

**POLYTECHNIQUE MONTRÉAL**

affiliée à l'Université de Montréal

**Cartographie 4.0 pour la transformation numérique des processus**

**JÉRÉMIE MOSSER**

Département de mathématiques et de génie industriel

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise ès sciences appliquées*

Génie industriel

Août 2020

© Jérémie Mosser, 2020.

# **POLYTECHNIQUE MONTRÉAL**

affiliée à l'Université de Montréal

Ce mémoire intitulé :

## **Cartographie 4.0 pour la transformation numérique des processus**

présenté par **Jérémie MOSSER**

en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise ès sciences appliquées*

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

**Martin TRÉPANIÉ**, président

**Mario BOURGAULT**, membre et directeur de recherche

**Robert PELLERIN**, membre et codirecteur de recherche

**Christophe DANJOU**, membre et codirecteur de recherche

**Laurent JOBLOT**, membre

## DÉDICACE

*À mes parents, mon frère et mes grands-parents,  
pour leurs encouragements et leur indéfectible affection...*

## REMERCIEMENTS

Je souhaite ici exprimer ma gratitude à l'ensemble des personnes qui de près ou de loin ont permis la réalisation de ce projet de recherche.

En tout premier lieu, sur le plan académique, je tiens à remercier chaleureusement les encadrants de ce projet de recherche : mon directeur Monsieur Mario BOURGAULT et mes co-directeurs Messieurs Robert PELLERIN et Christophe DANJOU, professeurs à Polytechnique Montréal. Merci à vous trois pour le temps que vous m'avez consacré, pour votre implication, votre gentillesse, votre expertise et votre expérience si utiles à l'aboutissement de ce projet, et bien au-delà. Merci aussi à Nathalie pour ses précieux conseils. Mes remerciements vont également à l'ensemble de la Chaire de recherche industrielle Pomerleau sur l'innovation et la gouvernance des projets de construction, ainsi qu'à la Chaire de recherche Jarilowsky/SNC-Lavalin en gestion de projets internationaux. Je les remercie particulièrement pour leur soutien financier qui m'a permis de mener ma recherche sans avoir à me soucier de contraintes budgétaires. Merci à vous, Mario et Robert, de m'avoir accepté au sein des équipes de vos chaires de recherche. Merci aux partenaires industriels, et en particulier à Étienne et Joël, pour le temps qu'ils ont pu m'accorder.

J'ai aussi une pensée spécifique pour mes compagnons de route au Canada avec qui j'ai passé deux années extraordinaires. Un grand merci à Clément, Anjeli, Quentin et Khadija pour le soutien mutuel et tous les moments de partage culturel, ludique et gastronomique. Pour avoir agrémenté mes études de temps de réflexion, mais aussi d'humour et de divertissement, merci à Lucas, Marine, Mathieu, Joffrey, Marc, Oswald et tous mes amis d'ici et d'ailleurs qui, au cours de ces deux ans, ont fait un bout de chemin avec moi. Pour finir, un merci singulier à Marie.

## RÉSUMÉ

L'industrie 4.0 représente un défi majeur pour l'ensemble des secteurs d'activité économique et notamment pour le domaine de la construction qui cherche à réussir sa transition vers la construction 4.0. Cette 4<sup>e</sup> révolution industrielle, basée sur le numérique et la connectivité, permet une prise de décision à la fois décentralisée et en temps réel, dans le but de maximiser l'agilité, la réactivité et l'autonomie des systèmes. Cependant, les changements associés à cette révolution ne sont pas aisés à mettre en œuvre, d'autant plus que la représentation des processus habituellement utilisée pour la transformation des procédés n'est pas adaptée au besoin de représentation de l'industrie 4.0. C'est pourquoi l'objectif général de nos travaux est de développer une nouvelle représentation des processus adaptée aux besoins de l'industrie 4.0.

Ainsi, après un état de l'art consacré à l'industrie 4.0 et à sa déclinaison dans le domaine de la construction, une revue de littérature sur les standards de modélisation des processus d'affaires a été menée, permettant de juger de la capacité des formalismes de cartographies actuels et de leurs améliorations à prendre en compte les spécificités de représentation de l'industrie 4.0. Celles-ci se situent en particulier dans la représentation des technologies et des données. Bien qu'il ait été démontré qu'aucun formalisme n'embrasse l'ensemble des besoins en représentation 4.0, cet état de l'art a permis de comparer les différents formalismes et de dégager les plus prometteurs. De plus, les caractéristiques nécessaires à la conception d'une nouvelle représentation à destination de l'industrie 4.0 ont d'une part été extraites de la revue de littérature, et ont d'autre part été complétées suivant les besoins de notre partenaire industriel exprimés lors de son audit. Basé sur le formalisme BPMN, notre nouveau modèle baptisé « Gabarit de représentation et de modélisation pour l'industrie 4.0 (GRMI4.0), a été développé et validé grâce à un protocole adapté de la méthodologie usuellement employée lors de la normalisation des pictogrammes. La bonification des pictogrammes d'activité et de donnée par l'ajout de 14 nouvelles icônes apporte une meilleure représentation des solutions 4.0 mises en œuvre, en particulier du point de vue des technologies et des données. L'intégration d'indicateurs de performance permet quant à elle de quantifier les transformations induites en termes de compétences à mettre en œuvre, de coût et de temps. Enfin, un gabarit Microsoft Visio a été développé pour faciliter l'utilisation du GRMI4.0. Finalement, une expérimentation sur un cas d'application du partenaire – l'implantation de la méthode de la valeur acquise sur le processus de gestion et de suivi de projet – a montré l'efficacité du modèle pour l'opérationnalisation de l'implantation de pratiques 4.0.

## ABSTRACT

Industry 4.0 represents a major challenge in all sectors of economic activity and particularly in the industry of the construction, which is seeking to make a successful transition to construction 4.0. This 4th industrial revolution, based on digital technology and connectivity, enables both decentralized and real-time decision-making, with the aim of maximizing the systems' agility, responsiveness and autonomy. However, the changes associated with this revolution are not easy to implement, especially since Business Process Modeling (BPM) usually used for process transformation is not adapted to the needs of representation of Industry 4.0. This is why the general objective of our work is to develop a new BPMN representation adapted to the needs of industry 4.0.

Thus, after a state of the art devoted to industry 4.0 and its declination in the field of construction, a literature review on BPM standards has been conducted, allowing to judge the capacity of current mapping formalisms and their improvements to take into account the specific features of Industry 4.0 representation. These features particularly relate to the representation of technologies and data. Although it has been shown that no single formalism covers all the needs in 4.0 representation, this state of the art has made it possible to compare the different formalisms and to identify the most promising ones. In addition, the necessary characteristics for the design of a new representation for Industry 4.0 were extracted from the literature review and were completed according to the needs our industrial partner expressed during its audit. Based on the BPMN formalism, our new model called "Gabarit de représentation et de modélisation pour l'industrie 4.0" (GRMI4.0), has been developed and validated using a protocol adapted from the methodology usually used in the standardization of pictograms. The enhancement of the activity and data pictograms by the addition of 14 new icons provides a better representation of the implemented 4.0 solutions, particularly from technology and data points of view. The integration of performance indicators enables to quantify the induced transformations in terms of skills, cost and time. Besides, a Microsoft Visio template has been developed to facilitate the use of GRMI 4.0. Finally, an experimentation on a partner's application case - the implementation of the earned value method on the project management and monitoring process - showed the effectiveness of the model for the operationalization of 4.0 practice.

## TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE.....	III
REMERCIEMENTS .....	IV
RÉSUMÉ.....	V
ABSTRACT .....	VI
TABLE DES MATIÈRES .....	VII
LISTE DES TABLEAUX.....	X
LISTE DES FIGURES.....	XI
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS .....	XIII
LISTE DES ANNEXES.....	XV
CHAPITRE 1 INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE .....	3
2.1 Introduction .....	3
2.2 Industrie 4.0.....	3
2.2.1 Définition .....	4
2.2.2 Approche de classification technologique.....	5
2.2.3 Construction 4.0 .....	6
2.3 Méthodologie de recherche bibliographique pour la cartographie.....	7
2.4 Cartographie des processus .....	11
2.4.1 Les formalismes usuels de cartographie et leurs améliorations .....	12
2.4.2 Indicateurs de performance en cartographie des processus .....	19
2.5 Analyse de la revue de littérature .....	20
2.6 Conclusion.....	21
CHAPITRE 3 OBJECTIFS ET MÉTHODOLOGIE.....	23

3.1	Introduction .....	23
3.2	Objectifs de la recherche .....	23
3.3	Démarche de recherche proposée.....	24
3.3.1	Analyse de l'existant .....	26
3.3.2	Élaboration de la modélisation .....	28
3.3.3	Application du modèle sur un cas d'étude .....	28
3.4	Conclusion.....	29
CHAPITRE 4 ANALYSE DE L'EXISTANT.....		30
4.1	Introduction .....	30
4.2	Choix d'une cartographie de base .....	30
4.3	Observation chez le partenaire industriel .....	30
4.3.1	Cartographie du processus de gestion de projets .....	31
4.3.2	Besoins émergeant du processus .....	34
4.4	Extraction des caractéristiques de la littérature.....	35
4.5	Caractéristiques sélectionnées.....	39
4.5.1	Caractéristiques additionnelles.....	39
4.5.2	Caractéristiques retenues.....	39
4.6	Conclusion.....	41
CHAPITRE 5 CARTOGRAPHIE 4.0 PROPOSÉE.....		42
5.1	Introduction .....	42
5.2	Améliorations proposées .....	42
5.2.1	Code couleur .....	42
5.2.2	Couloir technologique .....	43
5.2.3	Bonification des pictogrammes.....	44

5.2.4	Cartouche et indicateur de performance.....	48
5.3	Validation graphique .....	50
5.3.1	Méthodologie .....	50
5.3.2	Résultats .....	51
5.4	Outil numérique.....	55
5.5	Conclusion.....	56
CHAPITRE 6	EXPÉRIMENTATION .....	57
6.1	Introduction .....	57
6.2	Application du modèle à l'implantation de la méthode de la valeur acquise.....	57
6.2.1	Présentation de la méthode de gestion par valeur acquise .....	57
6.2.2	Modélisation via le GRMI4.0.....	58
6.2.3	Analyse comparative .....	66
6.3	Retour du partenaire industriel sur les cartographies .....	67
6.3.1	Méthodologie .....	67
6.3.2	Résultats .....	68
6.4	Conclusion.....	68
CHAPITRE 7	CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS .....	69
RÉFÉRENCES	.....	71
ANNEXES	.....	78

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 Mots-clés des concepts : modélisation et industrie 4.0 .....	8
Tableau 2.2 Mots-clés de chaque formalisme .....	9
Tableau 2.3 Synthèse des différents formalismes de cartographie .....	21
Tableau 4.1 Décomposition en famille et concept de caractéristiques .....	36
Tableau 4.2 Tableau des caractéristiques théoriques extraites de la littérature.....	36
Tableau 4.3 Caractéristiques additionnelles provenant de l'analyse de l'existant .....	39
Tableau 4.4 Liste des caractéristiques 4.0 nécessaires.....	40
Tableau 5.1 Différentes versions des icônes : Initial (Version 1) et après le test de compréhension (Version 2).....	52
Tableau 5.2 Différentes versions des icônes : Après le test de compréhension (Version 2) et après le test d'appariement (Version 3).....	54
Tableau 6.1 Retour du partenaire : questionnaire d'aide à la discussion.....	67
Tableau A.1 Tableau de sélection des caractéristiques théoriques .....	75
Tableau C.1 Résultats du test n°1 de compréhension .....	83
Tableau E.1 Résultats du test n°2 d'appariement.....	90
Tableau G.1 Résultats du test n°3 de discrimination .....	100

