète et qui a fait ses preuves.

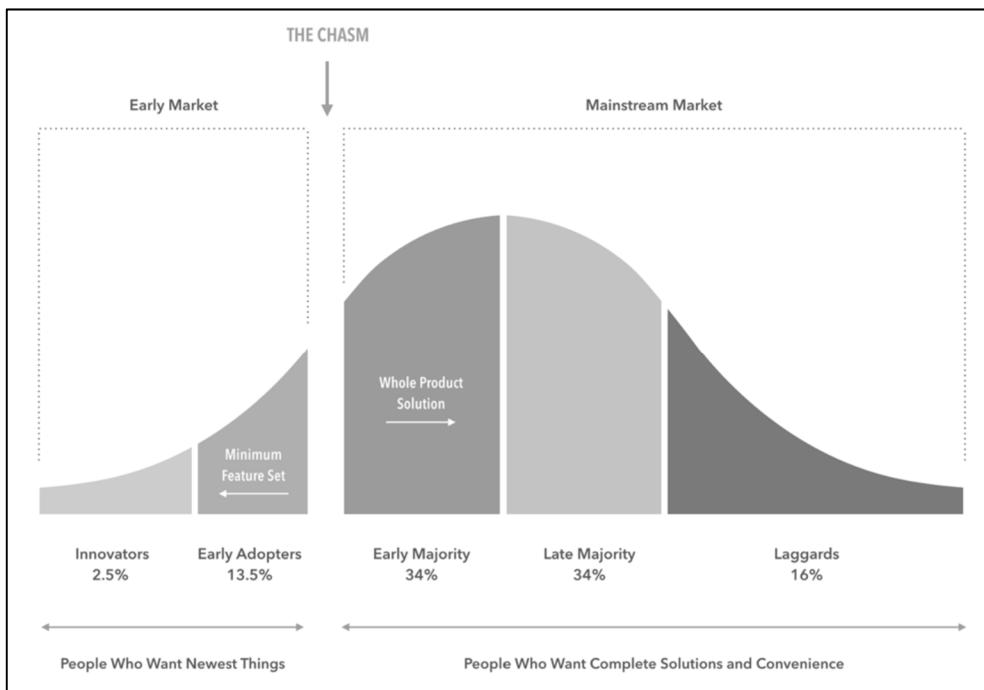


Figure 2.1 Innovation diffusion theory,
tirée de Moore (2014)

Dans ce sens, les premières questions à se poser seraient : (1) Quoi? ; (2) Comment? ; (3) Pourquoi? Le modèle Golden Circle proposé par Simon Sinek permet de bien répondre à ses trois questions.

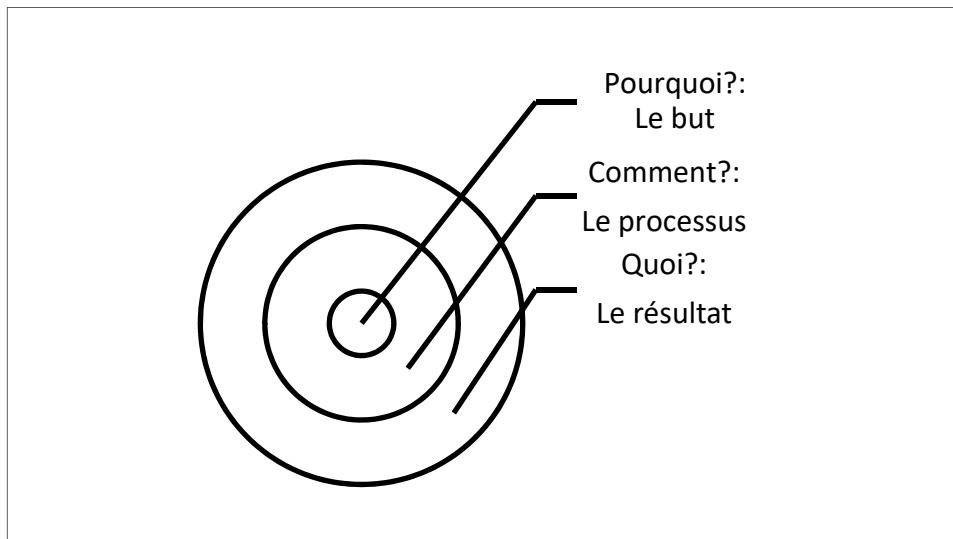


Figure 2.2 Adaptation de The "Start with Why" Golden Circle Model,
tirée de Sinek (2011)

Cette méthode est utilisée principalement pour aider les dirigeants d'entreprises à comprendre leur entreprise et de prioriser le « Pourquoi? » avant le « Quoi? », car les acheteurs n'achètent pas ce qu'une entreprise produit, mais pourquoi l'entreprise le fait. Dans un contexte de conception d'une innovation tel qu'un jumeau numérique, il est intéressant d'utiliser cette méthode comme première étape de validation auprès d'acheteurs potentiels.

Tableau 2.1 Le Pourquoi; Comment; Quoi d'un JN

SOLUTION INNOVANTE – CAS D'UN JUMEAU NUMÉRIQUE (JN)	
POURQUOI?	Quel est l'objectif d'un JN? Quelle est l'utilité d'un JN?
COMMENT?	Comment fonctionne un JN? Quelle est la différence avec les autres technologies?
QUOI?	Quel est le résultat attendu? Quel sera le ROI?

2.1.1 Opportunité organisationnelle

Premièrement, il est nécessaire de valider l'opportunité organisationnelle qu'apporte un jumeau numérique dans une organisation. Le *Business Model Canvas (BMC)* est un outil souvent utilisé en entrepreneuriat et dans le cadre de la gestion de l'innovation. Le BMC permet de décrire les différentes relations dans l'entreprise, comment celle-ci livre de la valeur ainsi que d'identifier les différentes opportunités d'affaires. En bref, ce canevas permet d'avoir une vue claire et directe de l'organisation. Dans ce sens, il vient intéressant de reprendre ce canevas et de l'utiliser afin de valider les opportunités organisationnelles que peut apporter un produit innovant dans une entreprise quelconque. Le canevas comporte les neuf sections suivantes :

- 1) Partenaires clés :** Définition sur les partenaires et fournisseurs clés de l'entreprise
- 2) Activités clés :** Définition des activités de l'entreprise, canaux de distribution, relation avec les clients de l'entreprise.
- 3) Ressources clés :** Définition des ressources clés de l'entreprise c. à d. en termes de capital humain, ressource matérielle ainsi que financière.
- 4) Propositions de valeur :** Proposition de valeur que va apporter le nouveau produit – solution de JN en termes de produits et services, gains à l'utilisation et résolution de problèmes. Cette section est détaillée davantage dans la sous-section 2.1.2 afin de valider l'opportunité technologique du produit – solution de JN.
- 5) Relation avec les clients :** Définition de la relation avec les clients incluant ce qui est attendu de ceux-ci en termes de niveau et qualité de service. Est-ce qu'une solution de JN va permettre de supporter ceci?

- 6) Canaux de distribution :** Définition des détails quant aux canaux de distribution. Définir la façon comment l'entreprise livre de la valeur à leurs clients à l'aide d'une solution de JN.
- 7) Segment clientèle :** Définition des différents types de clients. Est-ce que la solution impact ou rejoint tous les clients?
- 8) Structure des coûts :** Définitions des coûts telles que les ressources et activités de l'entreprise ainsi que les coûts les plus importants absorbés par l'entreprise. Est-ce qu'un JN peut permettre de réduire les coûts définis?
- 9) Flux de revenus :** Définition des différents revenus de l'entreprise ainsi que la contribution individuelle de chacun des flux de revenus. Est-ce qu'une solution de JN permet d'optimiser ou d'augmenter les différents flux de revenus?

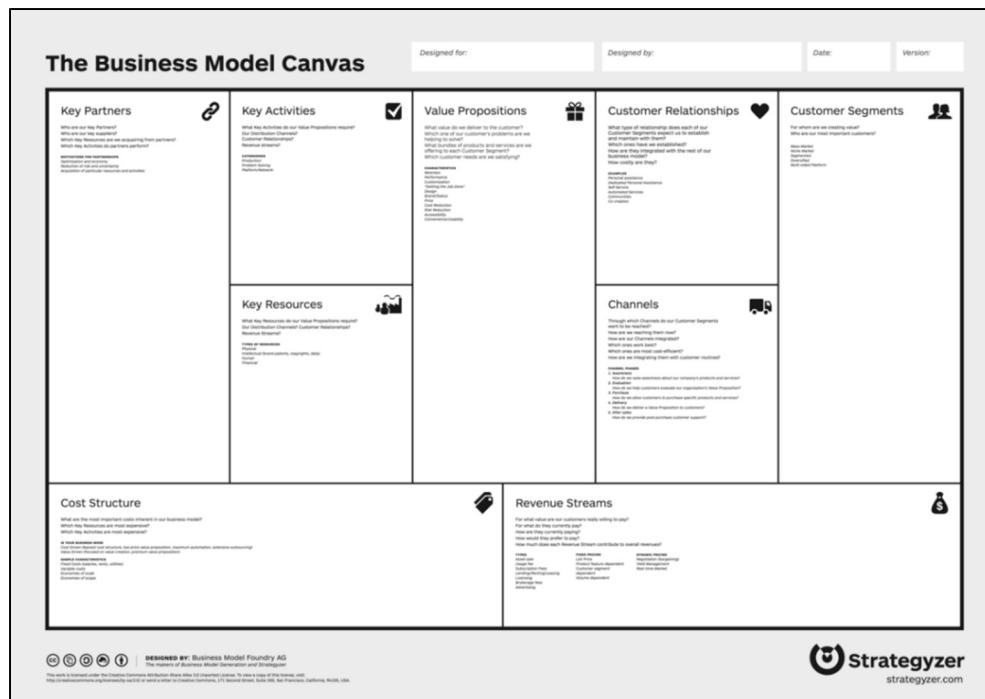


Figure 2.3 The Business Model Canvas, Strategyze

2.1.2 Opportunité technologique

Lorsqu'il est question de valider l'opportunité technologique, il est en fait question de vérifier que la solution technologique – innovante va répondre à un problème. Le canevas de proposition de valeur est un outil utilisé en marketing et en gestion de l'innovation afin de confirmer les attentes du client et d'effectuer un couplage marché-produit, stratégique, ou bien dans ce cas-ci bien précis, problèmes-solutions. (Masson & Balmana, 2017).

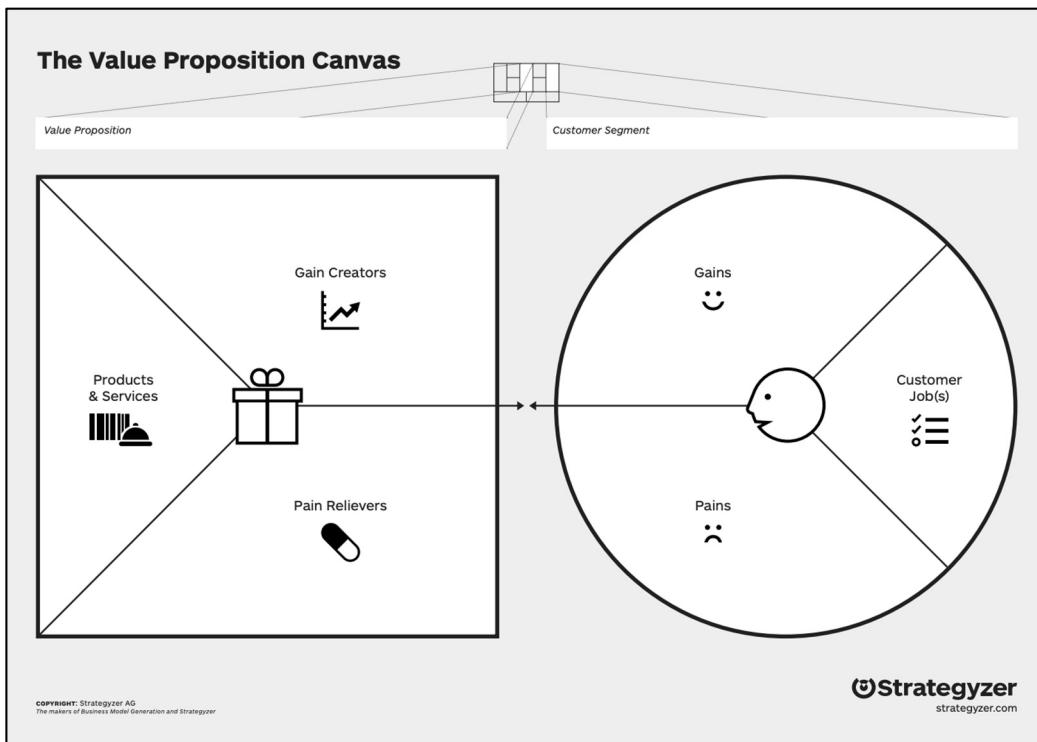


Figure 2.4 The Value Proposition Canvas, Strategyzer

1) Partie gauche du canevas - Proposition de valeur

- **Produits et services** : Cette partie permet de décrire comment la solution de jumeau numérique va aider l'entreprise dans ses opérations au niveau de sa chaîne d'approvisionnement.

- **Gain à l'utilisation :** Cette partie permet de décrire quels seront les différents gains à l'utilisation de cette nouvelle solution au niveau de l'expérience du client. Cette section a pour objectif de mettre de l'avant les éléments de la solution de JN qui vont apporter de la valeur au client.
- **Résolution des problèmes :** Cette partie permet de lister les problèmes préalablement identifiés par le client qui seront résolus par cette nouvelle solution de JN.

2) Partie droite du canevas – Profil du client

- **Attentes du client en termes de gains :** Définition de ce que le client s'attend en termes de gains de son côté quant à l'utilisation du produit ou de la solution technologique c. à d. dans ce cas-ci un Jumeau numérique. Qu'est-ce qu'un JN va-t-il lui apporter de façon concrète?
- **Problèmes du client :** Définition claire des problèmes et irritants du client.
- **Objectifs de résolution :** Définition des objectifs du client quant à l'adoption d'un JN comme solution.

2.1.3 Opportunité économique

Les innovations technologiques nécessitent des investissements majeurs en capitaux et il est primordial de convaincre les exécutifs afin de dégager le montant d'argent nécessaire à la réalisation. Il est souvent difficile de justifier l'opportunité économique d'une innovation, cependant la meilleure façon d'évaluer une innovation est le KPI du ROI – retour sur investissement.

Le retour sur investissement se calcule ainsi :

$$ROI (\%) = \frac{(Gain de l'investissement - Coût de l'investissement)}{Coût de l'investissement}$$

(2.1)

Le coût de l'investissement se veut comme l'investissement en capital nécessaire à la réalisation et le gain de l'investissement se définit soit par la réduction des différents coûts ou l'augmentation de profits. C'est grâce au gain sur l'investissement qu'il est possible de justifier de façon économique le jumeau numérique, car celui-ci apporte plusieurs avantages avec un impact financier important tel que : (1) La réduction des coûts d'investissements; (2) La réduction des coûts d'exploitation; (3) La simulation de scénarios illimités dans un environnement sans risque; (4) Une meilleure précision au niveau des prévisions; (5) Une flexibilité au niveau des opérations; (6) Une efficience opérationnelle à la hausse; (7) Apporte une aide à la décision tactique et stratégique. (Wanasinghe et al., 2020)

2.2 Éléments de conception

2.2.1 Requis de démarrage pour la conception d'un jumeau numérique

Après avoir validé et justifié les différentes opportunités organisationnelles, technologiques et économiques d'un jumeau numérique, il est nécessaire d'avoir tous les requis afin de démarrer la conception de la solution.

Trois éléments sont nécessaires afin de démarrer le développement : (1) Les problèmes à résoudre et les objectifs sont définis; (2) L'étendue et le focus de la solution sont entendus avec le client; (3) L'équipe de projet a toute l'expertise nécessaire afin de réaliser la solution.

Malgré que les problèmes à résoudre et les objectifs du client ont été définis dans l'étape axée plus au niveau de la proposition de valeur et de justifications d'opportunités, il est pertinent de refaire l'exercice et formaliser à nouveau cette information dans l'étape de conception.

Bien que la méthode - la stratégie *Spin Selling* est une méthode principalement utilisée en vente, il est intéressant d'utiliser cet outil dans un cadre de gestion de l'innovation juste avant la phase de conception ou de résolution de problème afin de formaliser toutes les informations nécessaires pour développer et mettre en place une solution ou un produit pouvant répondre aux besoins spécifiques du client.

La stratégie Spin Selling se définit en quatre étapes :

- 1) **Situation** : L'étape *Situation* a comme objectif de définir la situation de client. Il est question d'obtenir tous types d'informations et des faits sur leur situation actuelle.
- 2) **Problem** : L'étape *Problem* a pour objectif d'identifier le ou les différents problèmes ainsi que les irritants que le client cherche à résoudre.
- 3) **Implication** : L'étape *Implication* cherche à connaître la criticité du problème à résoudre pour l'entreprise.
- 4) **Need Payoff** : Finalement, cette étape permet au client de vérifier si le produit ou la solution innovante répond à son besoin. Si c'est bien le cas, il est possible d'aller de l'avant avec le projet, de définir quelle configuration est le mieux adaptée pour sa situation, la portée de la solution, de définir en détails ses besoins pour finalement mettre en place une solution technologique.

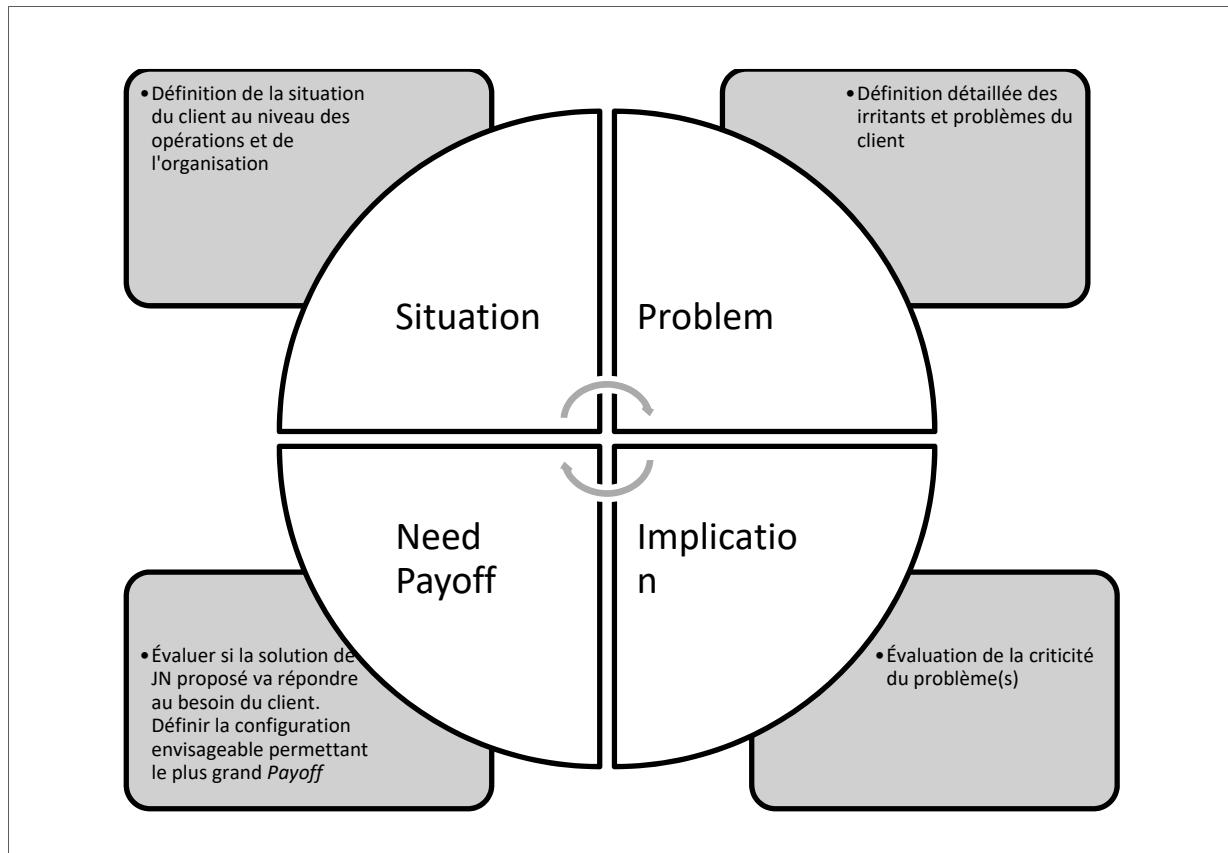


Figure 2.5 Synthèse de la méthode Spin Selling

Finalement, après avoir validé les objectifs et la portée de la solution, il est nécessaire d'avoir à sa disposition une équipe complète avec les expertises nécessaires à la réalisation. La prochaine section clarifie cet aspect.

2.2.2 Expertise requise

La conception et le développement d'une solution tel qu'un jumeau numérique nécessite l'implication de plusieurs expertises différentes dans l'équipe de projet. Sept rôles et expertises ont été identifiés et jugés nécessaires pour assurer le succès de la réalisation.

- **Ingénieur de données :** L'ingénieur de données est une partie prenante de l'équipe de développement et a comme responsabilité de mettre en place l'architecture technologique (base de données, lac de données, entrepôt de données, pipeline ETL) pouvant gérer l'extraction et la transformation complexe des données ainsi qu'alimenter les outils (Simulation, BI, algorithme d'IA) afin de répondre à des besoins d'affaires spécifiques.
- **Ingénieur logiciel :** Si la solution nécessite une application mobile, web ou lourde, l'ingénieur logiciel a comme responsabilité de développer une application avec des fonctions - *features* définies selon les besoins d'affaires du client.
- **Analyste fonctionnel :** Dans l'idée que la solution nécessite une application, l'analyste fonctionnel à comme rôle d'analyser les besoins du client et de proposer des solutions fonctionnelles pour l'application qui seront par la suite développées et intégrer à l'application par l'ingénieur logiciel.
- **Scientifique des données :** Le scientifique des données est le joueur clé quant aux données d'affaires qui sont stockées dans le système. Il a une visibilité complète sur les données. Il doit bien comprend le secteur d'affaires et la problématique de l'entreprise afin de développer le modèle de données qui va le mieux répondre aux besoins de l'entreprise. De plus, celui-ci s'occupe de la préparation des données comme le nettoyage et la transformation tout en effectuant l'exploration de celles-ci.

- **Modélisateur** : Le modélisateur joue un rôle de développement et est une ressource clé qui s'occupe de concevoir le modèle de simulation répondant aux besoins et au problème à résoudre du client. Le modélisateur développe aussi des tableaux BI afin de présenter les données et de valoriser celles-ci afin de les présenter au client.
- **Responsable de la solution** : Le responsable de la solution – *Solution Owner ou bien architecte de solution* se veut comme étant la personne clé qui s'occupe de faire le lien entre le client et l'équipe de développement et s'assure de bien comprendre les besoins du client. Celui-ci a une vision d'ensemble de la solution et doit être capable de traduire les besoins du client afin de mettre en place une architecture technologique efficace et robuste qui va répondre aux besoins selon des requis fonctionnels et techniques bien précis.
- **Client** : Bien que le client ne soit pas directement impliqué dans l'équipe de développement, il joue un rôle important dans le cycle de développement, car le produit ou la solution est développé selon les besoins de celui-ci. Il est important que le client travaille en collaboration avec le responsable de la solution en communiquant efficacement ses besoins afin de permettre la livraison d'incrément performances et robustes répondant aux critères d'acceptation.

2.2.3 Contexte de prérequis dans l'entreprise – Maturité numérique

L'Industrie 4.0 se définit comme l'utilisation des technologies numériques ainsi que les données en temps réel pour aider les entreprises à la prise de décision, de leur efficacité et de leur agilité dans leurs différents processus administratifs et opérationnels. (Gamache, 2019) Cependant, afin de transiter vers l'Industrie 4.0, les entreprises doivent déjà avoir une certaine maturité numérique ou un plan d'action stratégique pour l'atteindre ainsi que des prérequis organisationnels. Dans ce sens, ceci peut donc aussi s'appliquer pour les entreprises qui ont l'intérêt de mettre en œuvre un jumeau numérique appliqué à leur chaîne d'approvisionnement vu le contexte 4.0 de la solution. Gamache (2019) propose une liste de priorité en termes de pratiques d'affaires en tenant compte de tous les processus d'affaires (Direction, Gestion TI, Comptabilité, Ventes, etc.). Les pratiques d'affaires dites essentielles qui recoupent la situation de l'étude de cas sont les suivantes : (1) Vision et Stratégie, (2) Écosystème numérique, (3) Engagement, (4) Maîtrise des outils numériques, (5) Qualité de la donnée; Tandis que les pratiques d'affaires dites prioritaires sont les suivantes : (6) Gestion du changement, (7) Agilité et Innovation, (8) Lean et Amélioration continue, (9) Cybersécurité, (10) Livraison de la donnée, (11) Personnalisation, (12) Utilisation opérationnelle de la donnée, (13) Utilisation stratégique de la donnée.

Ces priorités sont donc des facteurs de succès et doivent donc être atteintes ou en voie d'être atteintes afin de s'assurer que le projet de mise en œuvre se déroule bien. En bref, avant de démarrer une telle initiative, il est donc nécessaire que l'entreprise maîtrise ses différents processus organisationnels et opérationnels, avoir un engagement complet de sa direction, posséder un écosystème numérique, savoir maîtriser ses outils et données ainsi que la qualité de celles-ci. Afin d'avoir une idée de cette maturité numérique et l'état organisationnel et opérationnel de l'entreprise, il est pertinent de faire un audit de l'entreprise.

Tableau 2.2 Priorités et prérequis pour la mise en œuvre d'un JN,
adapté de Priorités pour le passage à l'Industrie 4.0 par Gamache (2019)

No.	Priorisation	Pratiques d'affaires	Type	Criticité
1	Essentiel	Vision et stratégie	Direction	
2		Écosystème TI (ERP, TMS, WMS, etc.)	Technologique	
3		Architecture TI	Technologique	
4		Engagement	Direction	
5		Maîtrise des outils numériques	Technologique	
6		Qualité des données	Technologique	
7	Prioritaire	Gestion du changement	Organisationnel	
8		Agilité et Innovation	Organisationnel	
9		Lean et amélioration continue	Opérationnel	
10		Cybersécurité	Technologique	
11		Livraison des données	Technologique	
12		Personnalisation (service client)	Organisationnel	
13		Utilisation opérationnelle des données	Technologique	
14		Utilisation stratégique des données	Technologique	

La criticité du requis est définie selon l'évaluation de l'impact de celui-ci. Le code de couleur suivant définit trois niveaux d'impact soit : (1) Majeur, (2) Modéré, (3) Faible. Un impact majeur est défini comme un enjeu à la réalisation, un impact modéré est défini comme un enjeu à la réalisation avec des mesures de compensations ou plan d'action tandis qu'un impact mineur comme un risque à la réalisation.

Tableau 2.3 Code de couleur

Impact	Criticité
Impact majeur	●
Impact modéré	●
Impact faible	●

2.2.4 Gestion organisationnelle et du changement

D'après les travaux de (Collerette, Schneider, & Lauzier, 2012), la pertinence pour une organisation de s'engager dans un changement quelconque est définie par trois variables : (1) La vulnérabilité de l'entreprise, (2) Les possibilités offertes par le contexte organisationnel et (3) Les obstacles présents dans le contexte organisationnel. La figure 2.6 détaille davantage ces trois variables. À priori, ces éléments ont été validés lors de la phase de justification des opportunités et des requis de démarrage.

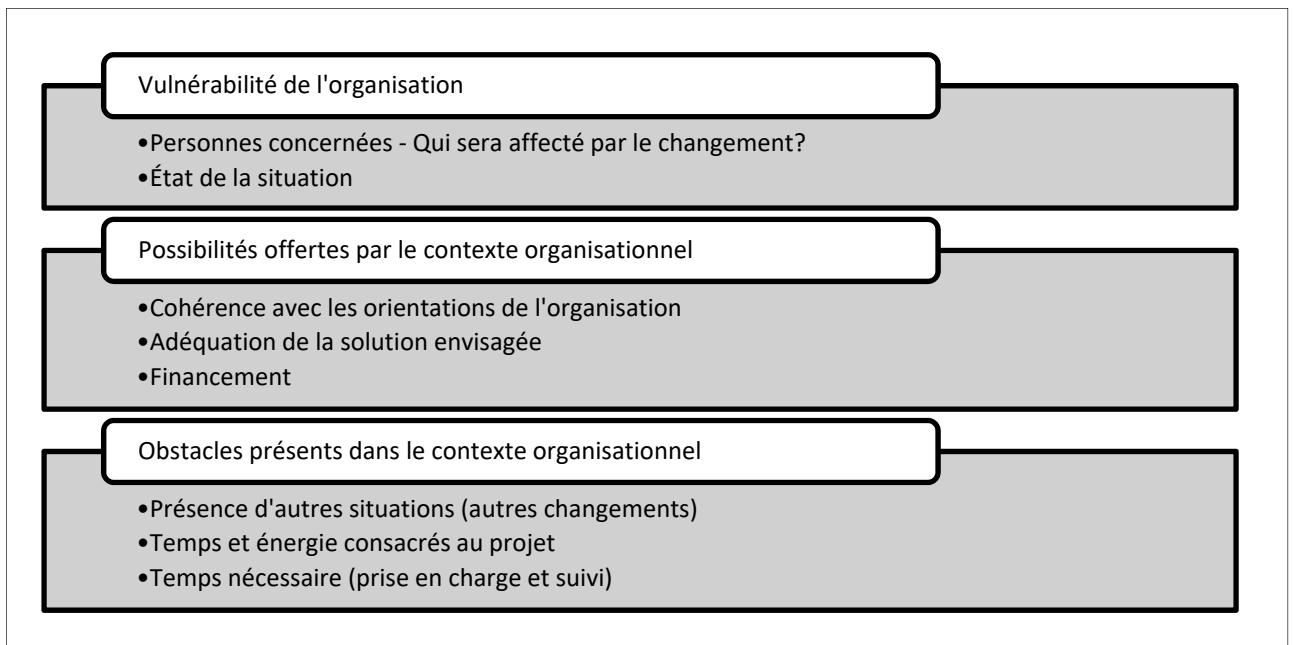


Figure 2.6 Pertinence pour l'organisation de s'engager dans un changement, adapté de Collerette et Al. (2012)

De plus, il est important de définir concrètement le changement en se demandant pourquoi celui-ci est requis et pourquoi l'entreprise doit effectuer ce changement. Cela dit, la mise en œuvre d'un jumeau numérique dans une entreprise peut se qualifier comme une amélioration radicale comme le montre le schéma de la figure 2.7

Ce type de changement apporte des améliorations importantes au niveau des processus, de la structure ou des systèmes de l'entreprise, mais nécessite plus de gestion de changement, car l'état futur est très incertain et le statu quo est inexistant.

Il est donc important de mettre en place un plan de gestion du changement ainsi qu'une stratégie afin que la livraison de la solution soit un succès.

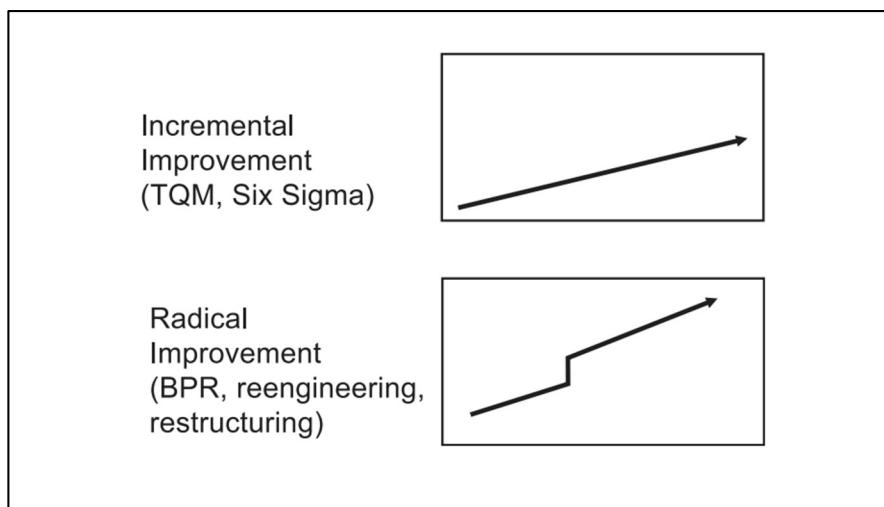


Figure 2.7 Degrés de changement,
tirée de Hiatt and Creasey (2012)

La gestion du changement est une partie très importante et souvent négligée dans la réalisation d'un projet. La gestion du changement s'effectue sur deux niveaux : (1) Individu et (2) Organisation.

1) Changements au niveau de l'individu :

Une bonne gestion du changement au niveau de l'individu passe avant tout par une bonne communication et un plan de formation solide pour bien amener le changement. Le modèle Prosci ADKAR – *Awareness, Desire, Knowledge, Ability, Reinforcement* créé par Jeff Hiatt est un gabarit souvent utilisé pour la gestion du changement individuel.

Celui-ci se découpe en 5 étapes c.a.d : (1) Prise de conscience quant au changement, (2) Désire de supporter le changement, (3) Prise en connaissance quant au changement, (4) Habilité quant au changement et (5) Amélioration en continu quant au changement.