## LISTE DES FIGURES

Figure 2.1 Les différentes révolutions industrielles .....	4
Figure 2.2 Figure récapitulative des capacités – adaptée de Danjou et al. (2017a) .....	5
Figure 2.3 Méthodologie de filtrage et de notation des documents résultants des deux requêtes .	10
Figure 2.4 Résultats quantitatifs des neuf requêtes R1 et de la requête R2 .....	11
Figure 3.1 Méthodologie DRM appliquée au projet de recherche .....	25
Figure 3.2 Méthodologie de sélection des caractéristiques 4.0 pertinentes .....	27
Figure 4.1 Cartographie du processus de gestion et de suivi de projets à T0 du partenaire industriel en BPMN.....	32
Figure 5.1 Représentation du couloir technologique dans l’espace d’une cartographie .....	43
Figure 5.2 Pictogrammes d’activité (à gauche) et de donnée (à droite) en BPMN.....	44
Figure 5.3 Icône du pictogramme d’activité : a) ressource humaine b) compétence c) technologie d) investissement e) coût d’exécution f) temps de cycle g) temps réel.....	46
Figure 5.4 Pictogrammes d’activité : BPMN (à gauche) et GRMI4.0 (à droite) .....	46
Figure 5.5 Pictogramme de donnée : BPMN (à gauche) et GRMI4.0 (à droite) .....	47
Figure 5.6 Icône du pictogramme de donnée : a) type de la donnée b) fréquence de la donnée c) délais de la donnée d) donnée humaine e) donnée papier f) donnée numérique.....	48
Figure 5.7 Cartouche du modèle 4.0 .....	49
Figure 5.8 Icône du cartouche : Rentabilité/Gain .....	49
Figure 5.9 Résultats du test de compréhension .....	51
Figure 5.10 Résultats du test d’appariement : histogramme en pourcentage cumulé .....	53
Figure 5.11 Résultats du test de discrimination .....	55
Figure 5.12 Pictogrammes d’activité (à gauche) et de donnée (à droite) dans Microsoft Visio .....	56
Figure 6.1 Cartographie du processus de gestion et de suivi de projet du partenaire industriel à l’instant T0 en GRMI4.0.....	61

Figure 6.2 Cartographie du processus de gestion et de suivi de projet du partenaire industriel à l'instant T1 en GRMI4.0.....	62
Figure 6.3 Cartographie du processus de gestion et de suivi de projet du partenaire industriel à l'instant Tn en GRMI4.0.....	63

## LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

AR	Augmented Reality – Réalité augmentée
ANSI	American National Standards Institute
BIM	Building Information Modeling – Modélisation des informations du bâtiment
BOO	BPMN2.0 Based Ontolgy
BPM	Business Process Modeling – Modélisation des processus
BPMN	Business Process Model and Notation – Modèle de procédé d’affaire et notation
CEFRIO	Centre facilitant la rechercher et l’innovation dans les organisations
CMSD	Core Manufacturing Simulation Data
CPPS	Cyber-Physical Production System – Système de production cyber-physique
CPS	Cyber-Physical System – Système cyber-physique
CR	Coût réel
DFD	Data Flow Diagram – Diagramme de flux de données
DRM	Design Research Methodology
EPC	Event Process Chain – Chaîne de processus évènementiels
GRMI4.0	Gabarit de représentation et de modélisation pour l’industrie 4.0
I4PML	Industry 4.0 Process Modeling Language
I4PMM	Industry 4.0 Process Modeling Method
IA	Intelligence artificielle
IDEF	Integration Definition for Function Modeling – Analyse fonctionnelle descendante
IoT	Internet of Things – Internet des objets
ISA	International Society of Automation – Société internationale de l’automatisation
JITIR	Just-In-Time Information Retrieval - Récupération d’informations en temps réel
KPI	Key Performance Indicator – Indicateur de performance clé

M2M	Machine-to-Machine – Communication intermachines
MOT	Modèle organisationnel de traitement
OBS	Organization Breakdown Structure - Structure organisationnelle du projet
OEE	Overall Equipment Effectiveness – Efficacité globale des équipements
PMB	Performance Measurement Baseline – Référence de mesure de la performance
PrivUML	PrivacyUML
PyBPMN	Performability-enable BPMN
RAMI 4.0	Reference Architectural Model of Industry 4.0
RAM	Responsibility Assignment Matrix – Matrice des responsabilités
RMS	Reconfigurable Manufacturing Systems – Systèmes manufacturiers reconfigurables
SADT	Structured Analysis and Design Technics – Analyse fonctionnelle descendante
S-BPM	Subject-oriented BPM
SVSM	Sustainable Value Stream Mapping – Cartographies des chaînes de valeurs durables
SysML	Systems Modeling Language – Langage de modélisation des systèmes
UML	Unified Modeling Language – Langage de modélisation unifié
UML4IoT	UML for IoT
VA	Valeur acquise
VAAIP	Visualizing, Analyzing and Assessing of Information Processes – Visualisation, analyse et évaluation des processus d’information
VP	Valeur planifiée
VSA	Value Stream Analysis – Analyse des chaînes de valeurs
VSD	Value Stream Design – Conception des chaînes de valeurs
VSM	Value Stream Mapping – Cartographie des chaînes de valeur
WBS	Work Breakdown Structure – Structure de découpage de projet

## LISTE DES ANNEXES

Annexe A Sélection des caractéristiques théoriques.....	75
Annexe B Test n°1 Compréhension – Questionnaire.....	78
Annexe C Test n°1 Compréhension – Résultats .....	83
Annexe D Test n°2 Appariement – Questionnaire.....	85
Annexe E Test n°2 Appariement – Résultats .....	90
Annexe F Test n°3 Discrimination – Questionnaire .....	92
Annexe G Test n°3 Discrimination – Résultats .....	100

## CHAPITRE 1 INTRODUCTION

Le concept d'« industrie 4.0 » est apparu sous l'impulsion d'une volonté politique allemande et a été porté initialement par les scientifiques Drath et Horch (2014). Ce concept laisse entendre une 4<sup>e</sup> révolution industrielle reposant sur les Systèmes cyber-physiques (CPS) et les technologies numériques dont l'utilisation doit permettre une prise de décision décentralisée en temps réel. La décentralisation via le partage de données entre les entités et la délégation à l'échelle locale des prises de décisions permet d'améliorer les systèmes en matière d'agilité et de flexibilité, de réactivité et d'autonomie.

Aujourd'hui, les concepts de l'industrie 4.0 ne se limitent plus au secteur manufacturier, mais s'étendent à un très grand nombre de secteurs d'activités économiques. En particulier, le secteur de la construction a commencé son basculement tardif vers des pratiques 4.0 sous le patronyme de Construction 4.0. Le retard de ce secteur d'activité dans la transformation numérique provient du fait que l'industrie de la construction n'a quasiment pas fait évoluer ses pratiques en parallèle des trois premières révolutions industrielles. Ce retard peut notamment être imputable à l'importante résistance au changement de cette industrie, mais aussi à l'hétérogénéité du développement numérique chez les nombreux sous-traitants qui collaborent à la chaîne de valeur des projets de construction. Finalement, ces constats sont amplifiés du fait que la majorité du secteur de la construction soit composée de petites et moyennes entreprises bénéficiant de faibles capacités d'investissement dans les nouvelles technologies (Oesterreich & Teuteberg, 2016).

Comme dans les autres secteurs, l'industrie 4.0 remet aussi en cause le modèle d'affaires des entreprises de construction. Les entreprises ont deux principaux défis à relever : la conception de produits, processus et services exploitant de manière 4.0 les technologies d'une part, et la maîtrise et l'exploitation des technologies de type 4.0 d'autre part (Danjou, Rivest, & Pellerin, 2017a). Pour prendre part aux transformations liées à cette révolution industrielle, une firme doit d'abord bien connaître ses processus. En particulier, il est nécessaire d'appréhender à la fois les flux physiques et les flux de données. Ces derniers sont l'élément clé pour les prises de décisions. La modélisation des processus, ou en d'autres termes la cartographie des processus, permet de comprendre de manière visuelle les flux physiques et les flux d'informations d'un processus et ainsi d'identifier ses faiblesses. En revanche, le point faible d'une cartographie de processus dans le cadre de l'industrie 4.0 réside dans son incapacité à représenter les mécanismes de prise de décision et les

informations requises. Cerner le besoin en données d'un processus de décision et ses mécanismes de traitement sont donc les clés de voûte pour le choix de la technologie corrective à appliquer. Bien qu'il se veuille généraliste, le présent projet de recherche s'inscrit dans le contexte de la Construction 4.0, et vise à contribuer à la mise en place de pratiques 4.0 dans le secteur de la construction. Cependant, la transition vers l'industrie 4.0 ne peut être menée à bien que dans un processus d'implantation progressif au sein des processus visés. Une opportunité d'accompagner ces changements itératifs se situe sans doute dans la représentation du processus à différents instants, de sorte à visualiser l'impact des technologies mises en œuvre au fil du temps. **L'objectif principal de cette recherche est donc de proposer une cartographie adaptée au contexte 4.0, et ainsi faciliter l'implantation des processus et technologies liés à l'industrie 4.0.** Outre la prise en compte des flux physiques et des flux d'informations des processus d'affaires complexes faisant intervenir de multiples technologies, **l'enjeu réside particulièrement dans la capacité des représentations à comparer un processus actuel à ses itérations futures** en y faisant apparaître les indicateurs de performance pertinents, permettant la mise en évidence des gains réalisés.

Dans le but de mener à bien ce projet de recherche, le présent mémoire est structuré de la façon suivante. Premièrement, le Chapitre 2 présentera une revue de la littérature qui recense les principaux documents utiles à cette recherche. Un regard objectif sera évidemment apporté sur les travaux scientifiques antérieurs au travers d'une analyse critique. En se basant sur les conclusions de la revue de littérature et notamment les lacunes, le Chapitre 3 présentera les objectifs spécifiques de ce mémoire. Il présentera ensuite la méthodologie de recherche employée pour atteindre ces objectifs. Une analyse de l'existant sera présentée dans le Chapitre 4 pour identifier les besoins en représentation 4.0. Cette analyse sera menée par le biais d'une cartographie du processus de gestion de projets du partenaire industriel ainsi que par le biais des conclusions de la revue de littérature. La présentation du modèle sera réalisée au Chapitre 5. Il présentera de manière détaillée les améliorations développées et destinées à améliorer la représentation des processus 4.0. Finalement, le Chapitre 6 tentera de valider le modèle via l'application sur un cas d'étude du domaine de la construction. Ultiment, le Chapitre 7 dévoilera les conclusions en discutant de l'apport de ce projet de recherche en termes de contributions scientifiques et en prédisant les opportunités qui en émergeront.

## CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE

### 2.1 Introduction

La revue de littérature présentée s'oriente majoritairement sur la cartographie des processus dans le contexte de l'industrie 4.0. C'est pourquoi une présentation de l'industrie 4.0 est menée dans un premier temps. Par la suite, les enjeux de l'industrie 4.0 dans le secteur de la construction seront exposés. En effet, le domaine d'application retenu pour ce mémoire est celui de la construction. La suite de la revue de littérature s'attaquera au cœur de la problématique en évoquant la cartographie des processus au travers de différentes présentations : dans un premier temps, le concept de modélisation des processus, dans un second temps les différents standards classiques de cartographie des processus et leurs améliorations en lien avec l'industrie 4.0, et dans un troisième temps les indicateurs de performance. Pour conclure l'état de l'art, une analyse critique permettra de faire ressortir les lacunes de la littérature scientifique relatives à la cartographie des processus pour l'industrie 4.0.

### 2.2 Industrie 4.0

Évoqué pour la première fois en 2011 lors de la foire de Hanovre, le concept d'« industrie 4.0 » résulte d'une impulsion politique et scientifique allemande (Drath & Horch, 2014). Le concept sous-entend l'avènement d'une 4<sup>e</sup> révolution industrielle faisant suite à plusieurs révolutions dans la manière de produire les biens. La première révolution industrielle, celle du milieu du 18<sup>e</sup> siècle, a apporté une mécanisation de la production via l'utilisation de machines à vapeur. La fin du 19<sup>e</sup> siècle voit naître quant à elle la production de masse lors de la 2<sup>e</sup> révolution industrielle grâce à l'électrification des moyens de production. Finalement, vers 1970, l'automatisation de la production avec l'émergence de l'électronique entraîne une 3<sup>e</sup> révolution industrielle.

Contrairement aux précédentes révolutions industrielles qui s'étaient produites de manière plutôt fortuite, la 4<sup>e</sup> révolution industrielle est la première à avoir été anticipée. Elle repose sur les systèmes cyber-physiques (CPS) et les technologies numériques dont l'utilisation permet une prise de décisions décentralisée en temps réel. La Figure 2.1 permet d'illustrer ces quatre révolutions. De plus, comparativement à ses prédécesseurs qui concernaient la production manufacturière, la 4<sup>e</sup> révolution industrielle porte tout autant sur les produits devenant connectés et aux processus

permettant une production personnalisée qu'aux services qui se multiplient par la disponibilité des données. Finalement, la frontière entre ces trois objets – et en particulier le produit et le service – devient très poreuse et n'est déterminée que par la perspective utilisée ou la prédominance ou non de l'information (Danjou et al., 2017a).

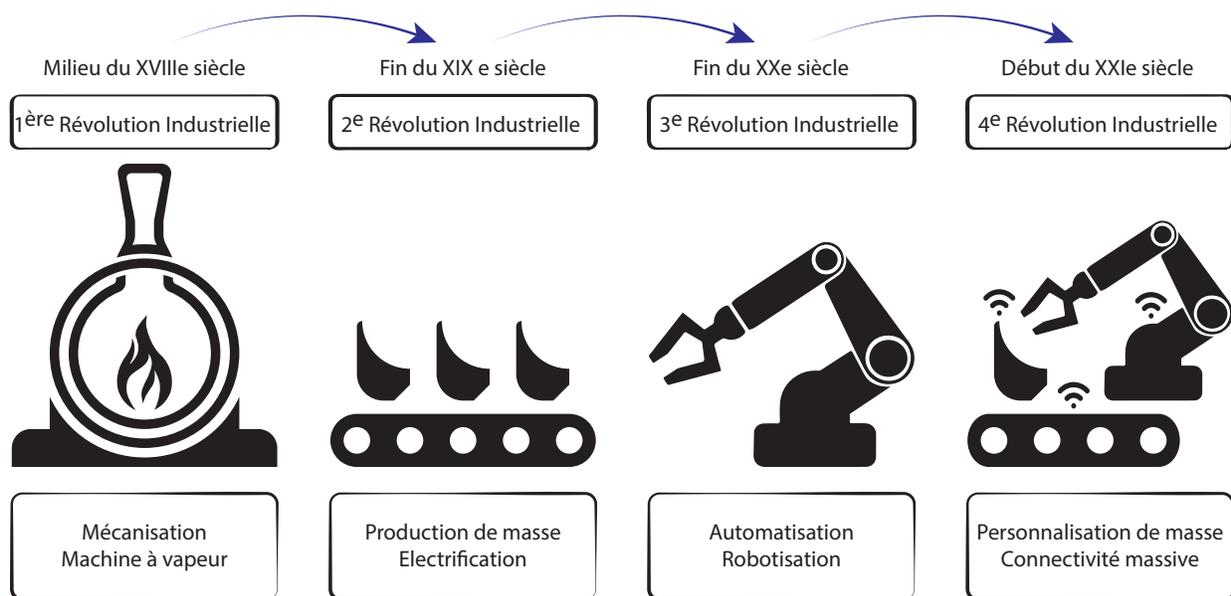


Figure 2.1 Les différentes révolutions industrielles

### 2.2.1 Définition

Il n'existe actuellement pas de consensus sur la définition de l'industrie 4.0. Hermann et al. soutiennent que le terme industrie 4.0 regroupe un ensemble de technologies et de concepts liés à la réorganisation de la chaîne de valeur, prenant appui sur la communication en temps réel pour surveiller et agir sur les systèmes physiques (Hermann, Pentek, & Otto, 2016). Shrouf et al. définissent quant à eux l'industrie 4.0 comme le cœur de « l'Internet of Things » (IoT) – Internet des objets en français – et de la « Smart Factory » - usine intelligente en français – conduisant à passer de systèmes centralisés de contrôle des usines à une intelligence décentralisée (Shrouf, Ordieres, & Miragliotta, 2014). Ce mémoire considérera pour sa part la proposition du Centre facilitant la recherche et l'innovation dans les organisations (CEFRIO) : *l'industrie 4.0 est une stratégie basée sur le numérique et la connectivité massive, qui s'appuie sur des technologies multiples et permet la prise de décision en temps réel et décentralisée conduisant à une maximisation de la création de valeur par l'émergence de nouvelles capacités pour les systèmes*

(surveillance, contrôle, optimisation et autonomie), une reconfiguration agile des processus et une personnalisation des produits et services (Danjou, Rivest, & Pellerin, 2017b). Ainsi, si l'industrie 4.0 vise à améliorer les systèmes en termes d'agilité, elle remet aussi en cause le modèle d'affaires des entreprises en matière de maîtrise des technologies. À titre d'exemple, la surveillance massive des processus transforme la manière dont est réalisée la maintenance. D'autre part la remise en cause touche également la conception des produits, processus et services. En effet, la frontière entre produit et service devient par exemple si poreuse que l'acquisition d'un produit est en réalité principalement motivée par les services qu'il procure.

### 2.2.2 Approche de classification technologique

Il existe de multiples approches d'analyse de l'industrie 4.0 relevant par exemple des capacités, des technologies ou de l'architecture des solutions 4.0. Tout d'abord, de par leurs connectivités nouvelles, les produits, processus et services acquièrent de nouvelles capacités d'action échelonnées en quatre niveaux : surveillance, contrôle, optimisation, autonomie (Danjou et al., 2017a). Comme présenté par la Figure 2.2, chacune des capacités ne peut être acquise qu'à la condition de maîtriser la précédente et l'utilisation des technologies numériques correspondantes. Cependant, il est essentiel de noter que ces niveaux ne sont pas synonymes de but à atteindre et que l'autonomie n'est pas une fin en soi. En effet l'investissement dans les capacités des technologies doit se faire au regard du besoin.

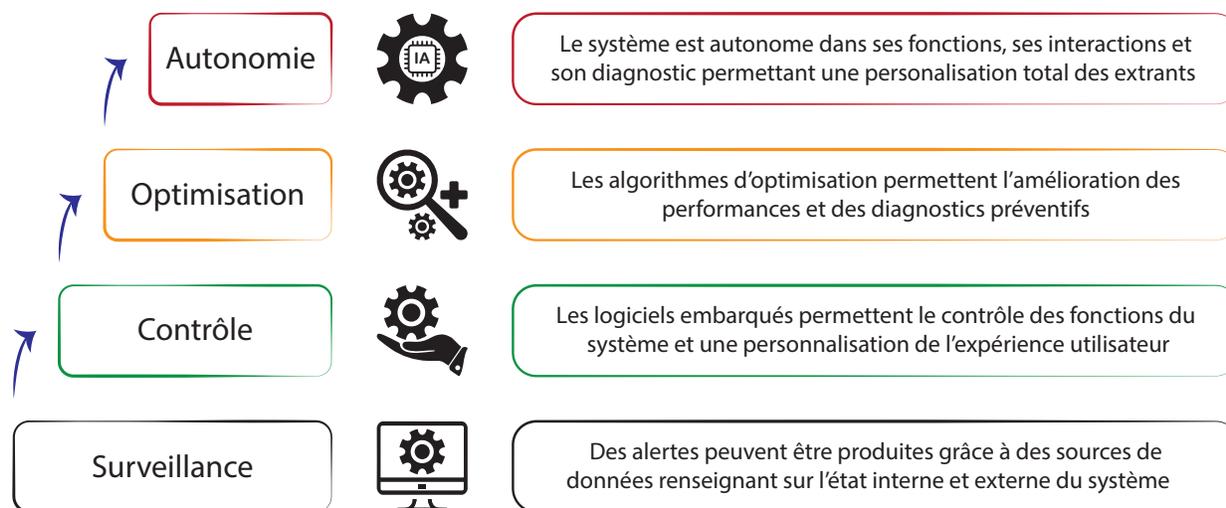


Figure 2.2 Figure récapitulative des capacités – adaptée de Danjou et al. (2017a)

Une myriade de technologies est disponible et il est judicieux de les combiner pour maximiser l'efficacité des systèmes technologiques mis en œuvre. Néanmoins, des similarités en termes de propriétés existent entre ces différentes technologies. C'est pourquoi des classifications ont émergé. Ces regroupements ont pour intérêt principal de synthétiser les technologies autour de caractéristiques communes. Un premier point de vue (Danjou et al., 2017a) classe les technologies dans les 10 groupes suivants :

- Méga-données et analyse (Big-Data)
- Intelligence artificielle (IA)
- Systèmes cyber-physiques (CPS)
- Communication intermachines (M2M)
- Machines autonomes
- Simulation
- Internet des objets (IoT)
- Cybersécurité
- Infonuagique (Cloud)
- Réalité augmentée (AR)

Un autre point de vue prend le parti de classer ces technologies de manière très large en considérant que l'industrie 4.0 repose sur trois piliers : le matériel, le réseau et les logiciels (Petrasch & Hentschke, 2016). Bien qu'utiles, ces classifications permettent surtout d'apprécier le point de vue des chercheurs qui les développent. Dans les deux exemples cités, le premier est davantage orienté technologie tandis que le second est plus orienté architecture.

### 2.2.3 Construction 4.0

La construction 4.0 est définie par l'application des concepts de l'industrie 4.0 dans le secteur très spécifique de la construction. Elle exploite plus particulièrement les concepts liés aux mégadonnées, à la fabrication digitale, à l'IA et aux technologies de surveillance notamment géographique et de suivi des matériaux (Danjou et al., 2020). Ce secteur atypique de l'industrie présente des besoins spécifiques, en particulier sur deux axes : l'approvisionnement vers le chantier et la logistique sur le chantier. Pour ce qui est de la logistique de chantier, l'industrie de la construction est amenée à gérer trois types de flux physiques – celui des ressources humaines, des ressources matérielles (consommables) et des outils et équipements de chantier. Cette gestion est réalisée par le biais de trois actions : localiser, allouer et sécuriser. Ainsi, il est possible de recenser les technologies ayant le plus fort potentiel pour la construction en vue de leur application,

notamment via une classification recoupant les trois flux physiques et les trois actions. (Dallasega, Rauch, & Linder, 2018; Danjou et al., 2020; Oesterreich & Teuteberg, 2016).

Dans la plupart des entreprises du secteur, la construction 4.0 est associée au « Building Information Modeling » (BIM) – en français modélisation des informations du bâtiment (Oesterreich & Teuteberg, 2016). En effet, le BIM s'intéresse pour sa part aux flux de données et consiste en l'agrégation des informations de construction à la modélisation numérique 3D de l'édifice sous forme de dimensions supplémentaires. Celles-ci sont relatives au cycle de vie du bâtiment, par exemple l'ajout de l'échéancier (dimension de temps) et celui du budget (dimension de coût) lors de la phase de planification de la construction. Ces dimensions supplémentaires ont pour but de faciliter le partage et la visualisation des données. Il est à noter que le terme BIM peut à la fois faire référence à la méthode de gestion de l'information sous-jacente au partage d'informations ainsi qu'à la modélisation 3D en elle-même (Watson, 2011). Si l'exclusivité de l'association entre l'industrie 4.0 et le BIM est hasardeuse, ce modèle est cependant un vecteur non négligeable pour le développement de la construction 4.0. Néanmoins, certaines utilisations de technologies dites 4.0, notamment celles en rapport avec la sécurité des travailleurs, ne s'inscrivent pas dans le BIM. En effet, la construction 4.0 va bien au-delà du champ d'application du BIM.