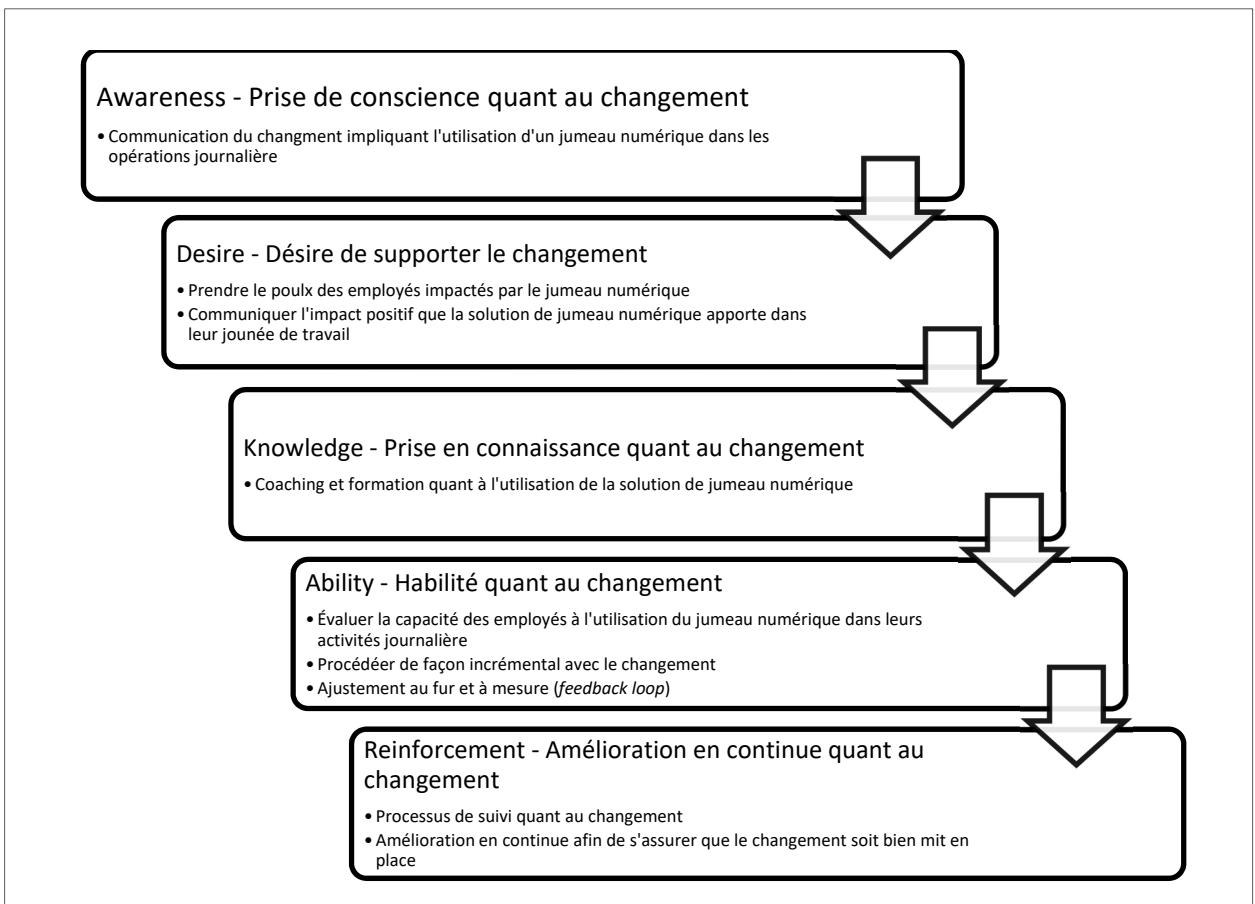


Figure 2.8 Adaptation du modèle ADKAR

2) Changements au niveau de l'organisation :

À propos des changements au niveau de l'organisation, selon (Hiatt & Creasey, 2012), il est important de détailler les éléments suivants : (i) Plan de communication; (ii) Plan de coaching et de formation; (iii) Plan de support et d'évolution de la solution; (iv) Feuille de route du commanditaire.

- **Plan de communication :** Un plan de communication doit être mis en place quant aux déploiements, modifications ou incrémentations de la solution avec des dates précises et un message clair aux personnes concernées par les changements.
- **Plan de coaching et de formation :** Par soucis de transfert de connaissances et d'une prise en charge des utilisateurs, un plan de coaching et de formation doit être mis en place à travers l'organisation afin de former adéquatement les ressources humaines qui utiliseront la solution technologique.
- **Plan de support et d'évolution :** Une solution technologique nécessite un plan de support ainsi que d'évolution. En quelques mots, tout doit être défini au sein de l'organisation quant à quelle équipe va s'occuper de l'évolution et de la façon dont celle-ci va procéder. Il est aussi nécessaire de définir comment la solution supportée et par quelle équipe tout en tenant pour acquis les différents impacts sur les opérations.
- **Feuille de route du commanditaire :** Ce genre d'initiative nécessite la pleine implication et collaboration de la gestion, donc à des fins de visibilité et de transparence, une feuille de route ainsi qu'une planification de mise en œuvre doivent être détaillées quant aux changements qui seront amenés par une solution technologique telles qu'un jumeau numérique.

2.2.5 Modèle de simulation

Dans le cadre d'un jumeau numérique appliqué à une chaîne d'approvisionnement – *supply chain digital twin*, un modèle de simulation est l'une des parties prenantes de la solution et il est nécessaire d'avoir tous les requis nécessaires pour le débuter la conception du modèle. Lors du démarrage d'un projet de simulation, l'une des premières étapes est la mise en place du document de définition fonctionnel et technique du modèle de simulation.

Le document permet de définir les différentes fonctionnalités ainsi que la portée du modèle de simulation. Les éléments suivants sont à définir dans le document :

- 1) **Objectifs du modèle** : Bien que l'objectif et la portée de la solution haut niveau du JN sont définis dans les étapes précédentes, il est important de mettre sur papier les objectifs précis du modèle de simulation. – Définition des objectifs *low-level*
- 2) **Scénarios et variables de décision** : Il est important de définir les variables de décisions – paramètres d'entrée du modèle et de décrire les différents scénarios qui seront simulés afin d'avoir une vision claire du modèle.
- 3) **Indicateurs de performance (KPI)** : Les indicateurs de performance doivent être définis en amont afin de développer le modèle en conséquence. Les données qui seront générées par le modèle de simulation seront stockées dans la base de données et ensuite exploitées via un outil comme Power BI. Il est important que ce soit défini en amont afin d'avoir des données qui ont de la valeur.

- 4) **Éléments inclus et exclus** : Afin de bien cadrer la portée de la simulation, les éléments inclus et exclus doivent être décrits afin de ne rien laisser au hasard.
- 5) **Hypothèses** : Dans tout projet de conception, des hypothèses doivent être définies. Il est nécessaire d'émettre des suppositions sur des éléments qui ne sont pas toujours clairs.
- 6) **Diagramme des processus simulés et logique de contrôle** : Le diagramme des processus simulés et la logique de contrôle permettent de définir la base sur lequel le modèle devra être conçu.
- 7) **Entités et ressources** : Les entités et ressources utilisées dans le modèle de simulation doivent être définies en amont de la conception, car ils sont une partie prenante du modèle de simulation.

2.2.6 Architecture technologique

De façon générale, l'architecture technologique qui va supporter la solution doit être définie selon le problème à résoudre. Cependant, il y a toujours un dénominateur commun. Les modèles d'architectures de gestion de données suivent le processus de traitement haut niveau suivant :

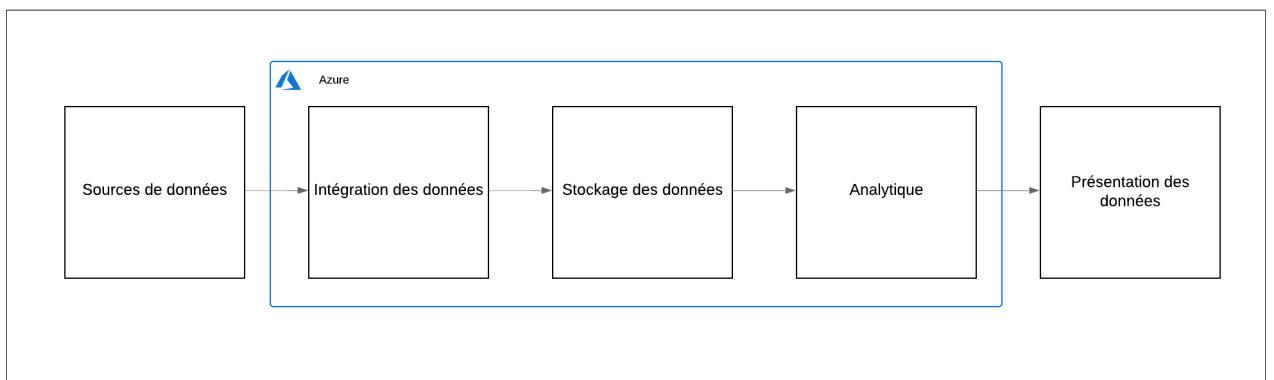


Figure 2.9 Processus haut niveau - Architecture big data pour l'analytique

Dans le cadre d'une architecture technologique devant supporter un jumeau numérique d'une chaîne d'approvisionnement, les différentes étapes du processus défini à la figure 2.9 se traduisent à l'aide du tableau 2.4. Note : Le rectangle bleu représente la zone qui est hébergée sur le *cloud*. Dans ce cas-ci le service utilisé est Azure de Microsoft.

Tableau 2.4 Composantes des étapes du processus de gestion des données

No.	Étape du processus	Détails	Composantes envisageables
1	Sources de données	Cette étape contient l'ensemble des données sources qui vont alimenter le système.	Données structurées (application, système d'affaires, ERP, CRM) et non structurées (IoT, logs, fichiers)
2	Intégration des données	Cette étape contient les composantes nécessaires pour l'ingestion et l'intégration des données sources vers l'espace de stockage dédié.	ETL, API, Service d'ingestion en temps réel
3	Stockage des données	Cette étape consiste à stocker les données collectées initialement afin d'avoir une source unifiée en vue de l'analytique.	Base de données relationnelles, Base de données NoSQL, Entrepôt de données
4	Analytique	Dans le cadre d'une solution de <i>Supply Chain Digital Twin</i> , le modèle de simulation développé avec un logiciel comme AnyLogic est la composante d'analytique. Cette étape peut aussi contenir de l'apprentissage machine ainsi qu'un service d'analytique en temps réel pour les données IoT et d'évènements.	AnyLogic, ARENA, <i>machine learning</i> , service d'analytique en temps réel
5	Présentation des données	La présentation des données consiste à utiliser les données à des fins de valorisation et de présentation en vue de décision tactique ou stratégique	PowerBI, Excel, Tableau ou autre outil de présentation, valorisation et visualisation des données (Python, R, Jupyter Notebook)

Selon la portée et le besoin de la solution, le tableau 2.5 permet d'aiguiller la conception sur les différents outils et technologies à utiliser. Le niveau de maturité de la solution est déterminé selon les critères dans la colonne « détails de maturité » qui concorde le plus à la portée et au besoin de la solution envisagée.

Tableau 2.5 Niveaux de maturité d'un JN et détails des composantes de l'architecture technologique

Niveau	Détails	Collecte des données	Ingestion	Analytique	Stockage des données	Visualisation
Niveau 0	Hors ligne	Manuel	NA	Outil de simulation (AnyLogic, ARENA)	Fichier de données externes ou données directement stocké avec le modèle de simulation	Outil de visualisation et de valorisation PowerBI, Tableau, Excel ou autres
Niveau 1	En ligne, mais n'a aucune source de données externes	Manuel	NA	Outil de simulation (AnyLogic, ARENA)	Base de données relationnelle hébergée sur le <i>cloud</i> ou <i>on-premise</i>	Outil de visualisation et de valorisation PowerBI, Tableau, Excel ou autres
Niveau 2	En ligne et peut gérer l'ingestion par <i>batch</i>	Donnés structuré – application, systèmes d'affaires, ERP, CRM et autres	ETL, API	Outil de simulation (AnyLogic, ARENA)	Base de données relationnelle hébergée sur le <i>cloud</i>	Outil de visualisation et de valorisation PowerBI, Tableau, Excel ou autres
Niveau 3	En ligne et peut gérer l'ingestion par <i>batch</i> et en <i>temps réel</i>	Donnés structuré – application, systèmes d'affaires, ERP, CRM et autres, Données non structurées – Données IoT et d'évènements	ETL, API, Service d'ingestion en temps réel	Outil de simulation (AnyLogic, ARENA)	Base de données relationnelle ou non relationnelle hébergée sur le <i>cloud</i>	Outil de visualisation et de valorisation PowerBI, Tableau, Excel ou autres

Tableau 2.5 Niveau de maturité d'un JN et détails des composantes
de l'architecture technologique (Suite)

Niveau	Détails	Collecte des données	Ingestion	Analytique	Stockage des données	Visualisation
Niveau 4	En ligne et peut gérer l'ingestion par <i>batch</i> et en <i>temps réel</i> avec un service dédié selon les besoins d'accès aux données (application en temps réel, rapport BI sur les données en temps réel, etc.)	Donnés structuré – application, systèmes d'affaires, ERP, CRM et autres, Données non structurées – Données IoT et d'évènements	ETL, API, Service d'ingestion en temps réel	Outil de simulation d'ingestion (AnyLogic, ARENA)	Base de données relationnelle ou non relationnelle hébergée sur le <i>cloud</i>	Outil de visualisation et de valorisation PowerBI, Tableau, Excel ou autres

En suivant la logique du tableau 2.5 de référence quant aux différents niveaux de maturité, l'architecture technologique proposée afin de supporter un Jumeau numérique au plus haut niveau de maturité est la suivante :

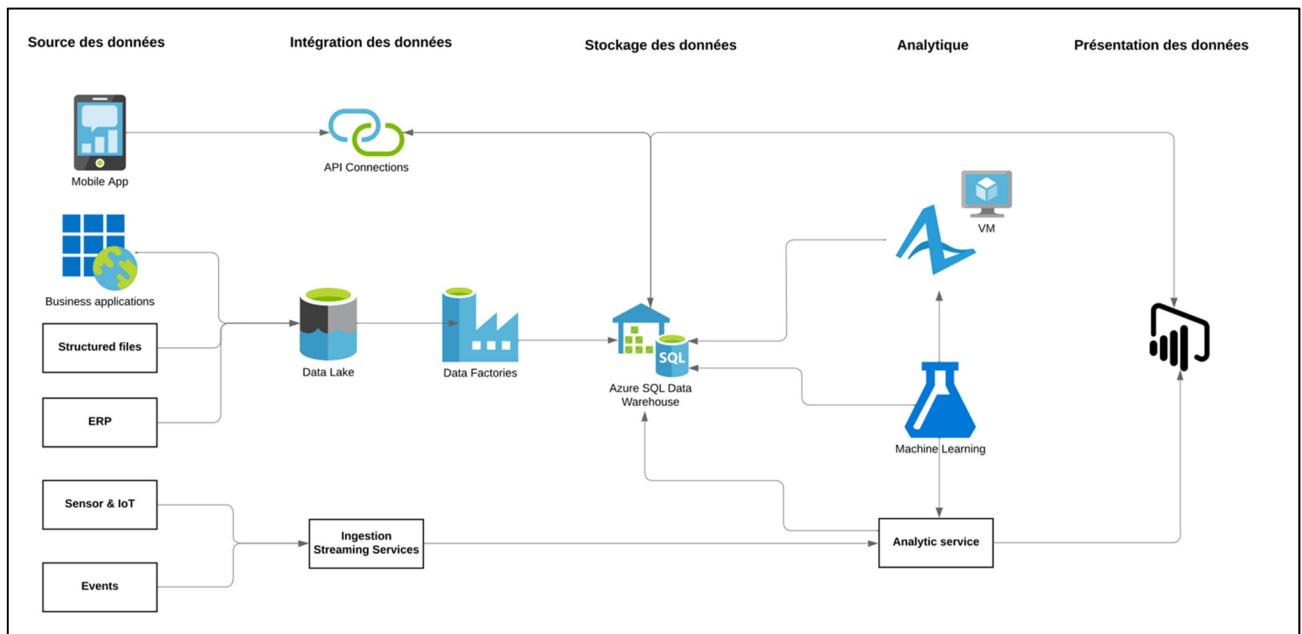


Figure 2.10 Architecture cloud d'un JN d'une chaîne d'approvisionnement basé sur un modèle de simulation – Niveau de maturité 4

Il est nécessaire de mentionner ici que la solution PaaS (Platform as a Service) Azure Digital Twins de Microsoft n'a pas été considéré lors de la conception, car la portée de la solution, la complexité et le contexte d'affaires mis de l'avant dans cette étude ne concordent pas avec l'offre du fournisseur. Dans tous les cas, un haut niveau de customisation serait nécessaire.

2.2.7 Développement de produit et Produit minimum viable (MVP)

Le développement d'un produit ou d'une solution nécessite plusieurs cycles d'expérimentation ainsi que d'apprentissage, vu que cela apporte beaucoup d'incertitudes. (Poirier, 2017) Dans ce sens, il est nécessaire de diminuer les temps de cycle de développement et de procéder de façon itérative ainsi qu'incrémentale au niveau de la conception et du développement. Le concept de produit minimum viable – ou en anglais *minimum viable product* devient donc très pertinent. Dans un contexte d'amélioration continue des produits et processus, la méthode de gestion et de conception PDCA (*plan-do-check-adjust*) ou communément appelée roue de Deming est souvent utilisée. L'approche itérative permet de rapprocher à chaque itération l'équipe de son objectif. Du côté du développement applicatif, une méthodologie similaire est utilisée. La méthodologie agile est favorisée, car celle-ci fonctionne aussi de façon itérative et a comme objectif de livrer de la valeur très rapidement, d'incrémenter le produit à chaque itération avec de nouvelles fonctionnalités et d'inclure le client dans le cycle de développement.