Cette première partie a permis de découvrir les tenants et les aboutissants de l'industrie 4.0. Il a été possible de constater que la 4<sup>e</sup> révolution industrielle se base sur une myriade de données alimentées par de multiples technologies, qui elles-mêmes réutilisent les décisions prises à partir des données. N'ayant a priori pas vocation à représenter l'industrie 4.0, il est judicieux de s'interroger quant à l'aptitude des formalismes de cartographie à modéliser les processus 4.0. C'est pourquoi les sections suivantes poursuivront la revue de littérature en s'attelant à faire la lumière sur les capacités des cartographies à représenter les processus de l'industrie 4.0, mais aussi à quantifier, au travers d'indicateurs de performance, leurs améliorations au fur et à mesure de leur évolution.

### **2.3 Méthodologie de recherche bibliographique pour la cartographie**

Maintenant que les concepts de l'industrie 4.0 ont pu être énoncés, l'état de l'art va se pencher plus en détail sur la cartographie des processus. Une méthode de sélection d'articles a été employée pour cette revue de littérature. Le processus a été réalisé en trois étapes. Tout d'abord la recherche de littérature scientifique a été réalisée à partir de la base de données Scopus et prend en

considération le titre, le résumé et les mots-clés des articles référencés. Comparé à d'autres bases de données, Scopus a été privilégié pour sa vaste couverture et son nombre très élevé de titres référencés. Puis une phase de filtrage des résultats pour atteindre les contenus intéressants a été menée par la lecture des résumés, des introductions et conclusions. Finalement, la lecture intégrale des articles sélectionnés a permis de valider la pertinence de l'article et d'en extraire les éléments présentés dans cette revue de littérature.

Le premier type de requête (R1) effectuée dans la base de données Scopus se présente en deux parties. La première partie de la requête intègre deux concepts. Le premier correspond à la cartographie des processus. Le second concerne l'industrie 4.0. Les mots-clés de chaque concept sont détaillés dans le Tableau 2.1 suivant. En ce qui concerne l'industrie 4.0, les mots-clés utilisés sont extraits d'un projet de recherche précédent qui recense et justifie chaque mot-clé employé pour ce concept (Doulfarah, 2019).

Tableau 2.1 Mots-clés des concepts : modélisation et industrie 4.0

Modélisation	Industrie 4.0	
bpm	"advanced manufacturing"	"intelligent manufacturing"
"business process modeling"	"chinese manufacturing 2025"	"made-in-china 2025"
cartograph*	"digital factor*"	"make in india"
map*	"digital manufacturing"	"manufacturing 4.0"
model*	"factor* of the future"	"manufacturing renaissance"
track	"high value manufacturing"	"smart industr*"
	I4	smartindustr*
	I4.0	"smart factor*"
	"industr* 4.0"	smartfactor*
	"industrial internet*"	"smart manufacturing"
	"industr* of the future"	"smart production"
	"integrated industr*"	

En complément des deux premiers concepts, la deuxième partie de la requête est propre à chaque formalisme de cartographie composée de mots-clés y faisant référence. Ces mots-clés sont présentés dans le Tableau 2.2 Mots-clés de chaque formalisme ci-dessous. Au total, il y a donc neuf requêtes de type R1.

Tableau 2.2 Mots-clés de chaque formalisme

Type de modélisation								
ANSI	EPC	BPMN	VSM	UML	SysML	DFD	MOT	SADT / IDEF
ANSI	EPC	BPMN	VSM	UML	SysML	DFD	MOT	IDEF
American National Standards Institute	Event Process Chain	Business Process Model and Notation	Value Stream Mapping	Unified Modeling Language	Systems Modeling Language	Data Flow Diagram	Modèle Organisationnel de Traitement	Integration Definition for Function Modeling
Institut national de normalisation américain	Chaîne de processus événementiels	Modèle de procédé d'affaire et notation	Cartographie des chaînes de valeur	Langage de Modélisation Unifié	Langage de Modélisation des Systèmes	Diagrammes de flux de données	Merise	Structured Analysis and Design Technics
	Event Driven Process Chain							SADT

Finalement, les concepts liés à l'industrie 4.0 ne faisant leur apparition qu'à partir de 2010, les articles antérieurs à cette date ne seront pas traités. Ainsi, pour chaque formalisme, une requête dans Scopus a été effectuée en recherchant les mots clés dans le titre, le résumé et les Mots-clés des articles de la base de données. Pour illustrer notre propos, la requête R1 pour le formalisme de l'American National Standards Institute (ANSI) est la suivante :

*TITLE-ABS-KEY (ansi OR "american national standards institute" OR "institut national de normalisation américain") AND TITLE-ABS-KEY (bpm OR "business process modeling" OR cartograph\* OR map\* OR model\* OR track) AND TITLE-ABS-KEY ("advanced manufacturing" OR "chinese manufacturing 2025" OR "digital factor\*" OR "digital manufacturing" OR "factor\* of the future" OR "high value manufacturing" OR I4 OR I4.0 OR "industr\* 4.0" OR "industrial internet\*" OR "industr\* of the future" OR "integrated industr\*" OR "intelligent manufacturing" OR "made-in-china 2025" OR "make in india" OR "manufacturing 4.0" OR "manufacturing renaissance" OR "smart industr\*" OR smartindustr\* OR "smart factor\*" OR smartfactor\* OR "smart manufacturing" OR "smart production") AND (PUBYEAR > 2009) AND (PUBYEAR < 2020)*

Pour finir, cette revue s'intéressera d'autre part aux indicateurs de performance utilisés dans la modélisation des processus d'affaire pour le 4.0. La méthodologie de recherche présentée précédemment a été reprise. Aux deux concepts précédemment identifiés, de modélisation des processus et d'industrie 4.0, a été ajouté un troisième concept, d'indicateur. Ce concept est construit à partir des trois mots-clés suivants : « monitoring indicator », « tracking indicator » et « performance indicator ». La dernière requête (R2) employée est donc la suivante :

*TITLE-ABS-KEY ("monitoring indicator" OR "tracking indicator" OR "performance indicator") AND TITLE-ABS-KEY (bpm OR "business process modeling" OR cartograph\**

*OR map\* OR model\* OR track) AND TITLE-ABS-KEY ("advanced manufacturing" OR "chinese manufacturing 2025" OR "digital factor\*" OR "digital manufacturing" OR "factor\* of the future" OR "high value manufacturing" OR I4 OR I4.0 OR "industr\* 4.0" OR "industrial internet\*" OR "industr\* of the future" OR "integrated industr\*" OR "intelligent manufacturing" OR "made-in-china 2025" OR "make in india" OR "manufacturing 4.0" OR "manufacturing renaissance" OR "smart industr\*" OR smartindustr\* OR "smart factor\*" OR smartfactor\* OR "smart manufacturing" OR "smart production")*

Les résultats des neuf requêtes R1 concernant les différents formalismes de cartographie seront développés dans la Section 2.4.1, tandis que ceux de la requête R2 concernant les indicateurs de performance seront exprimés Section 2.4.2. Les documents résultants des deux requêtes sur la base de données Scopus ont été notés, sur une échelle de cinq étoiles au regard de leur pertinence vis-à-vis de la recherche effectuée, grâce à trois étapes de filtrage. Ces trois étapes, présenté sur la Figure 2.3, portent sur différents éléments comme la langue et le résumé (filtrage 1), l'introduction, la conclusion et la structure du document (filtrage 2) et finalement le contenu (filtrage 3).

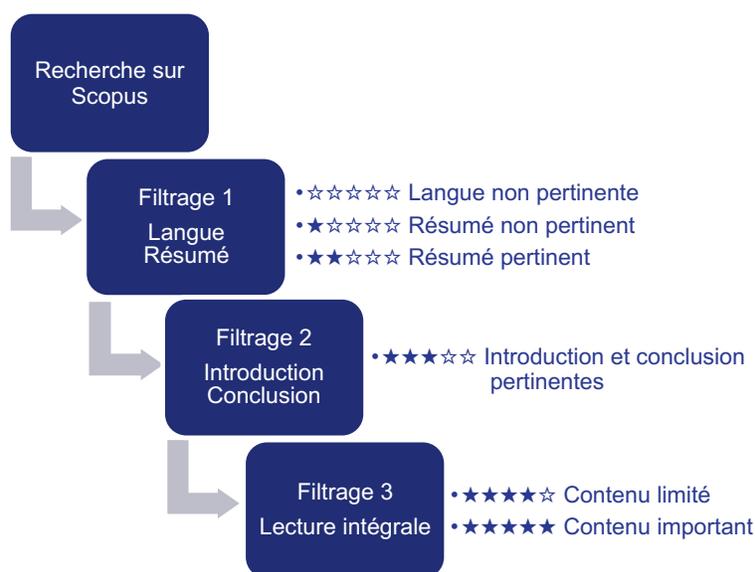


Figure 2.3 Méthodologie de filtrage et de notation des documents résultants des deux requêtes

Du point de vue quantitatif (Figure 2.4), sur la centaine de documents trouvés suite aux requêtes R1, une vingtaine sont pertinents. De même, sur la cinquantaine de résultats de la requête R2, une dizaine sont adéquats.

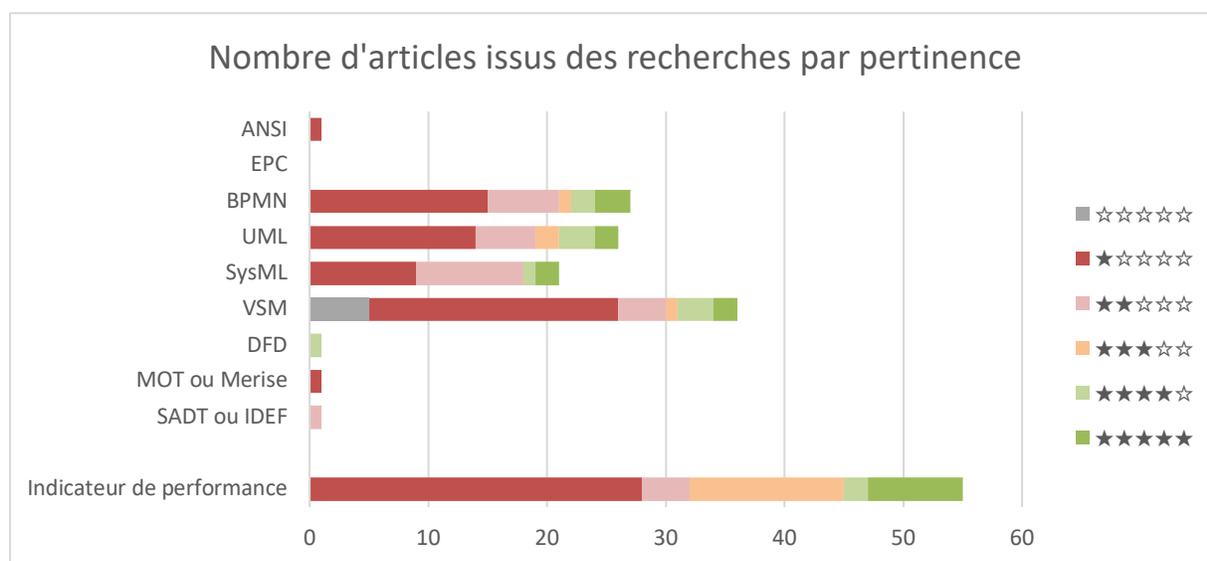


Figure 2.4 Résultats quantitatifs des neuf requêtes R1 et de la requête R2

## 2.4 Cartographie des processus

Les techniques de modélisation des processus, aussi appelées cartographie des processus ou « Business Process Modeling » (BPM), sont utilisées pour représenter schématiquement un processus au travers d'une palette de pictogrammes. Les possibilités du formalisme de cartographie découlent directement de ces symboles plus ou moins nombreux et complexes. Leur connaissance est une condition sine qua non à la réalisation et à la compréhension des modélisations. Les cartographies sont principalement utilisées pour modéliser les processus d'affaires d'une entreprise, dans le but d'identifier les points faibles et en tirer des pistes d'amélioration. Pour cela, la représentation du processus peut être agrémentée d'indicateurs de performance permettant de quantifier son efficacité. Ce projet de recherche visant à accompagner l'implantation de l'industrie 4.0, la mise en évidence de l'efficacité de cette transformation par le biais d'indicateurs est indispensable. C'est pourquoi la deuxième partie de cette section s'y intéressera spécifiquement.