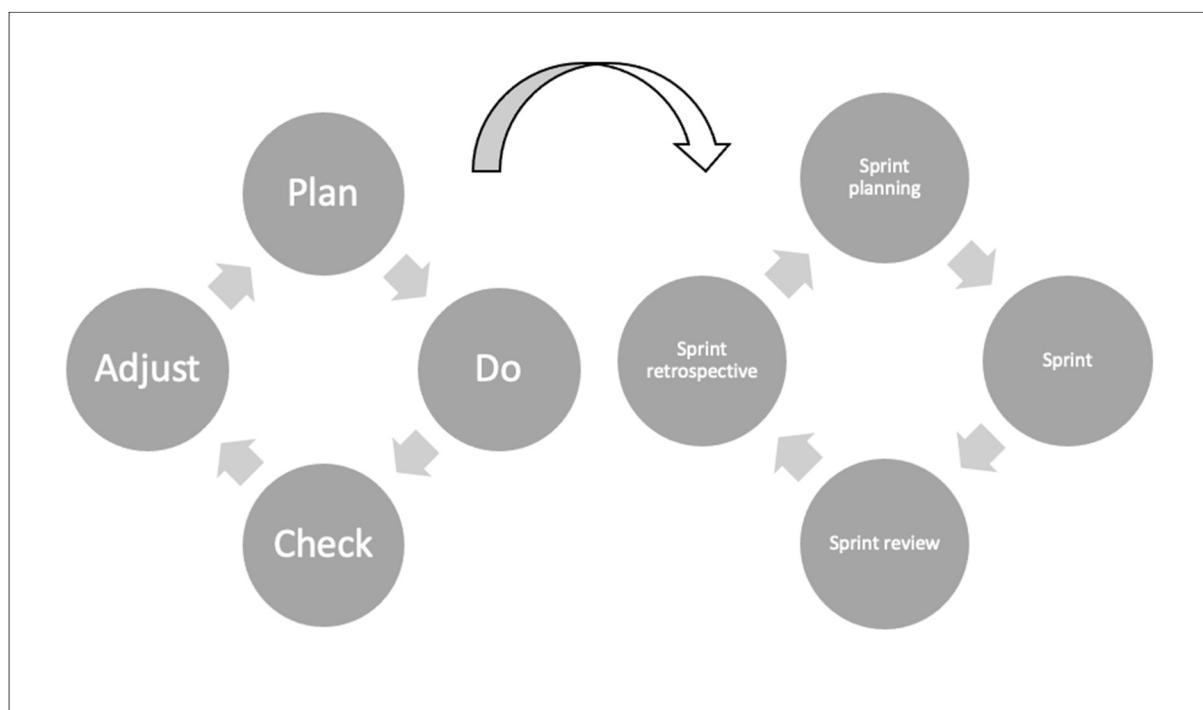


Figure 2.11 Cycle de développement PDCA vs. Agile

Dans ce sens, le développement agile dans un contexte d'innovation est une approche très intéressante afin de mettre en place un produit ou une solution répondant aux besoins du client et de diminuer les temps de cycles. En découplant le projet en plusieurs petits projets (sprint), il est possible de rapidement livrer de la valeur et de diminuer le risque. L'idée est de débuter la conception avec un produit minimum viable, répondant à des requis minimums déterminés par le client.

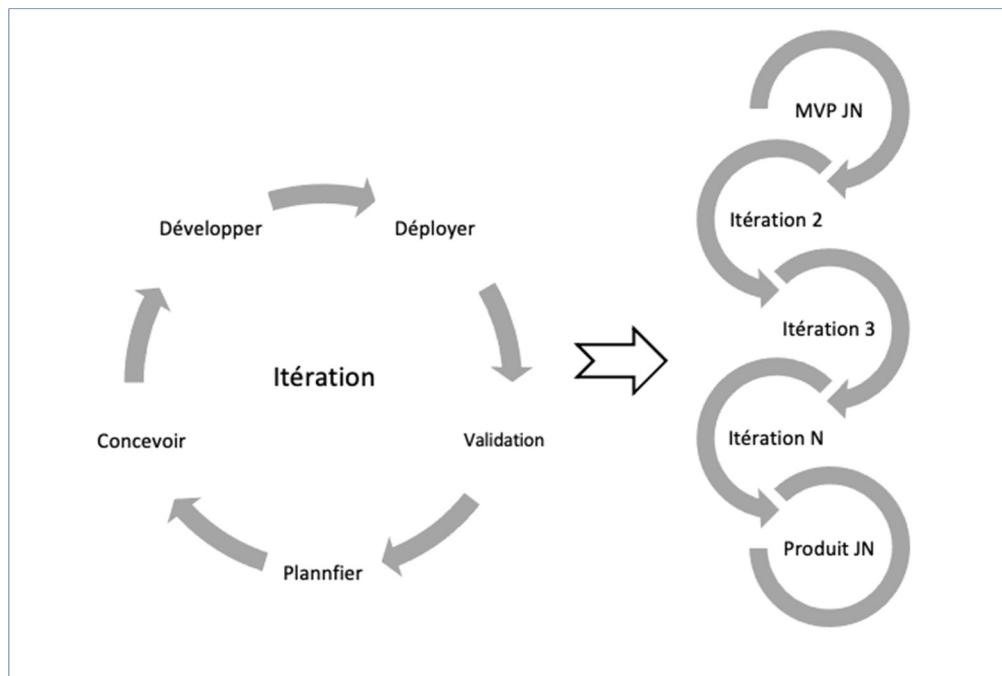


Figure 2.12 Cycle itératif de développement

Dans le cadre du développement d'un jumeau numérique appliquée à une chaîne d'approvisionnement, le développement devrait être effectué en deux phases. Vu l'application sur une chaîne d'approvisionnement, l'idée est de segmenter le déploiement en zone distincte telle qu'une province, région ou secteur tout dépendamment de l'ampleur de la solution.

Cela dit, premièrement, il serait question de définir le produit minimum viable répondant au besoin du client, de l'utiliser dans une région déterminée et par la suite de débuter des cycles d'itérations avec un déploiement en continu, d'effectuer des validations et ajustements avec les utilisateurs finaux.

Selon les bonnes pratiques en agilité, lorsque la solution atteint les points suivants : (1) La solution répond au du besoin client, (2) la solution est robuste et (3) le client est confortable, il est question de débuter une nouvelle boucle d'itération et d'incrémentation. Il est question de débuter les ajustements de la solution pour les autres zones et de planifier un déploiement ainsi que la mise à l'échelle vu une augmentation du volume de données et de la demande en technologique. Lors de la livraison de la solution dans toutes les autres zones, l'objectif serait atteint. Bien évidemment, la solution évolue dans le temps et de nouvelles fonctionnalités seront ajoutées selon les besoins du client. La solution va continuer de s'améliorer et de changer.

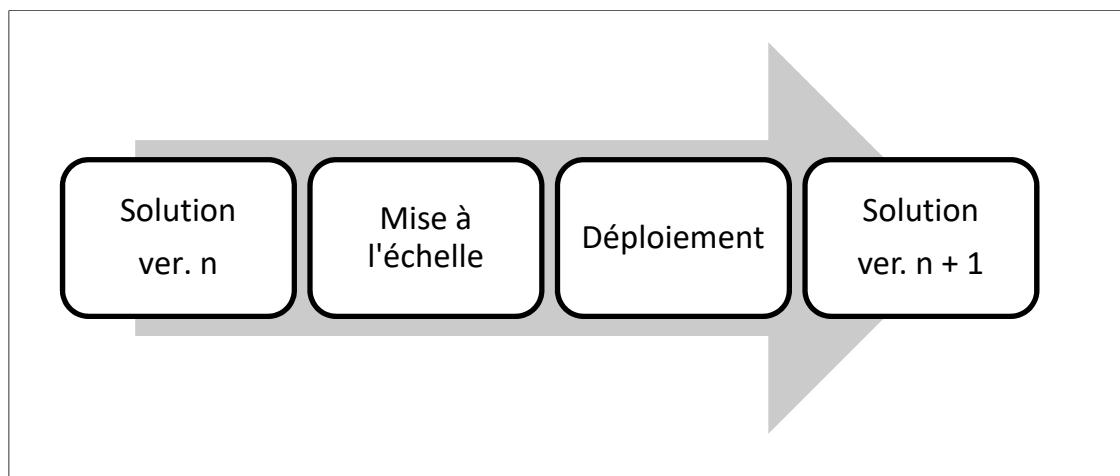


Figure 2.13 Processus d'évolution de la solution – produit JN

2.2.8 Documentation technique

La documentation technique et fonctionnelle est une étape essentielle du génie logiciel et celle-ci est très utile pour la communication d'informations et le transfert de connaissances quant aux spécifications de conception d'une solution.

Bien qu'un jumeau numérique (JN) ne relève pas uniquement du génie logiciel, ce type de solution combine plusieurs types d'expertises et il est important de documenter le tout afin d'avoir une information claire, à jour, pertinente et qu'il sera possible de communiquer pour la viabilité et la pérennité de la solution.

Une solution de jumeau numérique conçu comme dans le cadre de ce projet nécessite de documenter les parties suivantes: (1) Ingénierie de données, (2) Ingénierie logicielle et (3) Modèle de simulation. La documentation technique d'un jumeau numérique se veut comme un document où l'on retrouve toutes les informations autant de l'architecture technologique, la cybersécurité, la technologie applicative et les fonctionnalités ainsi que les informations pertinentes du modèle de simulation. Les sections suivantes doivent se retrouver dans la documentation :

- 1. Portée de la solution :** Il est nécessaire de mentionner la portée de solution, l'objectif de celle-ci, les limites, ce qui est inclus et exclu.
- 2. Vue d'ensemble des processus :** Cette section permet de détailler tous les différents processus de la solution technologique. C'est important d'avoir le plus de détails pour l'évolution de la solution, mais aussi d'avoir une trace des éléments de conception et des procédures.

3. **Détails sur la technologie de la solution:** Toujours dans un souci de transfert de connaissances, il est important de détailler les technologies, langages et outils qui ont été utilisés dans le cadre de la conception.
4. **Détails sur l'architecture du système :** Les diagrammes sur l'architecture du système (architecture logicielle, architecture de données, architecture TI) ainsi que les informations complémentaires sont importants et essentiels à la documentation afin de bien comprendre comment les différentes parties prenantes interagissent entre elles.
5. **Spécifications du magasin de données:** Tout dépendamment du type de magasin de données utilisé (base de données relationnel, base de données non relationnelle – NoSQL, entrepôt de données, il est important de documenter les informations pertinentes vu que cette instance est une partie prenante de solution. Il est question de spécifier les détails quant à l'architecture du magasin de données, schéma ainsi que toutes autres informations sur les données, les utilisateurs et la sécurité.
6. **Détails sur le modèle de simulation :** Les détails en lien avec le modèle de simulation reprend plusieurs informations de la DFT – Définition fonctionnelle et technique, mais l'idée est de présenter l'information et de bonifier celle-ci dans un contexte de transfert de connaissance vu que la simulation fait partie d'une solution complète et ultimement un produit. Il est pertinent d'ajouter tous les détails au niveau du développement afin qu'un développeur qui reprend le dossier puisse continuer de développer et de faire évoluer le modèle. Par exemple, ajouter un diagramme de *workflow* quant à la logique des différentes fonctions présentes dans le modèle ainsi que des commentaires et explications.

2.3 Coûts, risques et enjeux

2.3.1 Structure des coûts et des connaissances

Un produit ou une solution innovante apporte son lot de risque et d'incertitudes, cependant dans une situation comme celle-ci, il est possible d'estimer les coûts que va engendrer la conception et le développement. Telle que le proposent Blackburn-Grenon, Abran, Rioux, & Wong, (2021) dans le cadre de l'estimation d'économie engendrée par une solution d'IA dans un contexte d'Industrie 4.0, la méthode d'estimation en trois points peut être utilisée. C'est une méthode en gestion de projet bien connu, et une parmi d'autres qui permet de calculer le coût ou l'effort prévu moyen. Vu le contexte d'innovation d'un jumeau numérique, cette méthode est appropriée, car elle améliore la précision des estimations et réduit le risque. La méthode utilise les trois variables suivantes :

- 1) Estimation optimiste (O)
- 2) Estimation pessimiste (P)
- 3) Estimation réaliste (M)

À l'aide de ses trois variables, il est possible de calculer une distribution bêta grâce à une moyenne pondérée. La formule afin de calculer la valeur moyenne d'une tâche est la suivante :

$$Effort \text{ prévu} = \beta = \frac{O + 4 \times M + P}{6} \cdot 1 \quad (2.2)$$

Dans un contexte de gestion de projet, il est intéressant de connaître l'écart type des tâches afin de déterminer les limites minimums et maximums ainsi que les probabilités.

$$\text{Écart type} = \sigma = \frac{P - O}{6} \cdot 1 \quad (2.3)$$

Finalement, l'effort total d'un projet et le coût se traduit en effectuant la somme de toutes les moyennes et en multipliant par un taux horaire. Les formules sont les suivantes :

$$\text{Effort prévu total} = \sum \beta \quad (2.4)$$

$$\text{Coût envisagé du projet} = \sum \beta \times \omega \mid \omega = \text{taux horaire} \quad (2.5)$$

2.3.2 Risque de l'innovation

Avant la réalisation, il est important de dresser un portait global des risques possibles afin de pouvoir les évaluer et de mettre en place un plan d'action en vue de les réduire si nécessaire. En innovation, il y a six familles de risques qui doivent être considérés : (1) technologiques, (2) commerciaux, (3) réglementaires et juridiques, (4) sociaux, (5) financiers et (6) humains. (Masson & Balmana, 2017)

1. **Risques technologiques** : Le développement d'un jumeau numérique apporte son lot de risques technologiques vu que celui-ci est considéré comme une solution innovante. Dans ce sens, vu qu'une solution innovante signifie qu'il est question de développer quelque chose d'unique, il est nécessaire de cibler et d'évaluer les différents risques technologiques comme la faisabilité technologique, la viabilité de la solution et la connaissance technique requise.

2. **Risques commerciaux** : Il est nécessaire d'évaluer les risques commerciaux liés au jumeau numérique. Effectivement, l'impossibilité de commercialiser la solution, l'emprise de la concurrence directe et l'impact de la concurrence indirect doivent être tenus en compte dans le registre des risques et enjeux.
3. **Risques réglementaires et juridiques** : Des brevets, propriétés intellectuelles ou réglementations du marché quant au concept, la solution ou même la technologique peuvent impacter la solution et mettre une entrave à la conception.
4. **Risques sociaux** : Il est nécessaire de valider l'impact social et environnemental du jumeau numérique ainsi que de s'assurer que celui-ci se veut accepter par la société. Bien que les risques sociaux puissent sembler mineurs ou inexistant pour certains types de produits, la validation de l'impact social est une démarche nécessaire dans le développement d'un produit ou d'une solution innovante. (Masson & Balmana, 2017)
5. **Risques financiers** : Le capital nécessaire à la réalisation de la solution joue un rôle important, car c'est avec l'argent que les ressources matérielles et humaines sont payées. Un budget insuffisant afin de réaliser la portée de la solution va empêcher d'avoir une solution complète et un dépassement de budget peut aussi impacter la portée et la qualité de la solution.

6. Risques humains : La connaissance technique (connaissance explicite) d'un projet est un risque technologique, mais les connaissances (connaissance tacite) du capital humain sont tout aussi importantes à la réalisation du projet. Il est important d'avoir un plan afin de diminuer les risques si la perte de cette connaissance arrive durant la conception ou après la livraison. Malgré qu'une ressource humaine peut être remplacée, la perte de la connaissance humaine peut impacter grandement la qualité et l'échéancier. Il est donc nécessaire d'effectuer une bonne gestion de ce risque afin de limiter les impacts sur les facteurs de succès du projet. L'impact sur les utilisateurs finaux de la solution doit aussi être considéré. Ce type d'innovation apporte un lot de changement important dans la façon de faire des utilisateurs, il est donc nécessaire de considérer ce risque et de mettre des mesures de mitigation comme un plan de gestion de changement solide à l'aide d'une méthode comme présentée à la section 2.2.4 de ce chapitre.

Tableau 2.6 Échelle des risques de l'innovation appliquée à un Jumeau numérique

Criticité	Technologiques	Commerciaux	Réglementaires	Sociaux	Financiers	Humain
Critique	La technologie existante ne permet pas de concevoir le JN selon la portée défini. Le produit n'est pas viable.	Il n'est pas possible de commercialiser la vente de la solution	La solution de JN ne peut être développée vu une question de brevet ou de réglementation de marché et il n'est pas envisageable de concevoir la solution	La solution de JN n'a pas d'acceptabilité sociale ce qui freine le projet dans son ensemble	Il n'y a pas de capital d'investit afin de développer la solution	Les ressources humaines qui contribuent au projet n'ont pas les connaissances techniques suffisantes afin de réaliser la solution technologique. Il n'est donc pas possible de livrer le jumeau numérique
Important	La technologie existante permet de concevoir la solution de JN, mais ne permet pas une efficacité optimale afin de répondre à la portée de la solution	La concurrence directe possède la majorité des parts de marché quant à ce type de solution ce qui complexifie la commercialisation de la solution	La solution ne peut être développée vu qu'il y a une propriété intellectuelle, cependant il est envisageable d'obtenir une licence d'utilisation	La solution de JN a une acceptabilité sociale partielle, mais il y a un impact majeur sur la société	Le capital investi est insuffisant afin de combler la portée complète de la solution	La connaissance du capital humain a quitté le projet en plein milieu de la réalisation

Criticité	Technologiques	Commerciaux	Réglementaires	Sociaux	Financiers	Humain
Modéré	La technologie existante permet de concevoir la solution de JN, mais permet une efficacité partielle afin de répondre à la portée de la solution	La concurrence directe développe une solution similaire de JN avec la même technologie que celle développée	La solution ne peut être développée vu qu'il y a une propriété intellectuelle, cependant une solution de contournement du brevet est envisageable	La solution de JN a une acceptabilité sociale partielle, mais il y a un impact modéré sur la société	Un dépassement important du capital devant être investi selon la portée de la solution, car il y a une complexité technologique	La connaissance du capital humain a quitté le projet vers la fin du projet ou après la livraison
Faible	La technologie existante permet de concevoir la solution de JN, mais une adaptation et prise en connaissance de la technologie doit être effectuée par l'équipe de développement	La concurrence indirecte a un impact sur la commercialisation de la solution	Certains règlements du marché limitent les détails de conception de la solution de JN	La solution de JN a une acceptabilité sociale partielle, mais il y a un impact mineur sur la société	Un dépassement du capital devant être investi vu des délais dans la conception	La connaissance du capital humain a quitté le projet, mais d'autres ressources ont reçu une formation afin de transférer les connaissances

Tableau 2.6 Échelle des risques de l'innovation appliquée à un Jumeau numérique (Suite)

2.3.3 Enjeux de mise en œuvre d'un jumeau numérique

Dès le début du projet, lors de la conception, certains enjeux sont déjà existants et ceux-ci doivent être adressés rapidement par l'équipe de développement. Il est très important de mettre en place un plan d'action pour la résolution des enjeux ainsi qu'un plan afin de mitiger l'impact sur la solution. Il est nécessaire de prendre connaissance de ses enjeux dès le début afin d'en tenir compte lors du design. Les enjeux sont technologiques et principalement au niveau de l'architecture. Effectivement un jumeau numérique d'une chaîne d'approvisionnement tel que proposé dans ce mémoire n'est pas simplement un modèle de simulation, mais un ensemble de plusieurs technologies résultant ainsi en un système complexe avec plusieurs parties prenantes tout aussi importantes l'une que l'autre. Il y a cinq principaux enjeux observés : (1) Standardisation, ingestion et stockage des données; (2) Exactitude et validité des données; (3) Propriété et partage des données; (4) Cybersécurité de la solution technologique; (5) Mise à l'échelle de l'architecture.