Dans la plupart des cas, il existe différents niveaux d'abstraction dans la modélisation, chacun correspondant à un certain niveau de détail. Le nombre de niveaux n'est pas fixe et dépend du niveau de précision souhaité et de la complexité du processus modélisé. Généralement, on considère les 4 niveaux suivants : la famille de processus, le processus, l'activité et la tâche élémentaire. Ce dernier niveau est indivisible. Pour faciliter la lecture du BPM, une numérotation des processus, activités et tâches est mise en place. En outre, la conception de la cartographie est

généralement un processus participatif réalisé en groupe de travail. Ce groupe doit être constitué de parties hétérogènes impliquées dans la chaîne de valeur du processus cible. Le processus est habituellement constitué de 4 étapes (Kettinger, Teng, & Guha, 1997) :

- La définition de la portée de la cartographie;
- La collecte d'informations;
- La modélisation au brouillon puis via des outils informatiques; et
- La validation.

### 2.4.1 Les formalismes usuels de cartographie et leurs améliorations

Il existe différents standards de cartographie connus. La suite de cette revue de littérature s'attardera sur les neufs formalismes les plus couramment utilisés. Il sera particulièrement intéressant de considérer les différents flux qui peuvent être représentés et en particulier le flux physique, le flux d'informations et de données, mais aussi la prise en compte de la structure organisationnelle et des différentes logiques de représentation pouvant être employées avec les divers formalismes. En effet, un formalisme pourra être considéré favorable au 4.0 s'il permet la représentation la plus simple et la plus claire de systèmes complexes et disparates. Pour chacun des formalismes, il sera fait état, après une présentation générale, des améliorations qu'ils apportent relativement à la cartographie de l'industrie 4.0 et qui sont référencées dans la littérature.

#### 2.4.1.1 Formalisme ANSI – American National Standard Institute

L'American National Standard Institute (ANSI) est à l'origine du formalisme éponyme. Composé d'une dizaine de pictogrammes, ce formalisme est l'un des plus répandus notamment du fait de sa simplicité. Il permet de modéliser de manière assez détaillée des processus comprenant flux physiques et flux d'informations en identifiant en outre les intervenants. De plus, il permet la modélisation de processus décisionnels. Cependant, ce formalisme ne tient pas compte des notions de temps et de coûts et ne permet donc pas d'établir de manière explicite des mesures de performance du processus.

Pour ce qui est des modélisations connexes au formalisme ANSI pour l'industrie 4.0, on trouve dans la littérature la norme de la « International Society of Automation » (ISA) : l'ISA-95

(International Society of Automation). Cette norme est un vocabulaire et une structure standard pour la conception de systèmes de production (Cadavid, Alférez, Gérard, & Tessier, 2015).

#### **2.4.1.2 Formalisme EPC – Event Process Chain**

Le formalisme « Event Process Chain » (EPC) – en français « chaîne de processus événementiels » – désigne un standard qui utilise une logique événementielle. Initialement utilisée pour le développement de systèmes d'information, son utilisation s'est élargie et reste un incontournable de par sa simplicité pour l'implantation des systèmes de gestion de systèmes intégrés. Le standard possède une dizaine de pictogrammes permettant un niveau de description assez détaillé tout en restant aisément compréhensible par des gestionnaires. Il permet de modéliser les flux physiques, et met en évidence le flux d'informations et les intervenants. Cependant il ne permet pas non plus d'établir de mesures de performances et sa structure événementielle implique une certaine rigidité.

La littérature actuelle ne fait état d'aucune amélioration liée au formalisme EPC en lien avec les enjeux de l'industrie 4.0.

#### **2.4.1.3 Formalisme BPMN – Business Process Model and Notation**

Le formalisme « Business Process Model and Notation » (BPMN) – en français « modèle de procédé d'affaires et notation » – est un formalisme composé d'une trentaine de pictogrammes répartis en quatre catégories elles-mêmes divisées en sous-catégories. Ce grand nombre de pictogrammes permet un grand niveau de détail, mais apporte également une plus grande complexité. L'ergonomie des symboles rend toutefois son utilisation abordable. Ce formalisme, qui reprend les traits graphiques de l'ANSI, permet lui aussi de représenter les intervenants, les flux physiques et les flux d'informations. Bien qu'il ne soit pas possible de modéliser la structure organisationnelle ni de l'utiliser pour la modélisation du fonctionnement dégradé, il permet la modélisation des processus décisionnels.<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> Lucid Software Inc. (2020). Symboles et notation de diagramme BPMN. Tiré de [https://www.lucidchart.com/pages/fr/explication-des-symboles-bpmn#discovery\\_top](https://www.lucidchart.com/pages/fr/explication-des-symboles-bpmn#discovery_top)

Finally, the BPMN has become the standard notation for process modeling (Cadavid et al., 2015). Thus, a certain number of authors propose evolutions of BPMN for a better representation of the concepts of Industry 4.0. First, the « Industry 4.0 Process Modeling Language » (I4PML) is a graphical extension of BPMN2.0 based on UML bringing a dozen of pictograms serving to identify « 4.0 aspects », such as IoT, the Cloud, data, etc. I4PML is accompanied by a method called « Industry 4.0 Process Modeling Method » (I4PMM) facilitating its implementation. This methodology consists of four steps: the identification of needs, the assignment of 4.0 aspects and then the modeling with I4PML, the specification of process data and finally the verification of the model. (Petrasch & Hentschke, 2016). The « Performability-enabled BPMN » (PyBPMN) allows to fill the gaps of BPMN in terms of flexibility and characterization (performance and reliability) notably for CPS and IoT. To do this, this model decomposes systems into seven classes of objects (executor, CPS, component, central unit, actuator and sensor, communication interface and data reference). These objects, provided with attributes representing their characteristics, are interrelated. PyBPMN goes hand in hand with eBPMN which allows its informatization (Bocciarelli, D'Ambrogio, Giglio, & Paglia, 2017). For its part, the extended-BPMN enriches BPMN with a set of pictograms, the goal being the application specific to the manufacturing domain. The three main additions allow to specify the resources (components) necessary for the realization of a manufacturing activity (operation). These two elements are linked by an association arrow (Ahn & Chang, 2018). On the other hand, the « Subject-oriented Business Process Management » (S-BPM) addresses the gaps of BPMN concerning IoT, thanks to a representation focused on communication between subjects. To do this, this representation is composed of two diagrams. The first shows the interaction between subjects while the second is interested in representing the behaviors of subjects (Venkatakumar & Schmidt, 2019). Finally, also linked to BPMN, the « Reference Architectural Model of Industry 4.0 » (RAMI 4.0) is a 3D modeling solution of the organization of a product along three axes: information and communication technologies, the value flow of its life cycle and the hierarchical levels of use (Suri, Cadavid, Alferez, Dhouib, & Tucci-Piergiovanni, 2017). Finally, the BPMN 2.0 Based Ontology (BOO), an ontology for process modeling based on BPMN 2.0 has come into being (Annane, Aussenac-Gilles, & Kamel, 2019).

#### 2.4.1.4 Formalisme UML et SysML – Unified and Systems Modeling Language

« L’Unified Modeling Language » (UML) – en français « langage de modélisation unifié » – est un langage de modélisation graphique orienté objet et développé dans le but d’obtenir une méthode normalisée pour la modélisation des systèmes. Il est composé de 14 diagrammes hiérarchiquement dépendants qui se complètent mutuellement. Ils permettent la modélisation d’un projet tout au long de son cycle de vie. Ces diagrammes peuvent être regroupés en trois familles : diagrammes de structure, diagrammes de comportement et diagrammes d’interaction. Dans le cadre du BPM, on utilise principalement le diagramme d’activités, qui fait partie des diagrammes comportementaux. La suite de cette revue de littérature utilisera le terme UML pour désigner ce diagramme. Ce diagramme précis est composé d’une quinzaine de pictogrammes. De manière générale, l’UML permet de modéliser l’ensemble des processus, qu’ils soient physiques ou d’informations, avec une très grande précision. Cependant il faut alors faire des allers-retours entre les différents diagrammes, ce qui complexifie énormément la modélisation.<sup>2</sup>

La principale évolution de l’UML est le « Systems Modeling Language » (SysML) – en français « langage de modélisation des systèmes ». Il s’agit en fait d’un profil de l’UML, c’est-à-dire une extension permettant la personnalisation du modèle de sorte à l’adapter à un domaine d’application particulier. Néanmoins de par sa grande utilisation, cette modélisation est en quelque sorte devenue une petite sœur à part entière de l’UML. Cette modélisation reprend les principaux diagrammes de l’UML, mais se veut plus simple et davantage orientée vers l’ingénierie des systèmes complexes quand l’UML est majoritairement orienté informatique<sup>3</sup>. De par l’intrication de ces deux modélisations, la suite de ce mémoire les considérera ensemble.

Dans le reste de la littérature, il n’existe que peu d’évolutions de l’UML favorisant l’industrie 4.0. Tout d’abord, il existe une amélioration superficielle de l’UML qui se base sur la possibilité du formalisme de créer des profils. Ce profil appelé « UML for IoT » (UML4IoT) permet d’enrichir

---

<sup>2</sup> Lucid Software Inc. (2020). Qu’est-ce qu’un diagramme d’activité UML. Tiré de <https://www.lucidchart.com/pages/fr/tutoriel-sur-les-diagrammes-dactivites-uml>

<sup>3</sup> Object Management Group®, OMG®. (2020). About the OMG systems modeling language specification version 1.6. Tiré de <https://www.omg.org/spec/SysML>

l'UML dans le but de faciliter le passage entre la modélisation d'éléments IoT en UML et son informatisation pour sa mise en œuvre, grâce à l'ajout de stéréotypes spécifiques à l'IoT au niveau des attributs des objets introduits par l'UML (Christoulakis & Thramboulidis, 2016). D'autre part, on trouve un Meta-Model à quatre niveaux allant d'une échelle abstraite (Level 0) à une échelle concrète (Level 3) et utilisant les notations de l'UML. Ce métamodèle composé de deux parties, produit et ressource, permet une modélisation plus précise de ces deux éléments dans le cadre de l'industrie 4.0 (Brecher et al., 2018). Finalement, le concept d'industrie 4.0 est intrinsèquement lié au domaine de la cybersécurité et de la protection des données. Le PrivacyUML (PrivUML) aborde concrètement ce problème sous l'angle d'une modélisation plus fine de l'organisation de la protection des données. Cette modélisation permet de définir les contraintes de l'accès à l'usage des données en fonction du rôle du demandeur, de l'activité et du contexte de la demande et enfin de la surveillance hiérarchique de l'autorisation (Mokhtari, Abou El Kalam, Benhadou, & Medroumi, 2019). Le SysML a aussi prouvé son potentiel à l'endroit de l'industrie 4.0. En effet, l'emploi du SysML s'est vu préconisé en comparant les quatre formalismes de cartographie les plus performants pour la prise en compte des décisions dans l'industrie 4.0 parmi le « Systems Modeling Language » (SysML), le BPMN, l'IDEF et le « Core Manufacturing Simulation Data » (CMSD). Cette comparaison a pour but de déterminer le langage de représentation du processus « Just-In-Time Information Retrieval » (JITIR) – en français « récupération d'informations en temps réel » – outil développé pour faciliter la prise de décision en temps réel, qui est une caractéristique clé de l'industrie 4.0 (Constantinescu, Francalanza, & Matarazzo, 2015). Par ailleurs, pour la prise en compte de la complexité des CPS et des impacts du changement lors de la mise en place de « Cyber-Physical Production System » (CPPS) – en français « système de production cyber-physique » – un modèle de processus de migration a été conçu pour identifier les différentes étapes permettant d'atteindre une vision à long terme. La détermination de la solution optimale est facilitée par l'ajout de « tags » de couleurs - étiquette en français – dans les modélisations en SysML, pour identifier les changements. Dans les représentations, ces tags prennent concrètement la forme du code couleur suivant : vert pour les nouveaux éléments et jaune pour ceux hérités du processus actuel, mais modifiés par rapport à celui-ci (Cala, Luder, Vollmar, & Foehr, 2017).

### 2.4.1.5 Formalisme VSM – Value Stream Mapping

La « Value Stream Mapping » (VSM) – en français « cartographie des chaînes de valeur » – est un type d'organigramme permettant de modéliser, analyser et améliorer les processus menant à la livraison d'un bien ou d'un service. C'est l'un des formalismes les plus couramment utilisés dans les entreprises. En effet, c'est un élément clé de la méthodologie LEAN pour détecter et éliminer les gaspillages. La VSM prend en considération les flux physiques, mais surtout les flux d'informations. Ce formalisme prend le parti d'utiliser le point de vue de la valeur ajoutée et non celui de l'effort. La VSM utilise une palette d'une trentaine de pictogrammes répartis en quatre catégories : processus, matériel, information, symboles généraux. Ce standard est néanmoins complexe et peut devenir lui-même source de gaspillage s'il n'est pas maîtrisé.<sup>4</sup>

Dans la littérature, les améliorations de la VSM sont principalement portées par le concept de VSM 4.0. Cette évolution introduit quelques nouveaux symboles, permettant de caractériser les données de chaque activité et de leur affecter un média de stockage et un usage. Cette représentation permet surtout d'enregistrer facilement des informations sur les systèmes étudiés dans le but d'éliminer les gaspillages informatiques (Meudt, Metternich, & Abele, 2017). La VSM 4.0 peut aussi être étudiée en faisant la distinction entre ses deux éléments constitutifs que sont la « Value Stream Analysis 4.0 » (VSA 4.0) qui a trait à la modélisation et à l'analyse de l'existant et la « Value Stream Design 4.0 » (VSD 4.0) qui tend à concevoir les solutions idéales et futures. Si la VSA 4.0 vise à identifier les gaspillages informatiques, la VSD 4.0 va plus loin en cherchant une solution concrète (Hartmann, Meudt, Seifermann, & Metternich, 2018). La VSM4.0 se voit aussi étendue en termes de pictogrammes avec « l'extended VSM4.0 » permettant en particulier la prise en compte de trois caractéristiques : la fréquence, la précision et la résolution des informations (Busert & Fay, 2019). Finalement, la méthode « Visualizing, Analyzing and Assessing of Information Processes » (VAAIP), vient compléter l'analyse de la VSM 4.0 en systématisant les déclarations qualitatives et quantitatives relatives aux informations. De plus, la VAAIP définit trois indicateurs qui permettent de quantifier la maturité du processus aussi bien à l'échelle globale que locale

---

<sup>4</sup> Lucid Software Inc. (2020). Qu'est-ce qu'une cartographie de la chaîne de valeur (VSM) ? Tiré de <https://www.lucidchart.com/pages/fr/quest-ce-que-la-cartographie-des-chaines-de-valeur>

(Molenda, Jugenheimer, Haefner, Oechsle, & Karat, 2019). Outre la VSM 4.0, on peut noter l'apparition du concept de « Sustainable Value Stream Mapping » (SVSM) dans le but d'améliorer la VSM en lui incorporant des notions relatives à l'environnement et à la société (Phuong & Guidat, 2018).

#### **2.4.1.6 Formalisme DFD – Data Flow Diagram**

Le « Data Flow Diagram » (DFD) – en français « diagramme de flux de données » – schématise l'ensemble des flux d'informations d'un processus ou d'un système. Les DFD varient en deux systèmes dénommés d'après les deux noms de leurs créateurs : « Yourdon et Coad » pour la première variante et « Gane et Sarson » pour la seconde. Dans les deux cas, le diagramme est constitué de seulement quatre pictogrammes pour représenter les processus, les données, les flux ainsi que les lieux de stockage. De par son nombre réduit de symboles, le DFD est très visuel et adapté à tous les publics. Cependant, il ne permet pas de cartographier les intervenants ni les processus décisionnels et reste limité pour les cas complexes.<sup>5</sup>

Le DFD ne se voit quant à lui pas amélioré dans la littérature analysée. Cependant, il est à la base d'une « Toolbox Industrie 4.0 » permettant d'évaluer la position d'une entreprise par rapport à son développement 4.0, grâce à des échelles de maturité relative à différentes caractéristiques (Wang, Dittmann, & Anderl, 2019).

#### **2.4.1.7 Formalismes MOT et SADT / IDEF**

D'autres formalismes de cartographie existent, mais se limitent à l'étude de cas assez particuliers. Deux exemples peuvent être cités. D'une part le « Modèle organisationnel de traitement » (MOT) est une méthode d'analyse de conception et de gestion de projets informatiques. Cette méthode de cartographie a été principalement utilisée pour l'informatisation massive des organisations. Cependant, elle n'est pas adaptée aux projets transverses aux organisations.

D'autre part le formalisme « Structured Analysis and Design Technics » (SADT), également connu sous le label « Integration Definition for Function Modeling » (IDEF), est un standard de

---

<sup>5</sup> Lucid Software Inc. (2020). Qu'est-ce qu'un diagramme de flux de données ? Tiré de <https://www.lucidchart.com/pages/fr/quest-ce-quun-diagramme-de-flux-de-donnees>

description graphique hiérarchisée de systèmes complexes par analyse fonctionnelle. Néanmoins, il ne permet pas de représentation séquentielle ou d'opération booléenne. Ces deux exemples étant moins fréquemment utilisés, aucun usage en lien avec l'industrie 4.0 n'a été décrit dans la littérature scientifique.

#### 2.4.2 Indicateurs de performance en cartographie des processus

Après avoir présenté l'état de l'art traitant des améliorations des cartographies actuelles en lien avec l'industrie 4.0, il est à présent temps de regarder dans la littérature s'il existe des études présentant des indicateurs de performance pertinents dans le cadre de la modélisation relative à l'industrie 4.0. De tels indicateurs sont d'excellents moyens de comparer les représentations entre elles et notamment entre plusieurs itérations d'un même processus. Pour ce faire, il est important d'étudier la performance actuelle et ainsi pouvoir être en mesure de proposer des solutions aux faiblesses décelées. C'est là que les « Key Performance Indicators » (KPI) – en français indicateurs de performance clé – interviennent. On opère alors la deuxième recherche sur la base de données Scopus®. La littérature scientifique fourmille de KPI (près de 25000 sur Scopus®) et particulièrement la littérature relative au génie industriel qui a pour vocation l'amélioration de la performance des processus. Le but de cette partie est donc de déterminer s'il existe en cartographie des KPI pertinents pour mesurer l'impact des changements introduits par l'industrie 4.0.

Tout d'abord, il existe des indicateurs très généraux qui quantifient l'efficacité et/ou l'efficience des actions dans une partie ou l'ensemble d'un processus. C'est notamment le cas de « l'Overall Equipment Effectiveness (OEE) – en français « efficacité globale des équipements » (Hwang, Lee, Park, & Chang, 2017). Pour être calculés, les KPI globaux ont la plupart du temps besoin de sous-KPI qui dépendent eux-mêmes d'autres KPI. Il est ainsi possible de les ordonner dans un diagramme dit de DuPont (Rolstadås, 1991). Une catégorisation aisée des KPI peut se faire sur l'aspect financier ou non. En effet, les indicateurs sont souvent rapportés à un impact économique, mais ce n'est pas toujours le cas (Kikolski, 2019). Il est aussi possible de classer ces indicateurs en fonction de leur sujet, à savoir s'il s'agit d'un produit ou d'un processus. Dans le domaine manufacturier, il est possible de classer ces indicateurs sur une échelle en fonction de leur endroit d'application sur quatre niveaux : contrôler à l'interne un système, évaluer la performance, assurer la performance, assurer la performance globale du système intelligent. D'autre part, des modèles d'ontologie ont été développés ayant pour objectifs de classer les KPI et leurs caractéristiques.

Ceci est particulièrement intéressant pour la recherche de KPI en fonction d'un usage (Roy, Li, & Zhu, 2015). Toujours dans le domaine manufacturier, des indicateurs pour les « Reconfigurable Manufacturing Systems » (RMS) - en français « Systèmes manufacturiers reconfigurables » – ont été identifiés (Park, 2017). Pour finir, des KPI propres au secteur de la construction existent. Ils sont pour la plupart relatifs à la consommation de ressources (Jena, Mishra, & Moharana, 2019). Ultimement, le cadre de référence dans le domaine des indicateurs de performance est la norme ISO22400 qui présente une vue d'ensemble sur l'utilité des KPI et les moyens de les construire. De manière très opérationnelle, cette norme recense, en fonction des usages, les KPI les plus communs pour le domaine manufacturier (Hwang et al., 2017; Kikolski, 2019; Supekar et al., 2019).

## **2.5 Analyse de la revue de littérature**

Fort de la connaissance apportée par la littérature scientifique, on ne peut que constater que la modélisation des processus en lien avec l'industrie 4.0 n'y a été que peu étudiée jusqu'à maintenant. En effet, bien que certains formalismes aient été légèrement améliorés dans le but de répondre aux enjeux de l'industrie 4.0, ces améliorations sont très ciblées sur leur domaine d'application. Il est vraisemblable qu'aucun des formalismes améliorés ne puissent se voir généralisé tel quel à l'ensemble du domaine de l'industrie 4.0.

Cependant, il est tout de même important de capitaliser les connaissances acquises sur les différents formalismes. Ainsi un tableau synthétique des caractéristiques des formalismes a été réalisé (Tableau 2.3). Il est constitué de caractéristiques présentes dans les formalismes et a priori nécessaires à la prise en compte pour l'application des modélisations à l'industrie 4.0, en particulier le flux de données, l'approche du temps réel et les indicateurs de performance. Ce tableau a pour but de comparer les différents formalismes et ainsi déterminer le formalisme le plus apte à être la base à une modélisation améliorée, capable de prendre en compte l'ensemble des enjeux de l'industrie 4.0. Il est à noter que les formalismes MOT et SADT/IDEF n'ont pas été incorporés à ce tableau, car ils présentent un potentiel d'application moindre. Le Tableau 2.3 permet de constater que, bien qu'aucun formalisme de cartographie des processus ne remplisse de manière positive l'ensemble des caractéristiques recensées, le BPMN se distingue malgré tout par des capacités accrues par rapport aux autres formalismes de cartographie. L'UML et son dérivé le SysML présentent aussi des outils intéressants bien que ceux-ci deviennent rapidement complexes de par

la multiplicité des diagrammes. Pour ce qui est des extensions des formalismes de cartographie, il est à noter que les améliorations relatives au formalisme VSM sont les plus prometteuses. Cependant, ce formalisme en tant que tel ne peut pas servir de base unique pour une cartographie 4.0, car il ne permet pas la cartographie de processus non linéaires.