Les enjeux (1) et (2), sont des enjeux au niveau des données. La solution repose essentiellement sur les données en entrée qui alimente le modèle de simulation, mais aussi sur celles qui sont à la sortie, car c'est grâce à celles-ci que la solution génère de la valeur. C'est pourquoi il est important, mais surtout nécessaire d'avoir des systèmes solides permettant une standardisation des données, une ingestion robuste de celles-ci et un stockage efficace. De plus, il est important d'être en mesure d'assurer une qualité de données en matière d'exactitude. Plusieurs règles de validations et de contrôles ainsi que des plans de tests pour certifier les données doivent être mis en place dès le début.

Les enjeux (3) et (4), sont des enjeux au niveau de la sécurité des données ainsi que la sécurité de la solution technologique. Il est important d'effectuer une classification des données qui se retrouvent dans la base de données en détaillant le type d'information et le niveau de sensibilité.

Effectivement, il est nécessaire de mettre des mesures de sécurité, de contrôles et d'accès à des données confidentiel comme tout type d'information de contact, le nom ainsi que des informations d'identifications. À propos de la cybersécurité de la solution, dans le meilleur des mondes, il est intéressant de concevoir une solution en mode *secure by design* c.-à-d. que la sécurité est incluse dans le processus de conception et de développement et non réalisée après le déploiement afin de limiter les impacts de cyberattaques sur la solution. Toute instance comme une application mobile ou bien une base de données doivent être sécuritaires. Par exemple : Communication encryptée (ex. : TLS 1.2), *Whitelisting* des adresses IP, règles au niveau des coupes feux, plan et sauvegarde en cas de *failover*, gestion des identités et accès via par exemple un outil comme Active Directory de Microsoft. Une mauvaise gestion de la sécurité peut permettre à des cyberattaques de corrompre les données ou bien d'affecter la solution de ce qui cause des précédents directs sur l'entreprise et peut résulter par une interruption du service ou de la production tout en fonction de la situation.

Finalement, le dernier enjeu (5) à considérer est la mise à l'échelle de l'architecture technologique. Effectivement, il est crucial d'évaluer la façon comment la solution sera mise à l'échelle. Plus le volume des données est important, plus cela impacte les ressources qui sont utilisées sur la solution. Cela dit, à un moment ou un autre, le volume des données sera tellement important que la capacité de l'architecture atteindra son maximum et devra être rehaussée. C'est donc pourquoi il est important de prévoir un plan de mise à l'échelle afin de ne pas impacter le niveau de service.

CHAPITRE 3

CAS PRATIQUE : JUMEAU NUMÉRIQUE APPLIQUÉ À UNE CHAÎNE D'APPROVISIONNEMENT

Le chapitre suivant a pour objectif d'appliquer la stratégie de conception et de mise en œuvre discutées au chapitre précédent à un cas pratique et de présenter les éléments qui ont bien été et ceux qui ont nécessité de l'amélioration. Le chapitre a aussi comme but de relever les différents éléments dans un souci de rétrospective et d'amélioration. Quant au chapitre 4, celui-ci a pour objectif d'ouvrir la discussion par rapport aux différents éléments. Le cas sous étude est un projet réalisé avec le partenaire *Simwell Consulting & Technologies* pour l'un de leurs clients. Le projet était de réaliser un jumeau numérique d'une chaîne d'approvisionnement basé sur un modèle de simulation AnyLogic.

3.1 Mise en contexte du cas sous étude

Avant tout, vu le contexte du projet de recherche, il est pertinent d'effectuer une mise en contexte de la situation quant au cas sous étude. Effectivement, lors du début de ce projet de recherche, plusieurs étapes du projet (étude de cas) de jumeau numérique d'une chaîne d'approvisionnement basé sur un modèle de simulation contracté par *Simwell Consulting & Technologies* étaient déjà réalisées, planifiées, en conception ou bien en négociation avec le client. Cette réalité a donc engendré des contraintes et limites au projet de recherche. Il est ici question de contraintes de conception au niveau de la technologie utilisée pour l'entrepôt de données et de limitations quant à l'architecture. Démarrer un projet de recherche-action avec des éléments déjà défini amène son lot de défis. Les différents points seront davantage détaillés lors de l'application de la stratégie de conception et de mise en œuvre dans les sous-chapitres du chapitre actuel.

3.2 Éléments de justifications à la mise en œuvre

En premier lieu, le client en question dans le cadre du cas sous étude n'a pas eu besoin d'être convaincu quant à l'achat de la solution innovante. Celui-ci fait partie des 15% du marché qui représente le *early market* et ce type de client s'intéresse principalement à la technologie innovante et non à une solution stable, bien établie et qui a fait ses preuves. Le client avait plusieurs problématiques et cherchait à transformer celles-ci en opportunité à l'aide d'une solution innovante qui répondrait ultimement à leurs besoins.

Vu le contexte du projet de recherche expliqué dans la section précédente, il est n'est pas possible de détailler les parties : (1) Opportunité organisationnelle, (2) Opportunité technologique et (3) Opportunité économique. Cependant, en réalité, les différentes opportunités ont été justifiées avant le début de la conception.

3.3 Éléments de conception

3.3.1 Requis de démarrage pour la conception d'un jumeau numérique

- **Problèmes à résoudre et les objectifs :** Les problèmes à résoudre ainsi que les objectifs ont bien été défini avant le démarrage de la conception. Le tout a été détaillé de façon claire dans de la documentation à cet effet. L'entreprise partenaire a exprimé son désir de transformer ses irritants en opportunité d'innovation.
- **Étendue et focus de la solution technologique :** L'étendue et le focus de la solution technologique ont bien été définis initialement avec l'entreprise partenaire. Le tout a été détaillé dans le contrat. Le projet se découpe en deux grandes phases. La première phase consistait au développement d'un modèle de simulation avec plusieurs scénarios définis ainsi qu'un modèle prédictif, tandis que la deuxième phase était de faire évoluer le modèle de simulation et de le rendre opérationnel à titre de jumeau numérique.

Cependant, lors de la réalisation, vu le contexte d'innovation et l'incertitude, plusieurs nouveaux éléments, fonctionnalités et contraintes d'affaires ont dû être considérés et ajoutés à la portée du projet en cours.

- **Mise en place de l'équipe de projet**

Tableau 3.1 Mise en place de l'équipe de projet

Expertise	Cas pratique
Ingénieur de données	Un ingénieur de données a participé au projet pour la conception et le développement de la base de données et des pipelines ETL.
Ingénieur logiciel	Un ingénieur logiciel a participé au projet afin de développer l'application mobile. Deux développeurs ont travaillé sur l'application du développement et par la suite lors de la phase d'évolution, il y avait uniquement un développeur.
Analyste fonctionnel	Aucun analyste fonctionnel n'a participé au projet afin d'analyser les besoins du client et de proposer des solutions fonctionnelles pour l'application mobile.
Scientifique des données	Un scientifique des données a collaboré au projet afin de développer un modèle de données pour répondre au besoin du client.
Modélisateur	Un modélisateur de simulation a collaboré au projet afin de développer un modèle de simulation pour le <i>Supply Chain Digital Twin</i>
Responsable de la solution - Architecte	Un architecte de données a participé au projet afin de développer une vision d'ensemble quant à une solution technologique qui répond au besoin du client.
Client	Le client a collaboré au projet, mais celui-ci n'était pas suffisamment impliqué dans le cycle de développement de la solution et il a exercé à l'occasion de la difficulté à exprimer ses besoins et ainsi que priorisé celles-ci.

3.3.2 Contexte de prérequis dans l'entreprise – Maturité de l'entreprise

Tableau 3.2 Évaluation de la maturité de l'entreprise

Pratiques d'affaires	Criticité	Éval.	Détails
Vision et stratégie		Oui	La direction de l'entreprise a une vision ainsi qu'une stratégie.
Écosystème TI (ERP, TMS, WMS, etc.)		Oui	L'entreprise possède un écosystème TI. Celle-ci utilise un ERP afin de soutenir ses opérations.
Architecture TI		Non	L'entreprise ne possède pas d'architecture TI afin d'intégrer et de supporter la solution technologique de JN. Une architecture complète doit être développée afin de supporter le JN.
Engagement		Oui	La direction de l'entreprise a un engagement total dans la réalisation de la mise en œuvre d'un jumeau numérique de leur chaîne d'approvisionnement.
Maîtrise des outils numériques		Partiel	L'entreprise a une maîtrise modérée des outils numériques.
Qualité des données		Non	L'entreprise a de la difficulté à assurer une qualité de données constante.
Gestion du changement		Non	L'entreprise n'a pas d'équipe ou de processus de gestion du changement établie.
Agilité et Innovation		Oui	L'entreprise est agile et l'innovation est considérée au niveau de la gestion.
Lean et amélioration continue		Oui	L'entreprise effectue de l'amélioration continue et utilise les concepts lean dans ses opérations.

Tableau 3.2 Évaluation de la maturité de l'entreprise (Suite)

Pratiques d'affaires	Criticité	Éval.	Détails
Cybersécurité		Non	L'entreprise n'a pas de base en termes de cybersécurité, le tout doit être mis en place dans le cadre de la solution technologique.
Livraison des données		Oui	L'entreprise est capable d'effectuer la livraison de données, mais à de la difficulté en termes de gestion de ses données
Personnalisation (service client)		Oui	L'entreprise a un service client d'établi.
Utilisation opérationnelle des données		Oui	L'entreprise utilise les données dans un cadre opérationnel.
Utilisation stratégique des données		Oui	L'entreprise fait une utilisation stratégique de ses données à l'aide d'outil de valorisation et de présentation.

3.3.3 Gestion organisationnelle et du changement

- **Changements au niveau de l'individu :**

Tableau 3.3 Changements au niveau de l'individu

Changement au niveau de l'individu	Cas pratique
Prise de conscience quant au changement	L'équipe de réalisation a travaillé avec des « champions » parmi les utilisateurs de l'application afin de leur montrer l'application ainsi que les impacts qui seront engendrés par le changement. L'application mobile a été testée en parallèle de leur système existant. Les commentaires ont été recueillis à des fins de modifications et d'ajustement. Ce cycle a été effectué plusieurs fois. Le changement a été communiqué, mais pas d'explication en amont a été fourni aux utilisateurs.
Désire de supporter le changement	Le pouls des champions a été pris à propos du changement et leurs commentaires ont été recueillis. L'impact positif que va amener la solution a été communiqué aux employés.
Prise en connaissance quant au changement	Un coaching et de la formation ont été offerts aux utilisateurs, mais le changement a été imposé aux utilisateurs à la dernière minute vu le contexte que ceux qui utilisent l'application sont des contracteurs.
Habilité quant au changement	Un feedback loop a été mis en place afin de recueillir les commentaires et d'ajuster au fur et à mesure. La capacité des employés à utiliser l'application mobile a été évaluée afin de s'assurer que le changement s'effectue de la bonne manière.
Amélioration en continu quant au changement	L'amélioration continue du changement ainsi que le suivi ont été effectués en continu lors de rétrospectives.

- **Changements au niveau de l'organisation**

Tableau 3.4 Changement au niveau de l'organisation

Changement au niveau de l'organisation	Cas pratique
Plan de communication	Un plan de communication a été mis en place pour les différentes phases du projet par l'équipe de réalisation.
Plan de coaching et de formation	Il y a eu du coaching et de la formation de la part de l'entreprise (commanditaire) et de l'équipe de réalisation quant au jumeau numérique, mais aucun plan formel n'a été détaillé, ce qui a impacté la qualité du coaching et de la formation.
Plan de support et d'évolution	Un plan de support et d'évolution a été mis en place, mais à tort c.à.d. que le plan a été mis en place à la suite du changement.
Feuille de route du commanditaire	Une feuille de route claire a été mise en place détaillant les différents changements afin d'être entièrement transparente avec le commanditaire et d'avoir sa pleine collaboration

3.3.4 Modèle de simulation

Tableau 3.5 Modèle de simulation

Requis de démarrage	Cas pratique
Objectif du modèle	Les objectifs du modèle ont été définis initialement lors des objectifs globaux de la solution technologique.
Scénarios et variables de décision	Le modèle de simulation n'a pas de scénarios, car les paramètres changent automatiquement à cause de la base de données et du modèle de prédiction.
Indicateurs de performance KPI	Les KPI ont été déterminés avec l'entreprise partenaire. Le <i>Data Scientist</i> a développé un modèle de données afin d'obtenir les bonnes données pour alimenter les KPI.
Éléments inclus et exclus	Les éléments inclus et exclus ont été déterminés dans le document de définition fonctionnel et technique.
Hypothèses	Les hypothèses ont été déterminées dans le contrat au préalable.
Diagramme des processus simulés et logique de contrôle	Un diagramme des processus simulés et la logique de contrôle ont été définis, mais ont évolué plusieurs fois durant la réalisation vu le contexte d'innovation, car le JN est une technologie nichée.
Entités et ressources	Les entités et ressources ont été déterminées dans le document de définition fonctionnel et technique

3.3.5 Architecture technologique

L'architecture technologique du jumeau numérique conçu et développé dans le cadre du cas pratique est illustrée par la figure 3.1. Note : Le logo qui ressemble à un « A » représente le modèle de simulation.

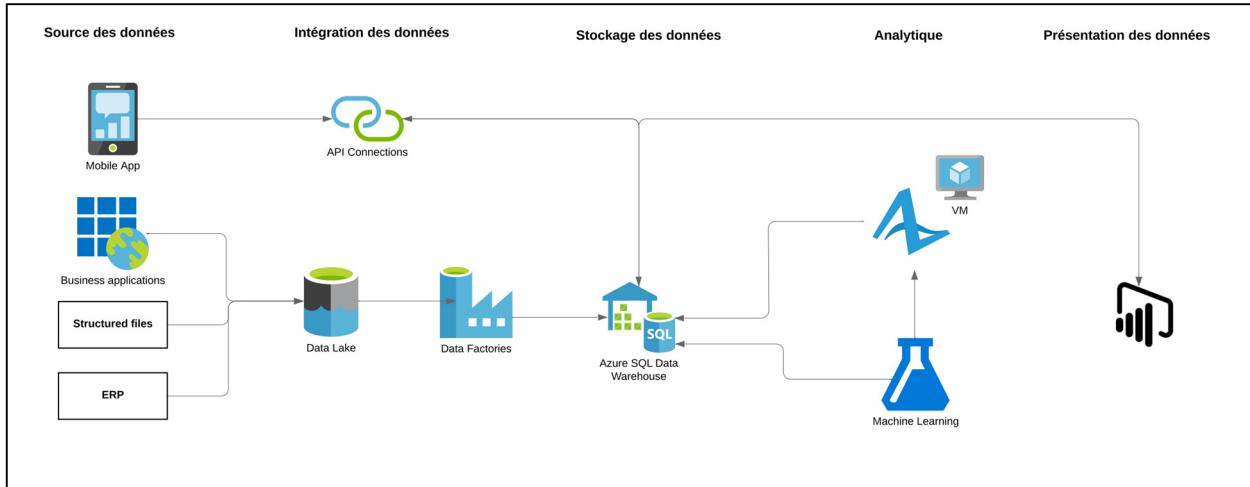


Figure 3.1 Architecture technologique du JN – Cas sous étude

L'architecture technologique à bien 5 étapes de traitement soit : (1) Sources de données; (2) Intégration des données; (3) Stockage des données; (4) Analytique et (5) Présentation des données. Premièrement, la solution a comme source de données, une application mobile, des applications d'affaires, des fichiers structurés et un ERP. En second pour l'intégration des données, il y a un API afin de faire communiquer l'application mobile à l'entrepôt de données et il y a un lac de données ainsi que des pipelines ETL (*Data Factories*) servant à titre d'espace de *staging* et d'intégration des données au système. Ensuite, il y a un entrepôt de données SQL servant à titre de stockage des données.

Quant à l'étape d'Analytique, il y a un modèle de simulation AnyLogic connecté directement au magasin de données ainsi qu'une composante d'apprentissage machine développée en Python. La composante de ML, est un modèle par renforcement ce qui permet à la solution de faire de l'analytique prescriptive. Finalement, pour l'étape de présentation des données, un rapport PowerBI est connecté sur le magasin de données.

L'architecture technologique présentée à la figure 3.1 est une résultante de la portée changeante, de phases d'évolution, de négociations et d'aléas du projet.

En se référant à la grille de niveaux de maturité d'un JN présenté à la section 2.1.6, la conclusion est que le jumeau numérique développé dans le cadre du cas sous étude est un jumeau numérique de niveau 2. La discussion quant à l'architecture et les possibilités d'améliorations et d'évolution sera abordée dans le chapitre suivant.

Tableau 3.6 Niveau de maturité du JN

Niveau de maturité	Détails	Collecte	Ingestion	Analytique	Stockage	Visualisation
Niveau 2	En ligne et peut gérer l'ingestion par <i>batch</i>	Donnés structuré – application, systèmes d'affaires, ERP, CRM et autres	ETL, API	Outil de simulation (AnyLogic, ARENA)	Base de données relationnelle hébergée sur le <i>cloud</i>	Outil de visualisation et de valorisation PowerBI, Tableau, Excel ou autres

3.3.6 Développement de produit et Produit minimum viable (MVP)

Tableau 3.7 Développement du produit et MVP

Éléments	Cas pratique
Définition du Produit minimum viable	Dans le cadre du cas sous étude, un produit minimum viable a été déterminé avec l'entreprise partenaire contenant uniquement les fonctionnalités nécessaires à son utilisation, et ce dans l'objectif de rapidement livrer de la valeur.
Incrémantation itérative de la solution ou du produit	À la suite de la livraison du MVP, plusieurs incrémentations de la solution ont été effectuées afin de livrer de nouvelles fonctionnalités, d'améliorer la solution et de corriger des éléments.
Planification par sprint	Une planification par sprint a été utilisée lors de la réalisation du projet, cependant l'entreprise partenaire avait de la difficulté à bien exprimer ses besoins et de prioriser ceux-ci ce qui causait des irritants lors de la planification.
Mise à l'échelle et déploiement progressif	Vu que la solution a une portée pancanadienne, il y a eu plusieurs déploiements et une mise à l'échelle de la solution a été effectuée au fur et à mesure. Une mise à l'échelle progressive de la solution a permis de diminuer les risques et a permis une adaptation plus facile pour les utilisateurs finaux.

3.3.7 Documentation technique

Tableau 3.8 Documentation technique

Documentation technique	Cas pratique
Portée de la solution	La portée de la solution globale est adéquatement décrite dans la documentation technique.
Vue d'ensemble des processus	Les processus fonctionnels de l'application mobile ont été détaillés, mais pas les autres processus présents dans la solution c.-à-d., pipelines ETL, Outil d'apprentissage machine, modèle de simulation, processus (trigger) sur mesure de la base de données.
Détails sur la technologie de la solution	Les détails sur la technologie utilisée pour l'application mobile ainsi que la base de données ont été détaillés dans la documentation technique, mais il n'y a aucune spécification en termes de solution – produit.
Détails sur l'architecture du système (JN)	Un diagramme d'architecture de la solution globale a été conçu, mais les détails sont inexistantes.
Spécifications du magasin de données	Les spécifications de la base de données ont été décrites et annexées au document technique global. Les spécifications incluent le schéma de la base de données, la définition des rôles et accès, le modèle de sécurité, les détails des différentes tables et l'architecture globale.
Détails sur le modèle de simulation	Les détails sur la définition fonctionnelle et technique ont été définis au début du projet, mais n'ont pas été mis à jour à la suite des changements effectués lors de la réalisation. Il n'existe pas de document technique sur les détails de développement du modèle de simulation AnyLogic et aucun détail n'est présent dans le document technique global.

3.4 Coûts, risques et enjeux

3.4.1 Évaluation des coûts, gains et ROI

Comme le montre la figure 2.10, de façon haut niveau, les grands livrables qui compose un *Supply Chain Digital Twin* en termes de développement sont les suivants : (1) Développement applicatif, (2) API, (3) Lac de données, (4) Service d'ingestion en temps réel, (5) Pipelines ETL, (6) Entrepôt de données, (7) Modèle de simulation, (8) Apprentissage machine, (9) Service d'analytique et (10) Tableau BI. Dans un souci de simplifier la démarche d'évaluation des coûts, la figure 3.2 utilise les mêmes livrables. La figure 3.2 représente les efforts optimistes, réalistes et pessimistes du cas sous étude et est une résultante de la portée et de la réalité du projet. Ceci n'empêche pas que les efforts présentés à la figure 3.2 puissent servir de base pour de futures évaluations afin d'avoir une idée de haut niveau.

Livrables	Optimiste	Réaliste	Pessimiste	Moyenne pondérée	Coût par livrable	Écart type
Développement applicatif	1000	1500	2500	1583.3	\$ 237,495.00	250
API	200	400	600	400	\$ 60,000.00	66.67
Lac de données	10	20	30	20	\$ 3,000.00	3.33
Service d'ingestion en temps réel	0	0	0	0	\$ -	0
Pipelines ETL	100	200	400	216.67	\$ 32,500.50	50
Entrepôt de données	200	400	600	400	\$ 60,000.00	67
Modèle de simulation	300	500	700	500	\$ 75,000.00	66.67
Apprentissage machine	200	300	500	316.67	\$ 47,500.50	50
Service d'analytique	0	0	0	0	\$ -	0
Tableau BI	60	100	200	110	\$ 16,500.00	23.33
Erreur standard du projet total	285.29					
Estimation total des efforts (Heures)	3547					
Taux horaire	\$ 150.00					
Coût total du projet	\$ 531,996.00					

Intervalle de confiance	Écart type	Estimation inférieure	Estimation supérieure
Intervalle de confiance de 68%	1 écart type	3261.35 Heures	3831.93 Heures
Intervalle de confiance de 95%	2 écart type	2976.06 Heures	4117.22 Heures
Intervalle de confiance de 99%	3 écart type	2690.77 Heures	4402.51 Heures

Figure 3.2 Calcul des coûts

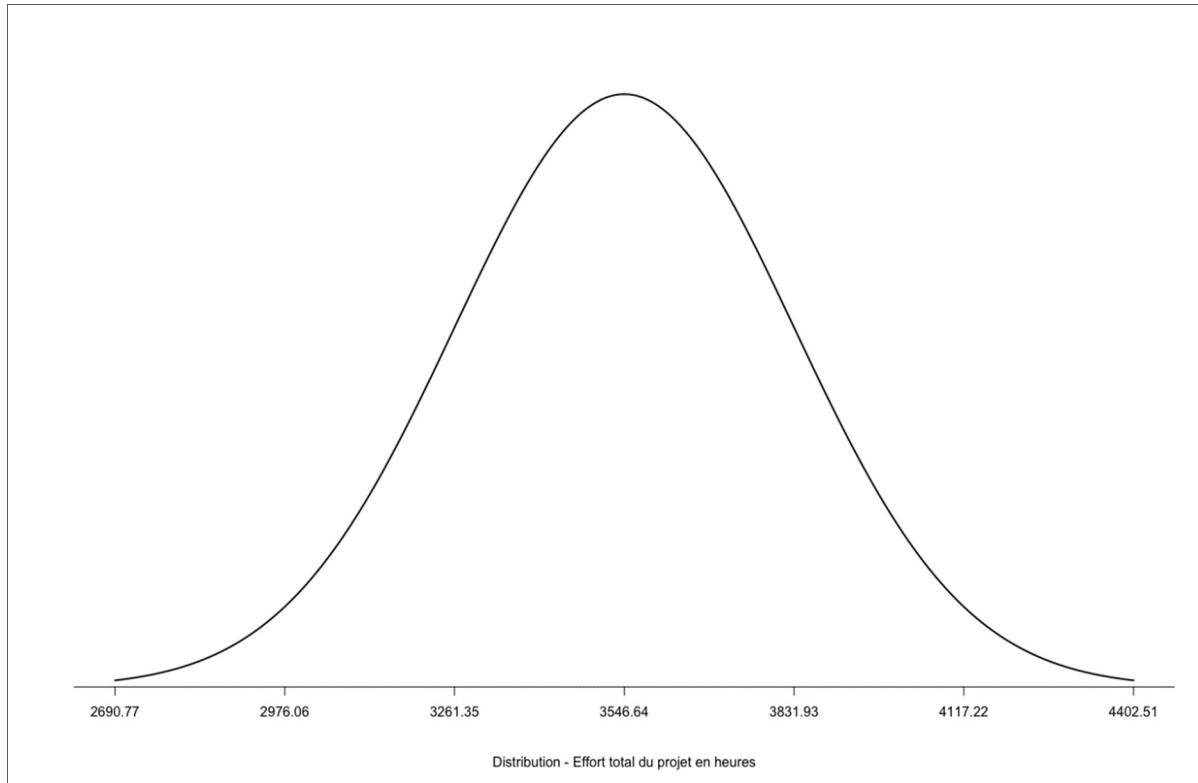


Figure 3.3 Distribution des coûts

Par souci de confidentialité, le taux horaire de 150\$/h utilisé dans les calculs est fictif, mais réaliste selon le contexte du projet.

Exemple d'évaluation d'efforts pour l'entrepôt de données:

$$Efforts envisagé pour la BD = \beta = \frac{180h + 4 \times 360h + 600h}{6} \cdot 1 = 370 \text{ heures}$$

$$\text{Écart type} = \sigma = \frac{600h - 180h}{6} \cdot 1 = 70$$

$$\text{Coût de développement} = \beta \times \omega \mid \omega = \text{taux horaire} = \frac{150\$}{h}$$

$$\text{Coût de développement de l'entrepôt de données} = 370h \times \frac{150\$}{h} = 60\,000\$$$

Dans ce cas précis et selon la portée de la solution technologique, le coût total envisagé du projet est de 532k\$. Le coût de réalisation afin de développer la solution n'est pas complètement absorbé par le partenaire d'affaires vu certaines circonstances contractuelles. Le calcul du ROI dans ce cas-ci est de démontrer qu'il y a un certain retour sur investissement de ce genre d'innovation et l'investissement en vaut la peine, mais bien entendu ça ne reflète pas exactement la réalité.

Selon les évaluations effectuées avec le partenaire d'affaires, les gains apportés par la solution sont évalués à 400k\$ pour la première année et des économies annuelles pour les prochaines années d'au moins 500k\$ par année. La nouvelle solution innovante apporte un gain d'efficience significatif, c.-à-d. que l'entreprise effectue moins de transport, mais plus de ramassage. La solution permet aussi une aide à la décision ainsi qu'une précision sur les prédictions. Il est évalué que l'entreprise va sauver environ 100k\$ / camion / année et la solution n'est toujours pas complètement déployée.

Année	Coût à amortir	Gain	Delta	ROI
1	\$ 531,996.00	\$ 400,000.00	\$ (131,996.00)	-33%
2	\$ 131,996.00	\$ 500,000.00	\$ 368,004.00	74%
3	\$ -	\$ 500,000.00	\$ 500,000.00	100%
4	\$ -	\$ 500,000.00	\$ 500,000.00	100%
5	\$ -	\$ 500,000.00	\$ 500,000.00	100%

Figure 3.4 ROI et amortissement des coûts

Exemple de calcul du ROI :

$$ROI 1er année (\%) = \frac{(400k\$ - 532k\$)}{532k\$} = -33\%$$

Bien que le ROI soit négatif à la première année, il est intéressant de constater un ROI de 74% et un *payback* dès la deuxième année, ainsi que des économies nettes d'environ 0.5 M\$ dès la troisième année d'utilisation de la solution technologique. Malgré l'incertitude et le contexte d'innovation technologique, il est confortable de dire que ce type de solution permet un retour sur investissement et que l'investissement nécessaire est justifié vu les gains annuels.

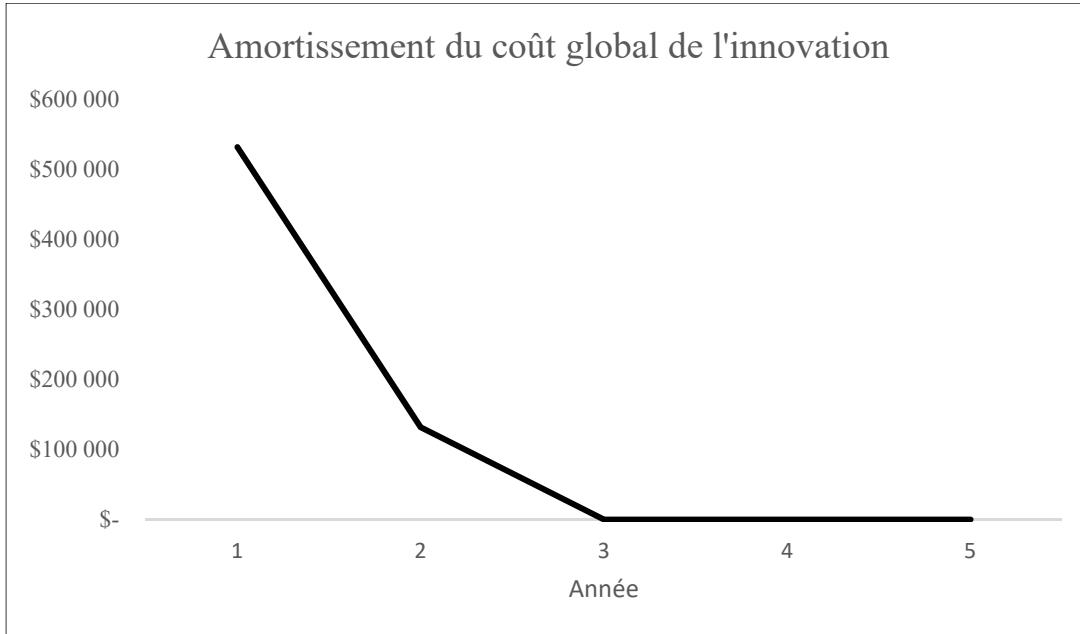


Figure 3.5 Amortissement des coûts

3.4.2 Évaluation des risques

La figure 3.6 correspond à l'évaluation des risques du cas sous étude. La grille est un couplage Criticité-Probabilité. Dans le cadre du cas sous étude, les risques commerciaux, réglementaires et sociaux ont peu ou pas d'impact tandis que les risques financiers, humains et technologiques ont un impact significatif. Dans le cadre du cas sous étude, effectivement, les risques qui ont été priorisés sont les risques technologiques, financiers et humains vu leur plus grand impact.

En général, une bonne gestion des risques a été effectuée et des plans de mitigation pour les risques élevés ont été mis de l'avant afin de diminuer les impacts sur la livraison de la solution technologique

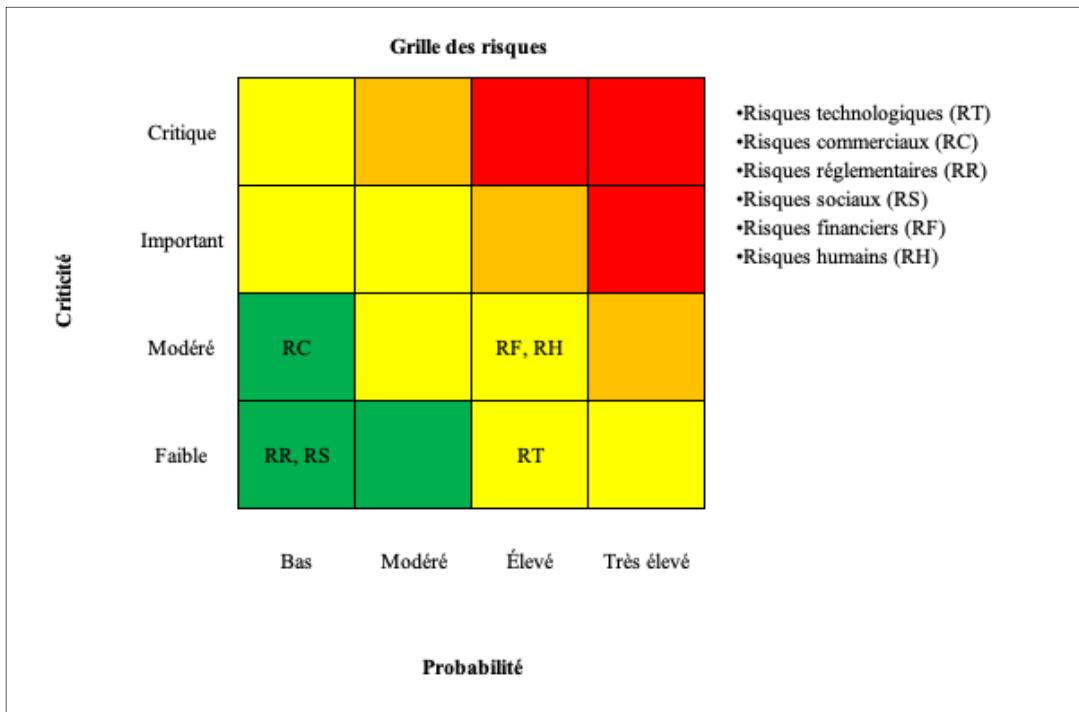


Figure 3.6 Grille des risques

Tableau 3.9 Évaluation des risques

Risques	Cas pratique – détails des risques	Évaluation de la probabilité
Technologiques	La technologie existante permet de concevoir la solution de JN, mais une adaptation et prise en connaissance de la technologie doit être effectuée par l'équipe de développement.	Vu la technologie de pointe de l'innovation, le niveau d'incertitude plutôt élevé ainsi que plusieurs inconnus, la probabilité des risques technologiques est évalué à éléver dans le cadre du cas sous étude
Commerciaux	La concurrence directe développe une solution similaire de JN avec la même technologie que celle développée.	Ce risque est évalué à bas en termes de probabilité. Malgré qu'il y ait une possibilité que la concurrence directe travaille sur une solution semblable, ça n'apporte aucun impact sur la réalisation et la livraison de l'innovation.
Réglementaires	Certains règlements du marché limitent les détails de conception de la solution de JN.	Aucun impact n'est envisagé au niveau réglementaire donc la probabilité est évaluée à basse dans le cadre du cas sous étude.
Sociaux	La solution de JN a une acceptabilité sociale partielle, mais il y a un impact mineur sur la société.	Aucun impact n'est envisagé au niveau des risques social, donc la probabilité est évaluée à basse dans le cadre du cas sous étude.
Financiers	Un dépassement important du capital devant être investi selon la portée de la solution vu la complexité technologique.	Vu la technologie de pointe de l'innovation, le niveau d'incertitude plutôt élevé ainsi que plusieurs inconnus, la probabilité des risques financiers est évalué à éléver dans le cadre du cas sous étude
Humains	La connaissance du capital humain a quitté le projet vers la fin du projet ou après la livraison.	Vu le contexte que l'équipe de réalisation agit à titre de consultant et que le marché du travail est très compétitif, la probabilité des risques humains est évaluée à éléver dans le cadre du cas sous étude.