Tableau 2.3 Synthèse des différents formalismes de cartographie

Formalismes de cartographie des processus							
Formalismes	Caractéristiques	ANSI	EPC	BPMN	UML/SysML	VSM	DFD
Flux	Physique	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
	Information (message)	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
	Données	Non	Oui	Oui	Oui	Non	Non
Organisation	Intervenant	Oui	Oui	Oui	Non	Non	Non
	Structure organisationnelle	Non	Non	Non	Non	Non	Non
Type de logique	Événementielle	Non	Oui	Oui	Non	Non	Non
	Décisionnelle	Oui	Non	Oui	Non	Non	Non
	Valeur ajoutée	Non	Non	Non	Non	Oui	Non
	Temps réel	Non	Non	Non	Non	Non	Non
	Base de données	Non	Oui	Oui	Oui	Non	Non
Performance	Temps	Non	Non	Non	Non	Oui	Non
	Coût	Non	Non	Non	Non	Non	Non
Complexité	Compréhension	Facile	Facile	Moyen	Difficile	Moyen	Facile
	Niveau de détails	Moyen	Moyen	Élevé	Élevé	Élevé	Faible
	Nombre de pictogrammes (Simplicité)	10	10	30	15	30	5
	Investissement Financier/Temporel/Humain	Faible	Moyen	Moyen	Élevé	Élevé	Faible
Nombre d'articles recensés via les requêtes R1		1	0	27	26 + 21	36	1

Ainsi, d'après notre revue de littérature, aucun des formalismes de modélisation actuels ni aucune de leurs évolutions ne semblent appropriés à la cartographie générale des processus dans le cadre des besoins accrus de prise en compte du flux d'informations pour l'industrie 4.0. Les pistes d'évolutions futures seront certainement à chercher du côté des formalismes présentant le plus d'opportunités que sont le BPMN et l'UML/SysML ainsi que des différentes évolutions de la VSM. Pour ce qui est des indicateurs de performance, bien qu'il en existe une grande quantité, il n'existe pas d'indicateurs propres à la comparaison successive permettant de percevoir l'impact des changements vers des processus 4.0. Cependant les connaissances acquises sur les KPI emmagasinées dans cette revue de littérature pourront être exploitées pour bâtir nos propres indicateurs. Les systèmes de classification des KPI ainsi que les critères de comparaison des formalismes de cartographie fourniront potentiellement des bases solides pour atteindre cet objectif.

## 2.6 Conclusion

En conclusion, cette revue de littérature a permis de recenser un corpus d'articles émanant de la littérature scientifique qui présentent les formalismes de cartographie des processus standards et leurs dérivés censés permettre l'intégration des enjeux de l'industrie 4.0 au travers d'une meilleure

prise en compte des flux d'informations et des processus décisionnels. Toutefois, quoique les améliorations présentées soient pertinentes dans leurs cas d'application propres, il semble qu'il n'existe actuellement pas de solution susceptible d'être généralisée en un modèle unique de cartographie 4.0 applicable à la grande majorité des processus de l'industrie 4.0.

Bien qu'ayant étudié plus d'une centaine d'articles, cette revue de littérature a cependant ses limites : le nombre de déclinaisons de type de modélisation des processus a rendu impossible une étude systématique de l'ensemble des formalismes de cartographie.

Dans tous les cas, cette revue de littérature ouvre la voie aux travaux de ce mémoire. En effet, il a pu être démontré qu'il existe des lacunes en termes de cartographie des processus relatifs à l'industrie 4.0 et notamment au niveau de la représentation de la structure organisationnelle, au niveau des aspects décisionnels, valeur ajoutée et temps réel, et finalement au niveau de la représentation de la performance. Il est donc approprié de développer et de tester un nouveau modèle de représentation permettant une meilleure visualisation des impacts des changements apportés par l'industrie 4.0. Ainsi, le chapitre suivant se servira des manques identifiés pour définir les objectifs spécifiques de notre recherche.

## CHAPITRE 3 OBJECTIFS ET MÉTHODOLOGIE

### 3.1 Introduction

Ce chapitre a pour but d'énoncer les objectifs de ce projet de recherche. Il vise aussi à détailler le processus méthodologique permettant de résoudre la problématique de recherche évoquée.

### 3.2 Objectifs de la recherche

L'analyse critique de la revue de littérature (Section 2.5) a permis de mettre en évidence les lacunes de la littérature actuelle. En effet, l'industrie 4.0 a besoin d'une meilleure représentation que celles actuellement disponibles, notamment en termes de visualisation des technologies 4.0, des données échangées et utilisées. Bien qu'il existe des améliorations répondant à certains besoins spécifiques, aucun formalisme de cartographie ne permet pour l'heure une représentation globale intégrant les subtilités de l'industrie 4.0. Ce constat nous amène à la question de recherche suivante :

*Comment peut-on représenter les transformations induites par l'implantation de solutions de l'industrie 4.0 au sein d'un modèle de cartographie de processus d'affaires ?*

De cette problématique découle un certain nombre de questions sous-jacentes auxquelles il est important de répondre. Quelles sont les caractéristiques de l'industrie 4.0 qu'il est nécessaire de prendre en compte dans cette nouvelle représentation ? Quels indicateurs permettent de qualifier et quantifier les impacts de l'implantation de pratiques 4.0 ? Ainsi, un premier objectif spécifique de cette recherche sera consacré à la détermination des besoins en cartographie de l'industrie 4.0 à mettre en œuvre dans la représentation développée. En se basant sur les résultats de ce premier objectif, le second objectif s'attachera à concevoir de manière concrète le modèle de cartographie 4.0. Finalement, le dernier objectif spécifique permettra de venir confronter le modèle développé à un cas d'application concret. Pour résumer, l'objectif principal de ce projet pourra être atteint par l'accomplissement des trois objectifs de recherche spécifiques suivants :

- Objectif de recherche n°1 : identifier les caractéristiques pertinentes pour modéliser des processus de l'industrie 4.0;
- Objectif de recherche n°2 : développer un modèle de cartographie 4.0; et

- Objectif de recherche n°3 : mesurer le degré d'applicabilité du modèle de cartographie sur un cas applicatif du secteur de la construction.

### 3.3 Démarche de recherche proposée

Une méthodologie de recherche couramment utilisée pour des projets appliqués a été choisie pour mener à bien ce projet de recherche. Il s'agit de la méthodologie de recherche « Design Research Methodology » (DRM). Cette méthode est structurée en quatre phases : tout d'abord la **phase 1** de **clarification de la recherche** par l'analyse de la littérature afin d'obtenir des objectifs de recherche. La **phase 2** permet d'améliorer la compréhension du problème grâce à une première **étude descriptive** d'une situation réelle. La **phase 3** correspond à la construction d'un modèle au cours d'une **étude prescriptive**. Finalement, dans la **phase 4**, intervient l'expérimentation du modèle sur un deuxième cas d'**étude descriptif**. Contrairement à des méthodes de type Recherche-Action ou Recherche-Intervention qui nécessitent d'aller jusqu'au bout de l'implantation pour pouvoir évaluer le résultat, la méthodologie DRM s'absout de l'obstacle principal que constitue la gestion de l'implantation chez le partenaire. En effet, la mise en pratique réelle chez un partenaire industriel peut amener son lot de difficultés en ce qui concerne la capacité d'action de l'industriel en termes de compétences, de temps et de ressources. Bien que la méthode DRM outre passe cet obstacle, la méthodologie n'en est pas moins théorique, mais reste cependant très concrète par sa structure, alternant des phases descriptives dépeignant des applications réelles et des phases prescriptives faisant émerger des solutions aux lacunes identifiées dans le contexte réel. Finalement, la méthodologie DRM est itérative au travers de multiples allers-retours entre la théorie et la pratique, offrant la possibilité de revenir à des étapes antérieures. Ainsi elle permet une vraie flexibilité tout en conservant une architecture rigoureuse (Blessing & Chakrabarti, 2009).

Les Chapitres 2, 4, 5 et 6 de ce mémoire de recherche correspondent respectivement aux quatre différentes phases présentes dans la méthodologie DRM. La Figure 3.1 illustre le parallèle entre les étapes de la méthodologie et les chapitres de ce mémoire. Les détails de la démarche seront présentés dans les sous-parties suivantes.

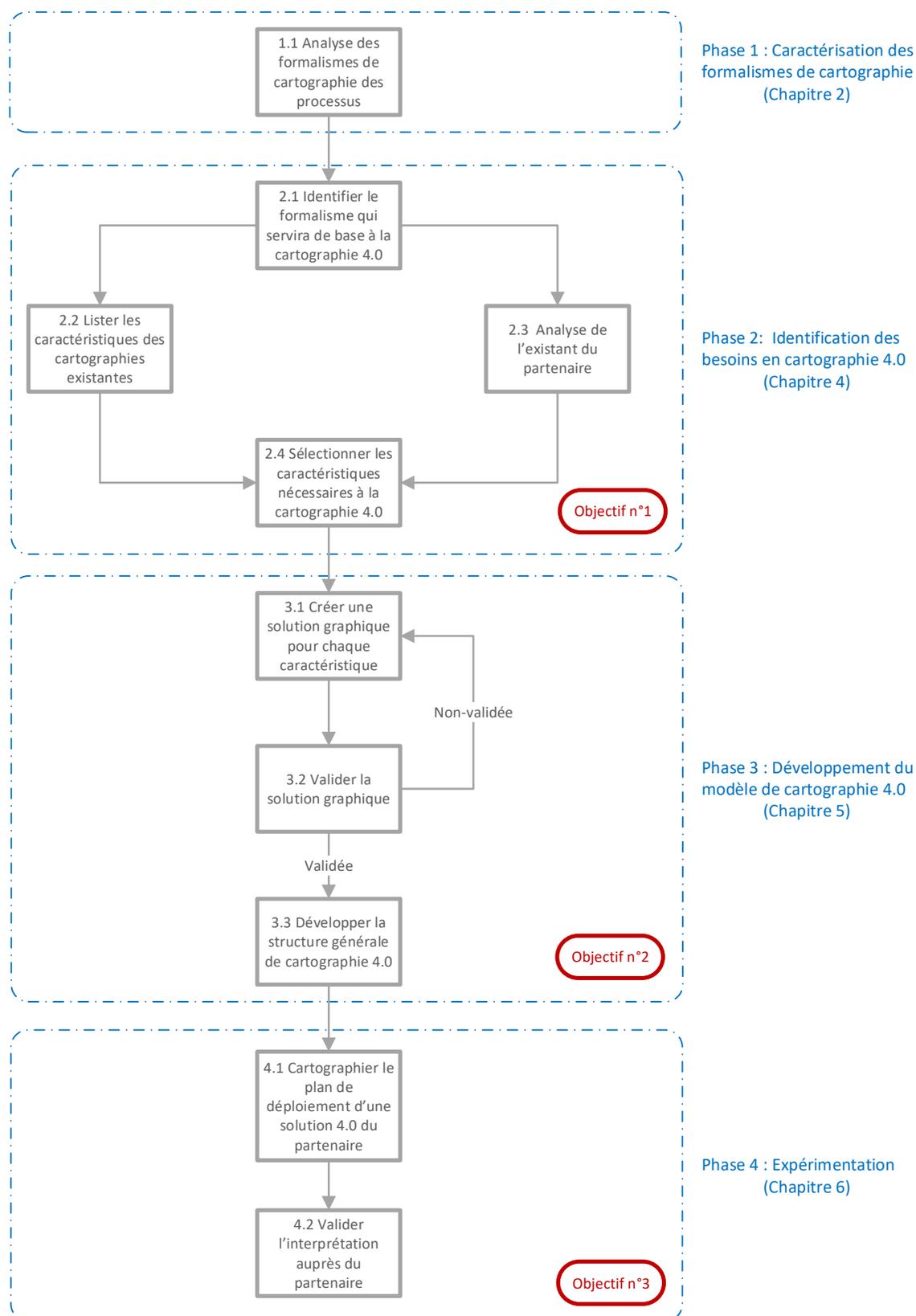


Figure 3.1 Méthodologie DRM appliquée au projet de recherche

### **3.3.1 Analyse de l'existant**

La revue de littérature présentée au Chapitre 2 correspond à la phase 1 de la méthodologie DRM. Lui succédant, la phase 2 correspond ainsi à l'analyse de l'existant. Dans le cadre de ce mémoire, cette partie vise à répondre à l'objectif n°1 de notre projet de recherche : déterminer les besoins d'une cartographie 4.0. La première étape de ce travail consistera à sélectionner un formalisme de cartographie qui servira de base au développement de notre propre représentation (activité 2.1 de la Figure 3.1). Le formalisme sera choisi à partir des conclusions de l'analyse de la littérature réalisée dans le Chapitre 2. La suite de ce travail, qui sera présentée dans le Chapitre 4 de ce mémoire, s'effectuera suivant deux axes.