3.4.3 Évaluation des enjeux

Tableau 3.10 Évaluation des enjeux

Enjeux	Plan d'action	Détails
Standardisation, ingestion et stockage des données	Partiel	Un plan d'action partiel a été mis en place afin de résoudre quelques enjeux. Un plan d'action pour l'ingestion et le stockage efficace des données a été inclus dans les détails de conception des pipelines ETL et de l'entrepôt de données. Cependant aucun plan d'action n'a été mis en place quant à la standardisation des données résultant en des problèmes de véracité et de valeurs des données.
Exactitude et validité des données	Non	Aucun plan d'action n'a été mis en place afin de résoudre les enjeux d'exactitude et validité des données ce qui a causé plusieurs problèmes au niveau de l'ingestion des données et a engendré des problèmes d'intégrité quant à la véracité et la valeur des données.

Tableau 3.10 Évaluation des enjeux (Suite)

Enjeux	Plan d'action	Détails
Propriété et partage des données	Oui	Un plan d'action a été mis en place afin de résoudre les enjeux de propriété et partage des données. Un masquage et hachage des données sur la base de données est effectué, une classification des données confidentielles et accès.
Cybersécurité de la solution technologique	Oui	Un plan d'action a été mis en place afin d'assurer un minimum viable en termes de sécurité. Un audit a été effectué et les éléments jugés non sécuritaires ont été rehaussés en conséquence.
Mise à l'échelle de l'architecture	Oui	Un plan d'action a été mis en place afin de pouvoir effectuer des mises à l'échelle selon la croissance de la solution technologique. Cet aspect a été pris en compte dans le cadre de la conception de l'architecture technologique. De plus, la grande majorité de l'architecture est basée sur Azure ce qui rend plus facile une mise à l'échelle des ressources qui composent la solution globale de JN.

CHAPITRE 4

DISCUSSION SUR LA MISE EN ŒUVRE DU CAS SOUS ÉTUDE

Ce chapitre a pour objectif d'ouvrir la discussion quant à la mise en œuvre du cas sous étude dans la cadre de ce mémoire. Il est question ici de souligner et de discuter de différents éléments qui ont bien été et ceux qui ont moins bien été, et ce dans une optique d'amélioration continue et de rétrospective. Finalement, à la lumière des différents éléments effectués lors de la conception et le développement, la discussion permet d'apporter des pistes de solution dans l'objectif d'offrir une meilleure vision pour l'évolution de la solution existante ou bien le démarrage d'une nouvelle solution.

À la suite de la révision du chapitre 3, les éléments pertinents à discuter dans ce chapitre sont les suivants : (1) Mise en place de l'équipe de projet – sous chapitre 3.2.1; (2) Contexte de prérequis dans l'entreprise – Maturité de l'entreprise – sous chapitre 3.2.2; (3) Gestion organisationnelle et du changement – sous chapitre 3.2.3; (4) Architecture technologique – sous chapitre 3.2.5; (5) Produit minimum viable – sous chapitre 3.2.6; (6) Documentation technique – sous chapitre 3.2.7 et (7) Évaluation des enjeux.

4.1 Discussion sur les éléments à améliorer et pistes de solution

4.1.1 Retour sur la mise en place de l'équipe de projet

De façon générale, toutes les ressources nécessaires afin d'assurer une livraison en bonne et due forme de la solution technologique ont participé au projet. Cependant la partie qui a fait mal au projet est au niveau de l'équipe de développement applicatif. Effectivement, une bonne partie de la solution repose sur une application mobile et il y a eu plusieurs problèmes lors du développement applicatif.

Par exemple, comme en fait mention la section 3.2.1, aucun analyste fonctionnel d'expérience dédié au projet n'a participé au développement de ce qui est problématique.

L'analyste fonctionnel collabore dans les équipes de projet et a comme rôle de bien capturer les exigences du client ainsi que les besoins des utilisateurs dans le but de traduire le tout en solution fonctionnelle selon des critères d'acceptation clairs et définis. L'équipe de réalisation a rencontré plusieurs problèmes lors du développement et la définition claire des besoins en faisait partit. De plus, vu la portée de la solution et les échéanciers, une plus grande équipe aurait grandement aidé à la réalisation. À propos de la sous-traitance du développement, cela apporte aussi son lot de problèmes tel que le transfert technologique et la pérennité de la solution. En sommes, la recommandation est de ne pas minimiser l'ampleur des efforts à mettre sur du développement logiciel. Il est primordial d'avoir plus de ressources telles que des développeurs (incluant l'assurance qualité) et analystes fonctionnels afin de livrer un produit de qualité et robuste. Il est important de comprendre qu'une application doit évoluer, être maintenu et être supporté dans le temps. Le support et l'évolution de l'application doivent être considérés et pris en compte dès le début du projet.

4.1.2 Retour sur le contexte de prérequis dans l'entreprise

Selon le tableau 3, les criticités de couleur rouge et jaune ont respectivement un impact majeur et modéré. Si ceux-ci ne sont pas rencontrés dès le début du projet, cela peut devenir un enjeu important à la réalisation et la livraison de la solution technologique – produit innovant. Cela dit, les prérequis Architecture TI, Qualité de données, Gestion du changement et Cybersécurité n'étaient pas rencontrées lors du début du projet et doivent être abordées dans cette discussion vue de leurs impacts importants. Rappel de l'évaluation :

Tableau 4.1 Retour sur le contexte de prérequis dans l'entreprise

Pratiques d'affaires	Criticité	Évaluation
Architecture TI		Le prérequis n'est pas rencontré
Qualité de données		Le prérequis n'est pas rencontré
Gestion du changement		Le prérequis n'est pas rencontré
Cybersécurité		Le prérequis n'est pas rencontré

Comme mentionné à la section 2.1.3; *Un impact majeur est défini comme un enjeu à la réalisation, un impact modéré est défini comme un enjeu à la réalisation avec des mesures de compensations.* Premièrement, le prérequis le plus important, celui qui peut mettre un frein à la réalisation est la qualité de données. Il est nécessaire que l'entreprise ait une bonne maîtrise de ses données, mais surtout de la qualité de celles-ci. Afin d'alimenter la solution technologique qui est *data-driven*, il est nécessaire de fournir de bonnes données de qualité, sinon le jumeau numérique aura de la difficulté à sortir des résultats fiables et permettre aux décideurs de prendre des actions tactiques ou stratégiques. Une entreprise se doit d'avoir une bonne hygiène au niveau de ses données si celle-ci envisage de les exploiter. Plusieurs solutions sont envisageables et proposées par les grandes compagnies technologiques afin d'assurer une qualité et une intégrité des données, cependant, le minimum serait de monter des plans de tests automatisés qui vont s'assurer que les données qui serviront de sources au jumeau numérique seront sans erreur, sans doublon ni obsolète.

Ensuite, quant au prérequis d'architecture TI, dans ce cas-ci, il est important de mettre en place des mesures de compensation. Effectivement, bien que l'entreprise ne possède pas d'architecture TI afin d'intégrer et supporter la solution technologique, cela n'a pas empêché la réalisation, car l'entièreté de la solution a été développée et maintenue sur le *cloud Azure* de Microsoft. La mesure de compensation était d'inclure le développement de l'architecture TI dans la portée du projet et c'est ce qui a été fait.

Par la suite, bien qu'il y ait eu une certaine gestion du changement par l'équipe de réalisation lors du projet, le prérequis n'est pas atteint dans le cadre de l'évaluation. Effectivement, l'entreprise ne possède pas d'équipe ou de personne dédiée à la gestion du changement. Une mauvaise gestion du changement peut finir par l'échec d'un projet. Il est nécessaire de dédier une ressource sur la gestion du changement ou selon l'ampleur du projet, de dédier une équipe entière. Les détails quant à la gestion du changement effectué sur la mise en œuvre du jumeau numérique dans la cadre du cas sous étude sont détaillés dans la section 4.0.3.

Finalement, à propos du prérequis de cybersécurité, bien le contexte industriel n'est pas le plus à risque et sensible, il est nécessaire d'avoir des encadrements et des stratégies de cybersécurité surtout lorsqu'il est question de données pour des raisons de secrets commerciaux ou de stratégies industrielles. À première vue, aucun encadrement ou de stratégies de cybersécurité étaient établie dans l'entreprise. Ces éléments ont donc été intégrés dans la portée du projet afin de classifier et de limiter l'accès aux données sensibles. De plus, plusieurs limitations - initiatives ont été mise en place dans le cadre du projet tel que le *whitelisting* des adresses IP, le masquage des données confidentielles avec accès limité, la gestion des accès et de rôles avec le moindre privilège ainsi qu'un protocole sécurisé pour le transfert des données. La technologie et les solutions informatiques sont des parties prenantes importantes de notre réalité actuelle (personnel et industrielle) et la cybersécurité doit être mise de l'avant dans le développement afin de limiter les risques. Le développement de solution technologique devrait toujours être *secure by design* c.-à-d. que la sécurité est incluse dans le cycle de développement dès la conception.

4.1.3 Retour sur la gestion organisationnelle et du changement

Bien que l'équipe de projet ainsi que les différents collaborateurs aient mis en place une certaine gestion du changement vu que l'innovation technologique de jumeau numérique est un changement radical pour les opérations ainsi que l'entreprise, il y a eu beaucoup de problèmes et c'est l'un des aspects qui a eu le plus d'impact sur la réalisation du projet.

Effectivement, comme mentionné à la section 4.0.2 de ce chapitre, l'entreprise n'avait pas d'équipe de gestion de changement ainsi que des processus clairs.

L'un des points à améliorer est de mettre en place une équipe de gestion de changement et les différents rôles des intervenants doivent être bien définis. Un plan et un processus doivent être détaillés ainsi que communiqués aux différentes parties prenantes. Les problèmes ont principalement été au niveau de la formation et du coaching ainsi que pour le support et l'évolution de la solution. Effectivement l'entreprise a une réalité bien particulière qui est la suivante; Les utilisateurs finaux sont des contracteurs ce qui a causé des contraintes et des difficultés dans la gestion du changement.

L'entreprise a travaillé avec quelques champions afin de recueillir les commentaires, effectuer de la formation et du coaching, cependant les utilisateurs finaux n'ont pas été inclus suffisamment tôt ce qui a résulté à l'imposition du changement du jour au lendemain ce qui a causé de la résistance et de la surprise. Le coaching et la formation des utilisateurs finaux c'est donc effectué après le déploiement et durant la mise en opération du JN ce qui n'est pas l'idéal. Malgré la contrainte mentionnée précédemment, les utilisateurs finaux ce doivent être inclus le plus rapidement et être suffisamment formés afin d'utiliser de façon appropriée l'outil – l'application. Quant aux processus d'évolution et de support, ils doivent être définis durant la conception et la réalisation comme activités distincte. Dans le cadre du projet, ces processus ont été détaillés et mis en place lorsque l'outil était en opération. Cela a causé plusieurs problèmes pour la gestion des anomalies ainsi que de l'incompréhension à différents niveaux. Ces deux processus doivent aussi être communiqués aux parties prenantes et doivent être définis par l'équipe d'évolution et de support ainsi qu'être prêts en vue du premier *go live*.

4.1.4 Retour sur l'architecture technologique

À propos de l'architecture technologique, plusieurs contraintes comme : (1) le budget, (2) le temps, (3) la portée et (4) le niveau de connaissance ont impacté le niveau de détails de l'architecture technologique qui supporte le jumeau numérique. Comme présenté au tableau 5 à la section 2.1.6 du chapitre 2, le tableau propose 5 niveaux de 0 à 4 inclus et dans le cadre du cas sous étude, à la section 3.2.5, il est évalué que le niveau de maturité du jumeau numérique est de niveau 2. À ce point-ci, bien que la solution soit fonctionnelle et en ce moment en opération, la question à se poser est la suivante : Comment faire afin d'amener la solution à un niveau de maturité Niveau 4? Cela dit, évidemment il nécessaire de se poser aussi les questions suivantes : (1) Est-ce nécessaire d'aller dans ce sens? (2) Est-ce qu'il y a un intérêt? (3) Est-ce qu'il y a un besoin? En tenant comme hypothèse que oui, voici quelques observations afin de faire évoluer la solution vers le dernier niveau de maturité de la grille proposé au tableau 5 :

- 1) Mise en place d'un service d'ingestion des données en temps réel (Évènements et IoT) afin de permettre de recevoir ce type de données et de les intégrer dans les différentes composantes de l'architecture.
- 2) Mise en place d'un service d'analytique pour l'analyse des données en temps réel. De cette façon, il est possible de faire des analyses en temps réel et pas simplement de données déjà classifiées et/ou agrégé dans la base de données. Ceci permet de prendre des décisions en temps réel et de voir comment le système se comporte.
- 3) Bases de données dédiées selon le type de données. Les différents types de données sont stockés dans différents magasins de données mis en place à cet effet afin de diminuer la demande sur une instance et permettre de rendre le tout plus rapide et performant. Les différentes données peuvent être consolidées à la fin pour des rapports ou des analyses. (Données pour l'analytique, données d'entreprise, etc.)

- 4) Il est pertinent de mentionner que l'architecture technologique a été développée afin de faciliter une mise à l'échelle des différentes composantes en vue d'une augmentation de la demande ainsi que l'évolution de la solution avec l'intégration de nouvelles composantes telle que le service d'ingestion des données en temps réel, le service d'analytique et la possibilité de mettre en place des bases de données dédiées selon le type de données.

4.1.5 Retour sur le Produit minimum viable (MVP)

Concernant le produit minimum viable du cas sous étude, comme mentionné dans le chapitre précédent, les fonctionnalités minimums pour l'utilisation de la solution ont été définies, cependant, le MVP n'a pas été défini comme un produit de jumeau numérique. Un MVP distinct pour chacune des différentes composantes de la solution a été défini. De plus, malgré la planification agile et l'incrémentation de façon itérative de la solution, il y a eu plusieurs problèmes au niveau de la définition claire des besoins d'affaires en termes de fonctionnalités et la priorisation de ceux-ci dans le carnet de commandes ce qui a résulté en plusieurs irritants lors des planifications. Cela dit, il peut s'avérer pertinent de considérer le jumeau numérique comme un produit à part entière et non un ensemble de composantes distinctes. Par souci de rappel, les composantes envisageables qui font partie d'un jumeau numérique sont les suivantes : (1) Application mobile, (2) API, (3) Lac de données, (4) Service d'ingestion en temps réel, (5) Pipelines ETL, (6) Magasin de données (7) Modèle de simulation, (8) Modèle d'apprentissage machine, (9) Service d'analytique et (10) Tableau BI. En termes de minimum viable en vue de l'utilisation, voici les éléments qui devraient en premier être développés dans le cadre du MVP afin de rapidement créer de la valeur :

- **Modèle de simulation :** Le modèle de simulation permet de modéliser la chaîne d'approvisionnement selon ses spécificités bien précises et agit comme le cœur de la réplication numérique de celle-ci [chaîne d'approvisionnement].
- **Magasin de données (base de données – entrepôt de données) :** Le magasin de données permet de stocker les données dans un espace de stockage structuré et organisé en vue d'alimenter la modélisation de la chaîne d'approvisionnement et de pouvoir enregistrer les résultats.
- **Modèle d'apprentissage machine :** Le modèle d'apprentissage machine permet au modèle de simulation d'apprendre de ses différentes expériences et de s'adapter. En d'autres mots, le modèle d'apprentissage est par renforcement, donc plus il y a d'expériences, plus celui-ci est précis. À l'aide du modèle d'apprentissage machine qui retourne des paramètres vers la base de données qui serviront de paramètre d'entrée au modèle de simulation, le MVP devient une solution d'analytique prescriptive au lieu d'un simple modèle de simulation qui est plus une solution d'analytique descriptive.

Les trois composantes mentionnées sont donc le minimum viable en termes d'éléments à développer en vue de valider le produit et que celui-ci rencontre les objectifs d'affaires. Par la suite les autres éléments sont ajoutés de façon incrémentale et itérative selon le besoin et les différentes priorités lors du cycle de développement du produit.

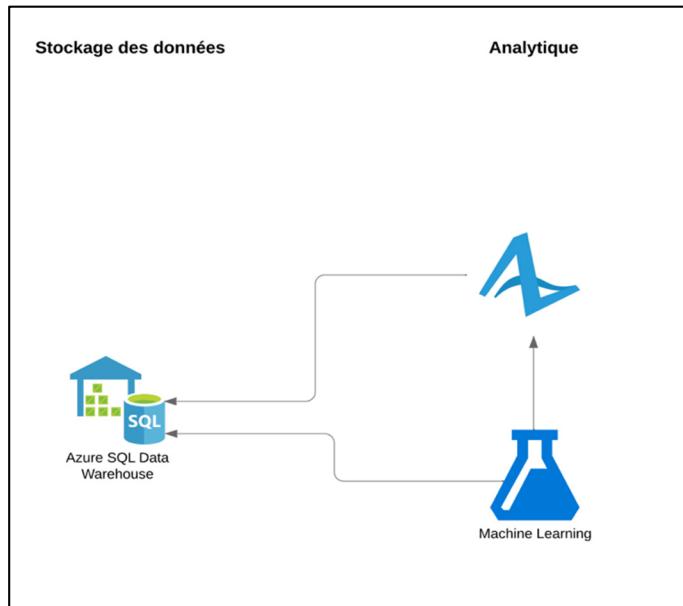


Figure 4.1 Produit minimum viable d'un JN

L'ajout d'éléments de façon incrémental au MVP durant le cycle de développement, apporte de nouveau *features* et permet de se rapprocher de la solution finale préalablement définie tout en diminuant les risques d'intégration. Par exemple, si la priorité d'affaires est d'avoir en premier une visibilité sur les données, la prochaine étape serait de créer et de connecter un outil pour la valorisation des données comme Power BI.

4.1.6 Retour sur la documentation technique

Dans le même ordre d'idée qui est de définir le jumeau numérique comme un produit à part entière, la documentation technique doit documenter le produit dans son ensemble. Il ne doit pas y avoir plusieurs documentations distinctes pour chacune des composantes. Par exemple, dans le cas sous étude, on retrouve la documentation suivante : (1) Définition fonctionnelle et technique du modèle de simulation, (2) Documentation technique sur les spécifications de la base de données et (3) Documentation fonctionnelle et technique sur l'application mobile. Ces trois documents devraient être uniquement un document et que ce document bien précis représente une vision « produit » du jumeau numérique.

4.1.7 Retour sur les enjeux de conception

Au sujet des enjeux, cinq enjeux de conception ont été identifiés au sous-chapitre 2.2.3 et un plan d'action doit être mis en place dès le début du projet, car ceux-ci doivent être considérés afin d'assurer une livraison en bonne et due forme. Cela dit, dans le cadre du cas sous étude, les deux enjeux suivants n'avaient soit aucun plan d'action ou un plan d'action partiel : (1) Standardisation, ingestion et stockage des données et (2) Exactitude et validité des données. Quant au premier enjeu, comme mentionné au sous-chapitre 3.3.3, aucun plan d'action n'a été mis en place afin d'assurer la standardisation des données résultant ainsi à des enjeux de véracité et de valeur. La standardisation de données est très importante, car le jumeau numérique est un produit *data-driven*. Une mauvaise standardisation des données va directement impacter le modèle d'apprentissage automatique, la simulation ainsi que toute autre composante d'analytique. L'idée serait de standardiser les données avant que celles-ci soient ingérées par le système et qu'elles rentrent dans l'espace de stockage. Il est possible de développer des scripts par exemple en Python intégré aux pipelines ETL afin de s'assurer que les données rencontrent le format et le standard attendu. Une logique de contrôle dans les pipelines peut aussi être ajoutée.

À propos de l'exactitude et la validité des données, cet enjeu a bien évidemment aussi un impact sur éléments d'analytique de la solution. Cet enjeu revient en fait à s'assurer de la qualité des données.

Les pipelines ETL développés dans Azure Data Factory incluent des processus de validation et d'exactitude des données comme: la duplication de données, statistique descriptive sur les données, distribution des données, données manquantes. Cependant, aucun plan de tests n'a été développé afin d'effectuer une assurance qualité sur les données durant la réalisation. Dans ce sens, il serait nécessaire de mettre en place des plans de tests d'assurance qualité et de développer davantage les capacités de Data Factory ou d'utiliser des outils robustes comme Informatica, Talend ou TIBCO. À noter qu'il y avait des limitations au niveau de Data Factory dans le cas du cas sous étude vu que cela nécessite une expertise bien précise et l'échéancier était trop serré.

CONCLUSION

La contribution de ce projet de recherche envers la science est d'offrir une stratégie de conception et de mise en œuvre d'un jumeau numérique appliquée à une chaîne d'approvisionnement. Dans un contexte d'innovation et d'incertitudes envers cette nouvelle technologie, cette stratégie permet à toutes personnes ou industriels de démarrer un projet de jumeau numérique d'une chaîne d'approvisionnement avec des lignes directrices solides incluant tous les éléments qu'il est nécessaire de tenir en compte pour la conception et le développement en bonne et due forme ainsi que les coûts à envisager, les risques et les enjeux. L'expérience acquise lors de ce projet de recherche-action se reflète donc dans ce mémoire et offre aux prochains de ne pas passer à travers toutes les erreurs rencontrées durant la réalisation du cas sous étude.

La méthodologie de recherche-action utilisée dans le cadre de ce mémoire était très méthodique vu que la résultante serait une stratégie proposant plusieurs recommandations en vue de la mise en œuvre d'un jumeau numérique. Dans ce sens, la revue de la littérature a été effectuée en amont afin d'accumuler le plus de connaissance possible sur des sujets bien précis en vue de la réalisation. Ensuite, au courant de la dernière année (2021-2022), la conception et le développement du jumeau numérique ont été effectués conjointement avec le partenaire industriel. Bien que le projet ait été mené à terme, plusieurs contraintes ont limité la portée de la recherche. Diverses décisions d'affaires et technologiques avaient déjà été décidées avant même le début de ce projet de recherche, ce qui a nécessité de modifier les objectifs et les questions de recherches en cours de route ainsi que de restructurer les chapitres du mémoire. Lors de la réalisation, l'équipe de projet a rencontré plusieurs enjeux et problèmes qui ont tous été surmontés avec succès. Certaines étapes ont bien été et d'autres non. Ce mémoire se veut donc un témoignage exhaustif de la réalisation du projet.

Dans son ensemble, les différents objectifs listés au début de ce mémoire ont tous été répondu c.-à-d. : (1) Un modèle d'architecture permettant de supporter la solution de JN a été proposé au chapitre 3; (2) Une solution afin de gérer des sources de données différentes a été déterminée et proposée au chapitre 3; (3) Les différents avantages, enjeux et opportunités d'un JN ont bien été mentionnés dans les différentes sections; (4) Un cas pratique réalisé avec le partenaire industriel *SimWell Consulting & Technologies* et une stratégie de conception ont été présentés. C'est deux éléments sont la résultante de ce mémoire. Également quant aux questions de recherche, il serait juste de mentionner qu'une réponse pour chacune d'elle a bien été élaborée et détaillée à travers les différentes sections de ce mémoire. Les différentes réponses aux questions de recherches ont permis de : (1) Déterminer qu'elles sont les avantages d'un jumeau numérique; (2) Expliquer comment il est possible d'alimenter le modèle de simulation avec des données de différents systèmes; (3) Expliquer comment effectuer l'ingestion et la standardisation de données et (4) Montrer les prérequis technologiques ainsi que le produit minimum viable d'un jumeau numérique appliqué à une chaîne d'approvisionnement.

Sinon, à propos du succès commercial de l'innovation développé dans le cadre de cette étude, il est pertinent de mentionner les points suivants : (1) La solution technologique [le jumeau numérique] est actuellement en production et utiliser; (2) La solution permet une économie de coûts et une optimisation des opérations significative pour l'entreprise; (3) La solution se veut comme un outil d'aide à la décision autant stratégique que tactique pour l'entreprise et (4) La solution a été ajusté afin de permettre un déploiement rapide et d'en faire un produit dans son ensemble qui peut être commercialisé.

Finalement, il est important de rappeler que cette technologie innovante apporte son lot d'incertitudes et de risques. Il est primordial de ne pas négliger que ce genre de projet nécessite une expertise diverse et de hauts niveaux. Ce type de solution est un mélange entre la simulation, l'ingénierie industrielle, la science et l'ingénierie des données et l'ingénierie logicielle et TI. Dans ce sens, il est important d'avoir dans l'équipe de réalisation toutes les expertises nécessaires comme un modélisateur pour la simulation, un scientifique des données pour le développement des modèles de données et l'exploitation de celles-ci, un ingénieur de données pour le développement de l'espace des stockages et l'intégration et l'ingestion des données et finalement un architecte de solution qui a l'expertise de développer une architecture robuste et viable. Si la solution nécessite une application web ou mobile, un ingénieur logiciel doit participer à la réalisation. Un jumeau numérique est un produit technologique qui peut être conçu sur mesure pour des besoins bien précis, mais c'est aussi un énorme défi technologique vu que celui-ci est principalement *data-driven*.

RECOMMANDATIONS

Les recommandations de ce mémoire sont sur deux axes, le premier, des recommandations pour la poursuite de ce projet de recherche et le second, des recommandations pour tout industriel ou ingénieur qui a l'intérêt de démarrer un projet de conception d'un jumeau numérique appliqué à une chaîne d'approvisionnement. Dans un souci d'amener cette recherche vers de nouveaux horizons et de pousser la stratégie de conception et de mise en œuvre proposée encore plus loin, il peut s'avérer intéressant pour un futur travail de recherche, de se concentrer sur l'intégration des données en temps réel tel que les données IoT et d'évènements au modèle de simulation. Effectivement, un modèle d'architecture ainsi qu'une solution haut niveau ont été proposés, mais cette partie du travail n'a pas été investiguée davantage dans le cadre de ce projet de recherche vu la portée de la solution développée avec le partenaire industriel. L'opportunité de se pencher davantage sur cette partie permettrait de bonifier le présent projet de recherche tout en offrant une stratégie plus complète avec un modèle d'architecture *big data* plus détaillé.

À propos des recommandations générales, celles-ci recoupent les différentes sections du mémoire. Bien qu'une multitude de solutions puissent être utilisées pour la conception et la mise en œuvre d'un jumeau numérique, les recommandations découlant de ce mémoire pour toutes personnes intéressées à démarrer ce genre de projet seraient les suivantes: (1) Il est important de s'assurer d'avoir toute l'expertise nécessaire afin de réaliser la solution et de ne pas négliger cet aspect; (2) Les opportunités organisationnelles, technologiques et économiques doivent être confirmées en amont; (3) Il est primordial d'effectuer un couplage entre le problème à résoudre et la solution à mettre en œuvre ainsi que de bien cadrer la portée et les objectifs et de s'entendre sur les résultats attendus; (4) Il est nécessaire d'effectuer un audit du moins sommaire afin de s'assurer de la maturité technologique et organisationnelle de l'entreprise; (5) Vu le contexte d'innovation, il est important de réserver une bonne partie du budget du projet pour la gestion du changement; (6) Il faut prioriser une approche de développement itératif et incrémental afin de diminuer les risques;

(7) Adresser les enjeux technologiques comme la standardisation, le stockage, l'exactitude et la validation des données, la cybersécurité et la mise à l'échelle de l'architecture dès le début du projet; (8) Investir un temps important sur le choix et le type d'architecture ainsi que la technologie qui sera utilisée, car ce sont des choix importants qui peuvent avoir des impacts à long terme et amener d'éventuelles contraintes si le projet démarre sur de mauvaises bases.

ANNEXE I

SCRIPT R DE LA FIGURE 3.3

```
#définition de la moyenne et de l'erreur standard du projet (heures)
mean <- 3546.64
stdev <- 285.29

#définition de x et y
x <- seq(-3, 3, length = 1000) * stdev + mean
y <- dnorm(x, mean, stdev)

#définition de la borne inférieure et supérieure
lower_bound <- mean - stdev
upper_bound <- mean + stdev

#plotting du graphique
plot(x,y, type = "l", lwd = 2, axes = FALSE, xlab = "Distribution - Effort total du projet en heures", ylab = "")
sd_axis_bounds = 5
axis_bounds <- seq(-sd_axis_bounds * stdev + mean,
                     sd_axis_bounds * stdev + mean,
                     by = stdev)
axis(side = 1, at = axis_bounds, pos = 0)
```

Figure-A I-1 4.1

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Agalianos, K., Ponis, S. T., Aretoulaki, E., Plakas, G., & Efthymiou, O. (2020). Discrete Event Simulation and Digital Twins: Review and Challenges for Logistics. *Procedia Manufacturing*, 51, 1636-1641. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.10.228>
- Akter, S., Michael, K., Uddin, M. R., McCarthy, G., & Rahman, M. (2020). Transforming business using digital innovations: the application of AI, blockchain, cloud and data analytics. *Annals of Operations Research*. <https://doi.org/10.1007/s10479-020-03620-w>
- Angelov, P. P., Soares, E. A., Jiang, R., Arnold, N. I., & Atkinson, P. M. (2021). Explainable artificial intelligence: an analytical review. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Data Mining and Knowledge Discovery*, 11(5). <https://doi.org/10.1002/widm.1424>
- Barricelli, B. R., Casiraghi, E., & Fogli, D. (2019). A Survey on Digital Twin: Definitions, Characteristics, Applications, and Design Implications. *IEEE Access*, 7, 167653-167671. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2953499>
- Blackburn-Grenon, F., Abran, A., Rioux, M., & Wong, T. (2021). A Team-Based Workshop to Capture Organizational Knowledge for Identifying AI Proof-of-Value Projects. *IEEE Engineering Management Review*, 49(2), 181-195. <https://doi.org/10.1109/EMR.2021.3063688>
- Carlsson, C. (2018). Decision analytics—Key to digitalisation. *Information Sciences*, 460-461, 424-438. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2017.08.087>
- Collerette, P., Schneider, R., & Lauzier, M. (2012). *Le pilotage du changement*. (S.l.): (s.n.).
- Czvetkó, T., Kummer, A., Ruppert, T., & Abonyi, J. (2022). Data-driven business process management-based development of Industry 4.0 solutions. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 36, 117-132. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2021.12.002>
- Feick, M., Kleer, N., & Kohn, M. (2018). Fundamentals of Real-Time Data Processing Architectures Lambda and Kappa, 12.
- Gamache, S. (2019). Stratégies de mise en oeuvre de l'industrie 4.0 dans les petites et moyennes entreprises manufacturières québécoises.
- Gardoni, M., & Navar, A. (2017). *Pratiques de gestion de l'innovation : Guide sur les stratégies et les processus*. (S.l.): (s.n.).

- Ghobakhloo, M., & Fathi, M. (2019). Corporate survival in Industry 4.0 era: the enabling role of lean-digitized manufacturing. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 31(1), 1-30. <https://doi.org/10.1108/JMTM-11-2018-0417>
- Hiatt, J. M., & Creasey, T. J. (2012). An introduction to change management from the editors of the Change Management Learning Center, 156.
- Huang, S.-C., McIntosh, S., Sobolevsky, S., & Hung, P. C. K. (2017). Big Data Analytics and Business Intelligence in Industry. *Information Systems Frontiers*, 19(6), 1229-1232. <https://doi.org/10.1007/s10796-017-9804-9>
- Ivanov, D., & Dolgui, A. (2020). A digital supply chain twin for managing the disruption risks and resilience in the era of Industry 4.0. *Production Planning & Control*, 0(0), 1-14. <https://doi.org/10.1080/09537287.2020.1768450>
- Kamble, S. S., Gunasekaran, A., & Gawankar, S. A. (2018). Sustainable Industry 4.0 framework: A systematic literature review identifying the current trends and future perspectives. *Process Safety and Environmental Protection*, 117, 408-425. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.05.009>
- Korth, B., Schwede, C., & Zajac, M. (2019). Simulation-ready digital twin for realtime management of logistics systems (pp. 4194-4201). Communication présentée au Proceedings - 2018 IEEE International Conference on Big Data, Big Data 2018. <https://doi.org/10.1109/BigData.2018.8622160>
- Krause, T. (2020). AI-Based Discrete-Event Simulations for Manufacturing Schedule Optimization (pp. 87-91). Communication présentée au ACM International Conference Proceeding Series. <https://doi.org/10.1145/3423390.3426725>
- Król, K., & Zdonek, D. (2020). Analytics Maturity Models: An Overview. *Information*, 11(3), 142. <https://doi.org/10.3390/info11030142>
- Masson, F., & Balmana, B. (2017). Stratégie et analyse de marché. Dans *Pratiques de gestion de l'innovation : Guide sur les stratégies et les processus* (p. 276). (S.1.) : (s.n.). Repéré à <https://www.puq.ca/catalogue/livres/pratiques-gestion-innovation-2931.html>
- Melzer, B. (s.d.). Reference Architectural Model Industrie 4.0 (RAMI 4.0), 15.
- Nguyen, T., Gosine, R. G., & Warrian, P. (2020). A Systematic Review of Big Data Analytics for Oil and Gas Industry 4.0. *IEEE Access*, 8, 61183-61201. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2979678>

- Pappas, I. O., Mikalef, P., Giannakos, M. N., Krogstie, J., & Lekakos, G. (2018). Big data and business analytics ecosystems: paving the way towards digital transformation and sustainable societies. *Information Systems and e-Business Management*, 16(3), 479-491. <https://doi.org/10.1007/s10257-018-0377-z>
- Poirier, A. (2017). Développement de produits. Dans *Pratiques de gestion de l'innovation : Guide sur les stratégies et les processus*. (S.l.) : (s.n.).
- Tako, A. A., & Robinson, S. (2012). The application of discrete event simulation and system dynamics in the logistics and supply chain context. *Decision Support Systems*, 52(4), 802-815. <https://doi.org/10.1016/j.dss.2011.11.015>
- Tao, F., Cheng, J., Qi, Q., Zhang, M., Zhang, H., & Sui, F. (2018). Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 94(9-12), 3563-3576. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0233-1>
- Vélez Sánchez, H., & Hurtado Cortés, L. L. (2022). Data Collection: Use and Transformation in Predictive Maintenance Models. *Lecture Notes in Networks and Systems*, 298, 525-540. https://doi.org/10.1007/978-3-030-82529-4_50
- Vossen, G. (2014). Big data as the new enabler in business and other intelligence. *Vietnam Journal of Computer Science*, 1(1), 3-14. <https://doi.org/10.1007/s40595-013-0001-6>
- Wanasinghe, T. R., Wroblewski, L., Petersen, B. K., Gosine, R. G., James, L. A., Silva, O. D., ... Warrian, P. J. (2020). Digital Twin for the Oil and Gas Industry: Overview, Research Trends, Opportunities, and Challenges. *IEEE Access*, 8, 104175-104197. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2998723>
- Yan, Z., Ismail, H., Chen, L., Zhao, X., & Wang, L. (2019). The application of big data analytics in optimizing logistics: a developmental perspective review. *Journal of Data, Information and Management*, 1(1), 33-43. <https://doi.org/10.1007/s42488-019-00003-0>