#### **3.3.1.1 Exploitation de la littérature**

Le premier axe se base sur l'analyse des caractéristiques existantes qui ont été utilisées dans les améliorations répertoriées dans l'état de l'art (Section 2.4). Cette revue de littérature nous a permis de constater qu'un nouveau modèle de représentation des processus de l'industrie 4.0 était indispensable pour capter la complexité des interactions qui y prennent place. Ainsi, il s'agira dans cette section de faire fructifier les enseignements recueillis lors de cet état de l'art. Il conviendra d'isoler les caractéristiques pertinentes à la modélisation de l'industrie 4.0 existantes dans la littérature, afin de proposer des solutions permettant de satisfaire les problématiques identifiées (activité 2.2 de la Figure 3.1).

#### **3.3.1.2 Observation chez le partenaire**

Le second axe vise à produire une cartographie du processus de gestion de projets du partenaire industriel et en particulier les étapes de planification et de suivi de projets du partenaire, grâce au formalisme de base identifié précédemment. Un audit structuré des différents départements du partenaire intervenant dans la gestion de ses projets ainsi qu'une validation itérative seront indispensables pour obtenir cette modélisation. Cette cartographie du processus permettra de mettre en évidence les lacunes du formalisme dans sa forme actuelle et de fournir les pistes de réflexion quant aux caractéristiques à implanter dans la future cartographie 4.0 (activité 2.3 de la Figure 3.1).



### **3.3.1.3 Identification des caractéristiques à retenir**

De fait, la cartographie du processus industriel ne sera pas une fin en soi. Pour répondre au premier objectif de recherche, une étape de sélection des caractéristiques à prendre en compte est nécessaire. La Figure 3.2 présente plus en détail les étapes rigoureuses de sélection des caractéristiques (activité 2.4 de la Figure 3.1). Tout d'abord, il faudra éliminer les redondances de critères qui pourraient résulter d'un report brut des caractéristiques depuis la littérature et l'analyse du partenaire. Puis il s'agira de ne conserver que les caractéristiques dont le formalisme de base choisi ne permet pas déjà la prise en considération. Finalement, les besoins en représentation des processus 4.0 devront être mis en regard des besoins du partenaire.

### **3.3.2 Élaboration de la modélisation**

La troisième étape de la méthodologie est l'élaboration d'un modèle. Ce modèle permettra de répondre aux manques soulevés par la revue critique de la littérature et l'analyse de l'existant. Comme le permet la méthodologie DRM, ce modèle théorique sera élaboré en lien avec le terrain sous forme d'itérations successives entre l'analyse de l'existant et l'application. Des améliorations seront alors développées pour pallier les manques du formalisme de cartographie sélectionné en préambule de l'analyse de l'existant, liés à la problématique d'une meilleure prise en compte de l'industrie 4.0. Ces améliorations seront ensuite immédiatement appliquées au cas d'étude. Ces étapes fourniront une nouvelle modélisation qui servira de base à une nouvelle itération d'analyse des faiblesses existantes du modèle, de développement de solutions, puis d'application sur le cas d'étude. Le Chapitre 5 détaillera la modélisation finale proposée. Celle-ci présentera les solutions ainsi que leur validation graphique et permettra ainsi de répondre à notre objectif de recherche n°2.

### **3.3.3 Application du modèle sur un cas d'étude**

L'étape finale de la méthode DRM consiste en l'évaluation de l'applicabilité et de l'utilité du modèle développé dans l'étape prescriptive. Cette deuxième étape descriptive correspond à un retour au terrain puisqu'il se base, comme l'analyse de l'existant, sur les données empiriques du partenaire industriel. Comme expliqué dans la sous-section précédente, les retours aux cas d'études se feront de manière fréquente comme autorisé par la méthode DRM. Le chapitre 6 tâchera donc de répondre à l'objectif n°3 de notre mémoire consistant à valider notre modèle à travers l'application du modèle de cartographie développé. Pour ce faire, le chapitre présentera tout

d'abord l'application de la dernière version de la modélisation au cas d'étude concret de la mise en œuvre de la méthode de la valeur acquise appuyée par des technologies de l'industrie 4.0. Puis, reprenant la suite de l'approbation graphique accompagnant le développement du modèle, le cœur de validation sera présenté, consistant à vérifier la bonne interprétation de notre modèle.

### **3.4 Conclusion**

La méthodologie de recherche utilisée dans ce mémoire a été présentée dans ce chapitre. Après la revue de littérature précédemment présentée, les trois étapes de la méthode DRM, sur laquelle s'appuie notre méthode, permettront de répondre à nos objectifs de recherches. Une analyse de l'existant permettra tout d'abord d'approfondir la compréhension du contexte industriel du partenaire et de faire émerger les lacunes des modèles existants. Puis un modèle sera développé itérativement. Finalement, une étude d'applicabilité du modèle préalablement développé sera menée pour tenter de le valider. Ces étapes mêlent approches expérimentales et théoriques de manière structurée. Ainsi, les trois prochains chapitres (Chapitres 4, 5 et 6) présenteront de manière détaillée les trois phases restantes de la méthodologie DRM.

## CHAPITRE 4 ANALYSE DE L'EXISTANT

### 4.1 Introduction

Ce chapitre a pour but d'identifier les caractéristiques pertinentes pour la modélisation des processus de l'industrie 4.0. Il permettra de préciser les besoins du partenaire industriel vis-à-vis du sujet de notre recherche. Dans un premier temps, un formalisme de cartographie de base sera choisi parmi les standards de modélisation présentés dans la revue de littérature. Ce standard sera dans un second temps utilisé pour modéliser le processus actuel du partenaire et ainsi révéler les besoins du terrain. Dans un troisième temps, ce chapitre rebondira sur la revue de littérature en identifiant les caractéristiques qui concernent la modélisation des processus de l'industrie 4.0. Dans un dernier temps, les caractéristiques pertinentes seront rigoureusement sélectionnées.

### 4.2 Choix d'une cartographie de base

À la lumière des résultats de l'analyse de la littérature, cette nouvelle modélisation s'appuiera sur le formalisme BPMN. Il a été démontré que ce standard présente des bases solides pour la modélisation des processus. En effet, le BPMN permet de prendre en compte les flux physiques et les flux d'informations, mais aussi la nature des intervenants dans un processus. Il autorise aussi les approches événementielles et décisionnelles. En outre, bien que sa prise en main soit plus ardue en raison de son nombre conséquent de pictogrammes, il permet un niveau de détail important tout en restant accessible du point de vue de la compréhension et de l'investissement nécessaire à son développement. Finalement bien que le BPMN soit protégé, sa norme autorise sa modification graphique sous certaines conditions (Object Management Group, 2011). Au regard de ces éléments, le BPMN a logiquement été choisi comme formalisme de base pour notre cartographie 4.0. Nous avons aussi identifié des améliorations récentes apportées au sein des formalismes UML/SysML et VSM pour aborder des particularités de l'industrie 4.0. Ainsi, les sections suivantes s'intéresseront à recenser les caractéristiques inspirantes à mettre en œuvre dans notre modèle de cartographie 4.0.

### 4.3 Observation chez le partenaire industriel

Le partenaire industriel est un acteur du secteur de la construction. Bien que ce secteur industriel se soit fortement mécanisé, de par ses techniques de travail relativement traditionnelles - dues entre

autres à une culture conservatrice, un manque d'innovations et de transferts de compétences (World Economic Forum, 2016) - il n'a que modestement pris part à la 3<sup>e</sup> révolution industrielle relevant de l'automatisation. Cependant, face à l'avènement du numérique et la pénurie de main-d'œuvre, l'entreprise a commencé sa transformation numérique il y a quelques années. Au travers de son partenariat avec Polytechnique Montréal, l'entreprise a pour objectif d'appliquer les principes de l'industrie 4.0 à son processus de gestion des projets de construction.

### 4.3.1 Cartographie du processus de gestion de projets

La firme est amenée à gérer principalement des projets de construction de deux types : des bâtiments et du génie civil. Dans le cadre des projets de génie civil, l'entreprise possède sa propre main d'œuvre tandis que pour les bâtiments, elle doit coordonner des entreprises extérieures. Qu'importe la portée et les acteurs intervenant dans le projet de construction, le processus de gestion de projets reste relativement similaire en interne et il est ainsi possible de cartographier le processus de façon globale. Un audit du partenaire industriel a donc été réalisé auprès des différents départements de l'organisation pour d'une part obtenir les données nous permettant de réaliser la cartographie du processus de gestion et de suivi de projet de construction, et d'autre part identifier les besoins en représentation du partenaire industriel (Section 4.3.2 et 4.5.1). L'audit a été réalisé par le biais d'entretiens avec les quatre départements du partenaire qui interviennent dans la gestion des projets : estimation, planification, gestion de projets et contrôle de coûts. Finalement, un entretien avec le département innovation a permis de prendre connaissance des innovations technologiques en cours de développement au sein de la compagnie. Pour que les solutions développées dans ce mémoire restent ancrées dans la réalité concrète du partenaire, il est en effet indispensable qu'elles puissent prendre en compte les nouvelles technologies développées par la firme. Une phase de validation et de modifications mineures itératives de la modélisation de l'état initial du processus de gestion de projets auprès du partenaire industriel a succédé à son audit, permettant ainsi d'être le plus fidèle possible à sa réalité industrielle. Le processus de gestion de projets du partenaire, présenté Figure 4.1, peut être synthétisé en neuf activités<sup>6</sup>.

---

<sup>6</sup> Pour plus de lisibilité, la cartographie est disponible en version numérique en suivant le lien : [https://drive.google.com/file/d/1ECyEE-Yw-aDaSKrO\\_A63jAydDuMKUjfp/view?eusp=sharing](https://drive.google.com/file/d/1ECyEE-Yw-aDaSKrO_A63jAydDuMKUjfp/view?eusp=sharing)



Tout projet commence à l'**activité 1** par une soumission lors de laquelle l'entreprise présente une proposition comportant les plans, ainsi qu'une ébauche de l'échéancier et du budget du projet proposé. Lorsque le devis est signé par le client, le projet entre dans l'**activité 2**. Un gestionnaire est alors désigné pour prendre en charge le projet. Il commence par fixer les jalons du projet et construit ensuite la structure de découpage du projet – en anglais « Work Breakdown Structure » (WBS). Correspondant à l'**activité 3**, la planification d'exécution est élaborée. Le développement de l'échéancier sur Microsoft Project est supporté par le département de planification, tandis que le gestionnaire de projet est responsable de l'élaboration du budget sur un logiciel de gestion comptable centralisé. L'**activité 5** commence en parallèle de l'activité 2 après la sélection du gestionnaire de projet. Cette phase concerne la gestion des maquettes numériques. En l'occurrence, le coordinateur BIM responsable de l'accompagnement du projet va fédérer les modèles 3D provenant de différents partenaires du projet (architecte et/ou autres entreprises correspondant à un corps de métiers nécessaires au projet), pour obtenir un modèle BIM complet et unifié.

La conception d'une « Baseline » – en français « référence » – assemblant l'échéancier et le budget, à la suite de la phase 3, marque le point de bascule entre la planification de l'exécution et l'exécution de la planification. Ainsi dans l'**activité 4**, le gestionnaire va pouvoir détailler la planification à court terme (3 à 6 semaines). C'est à ce moment que d'éventuelles modifications peuvent être prises en compte impliquant des mises à jour. Sur le chantier, cette planification doit être coordonnée de manière encore plus fréquente chaque semaine avant d'être exécutée par les travailleurs. Lors de l'**activité 6**, les surintendants de chantier vont évaluer l'avancement global du chantier. En parallèle de l'activité 6, le suivi commence à l'**activité 7** par l'enregistrement des dépenses qui seront vérifiées au fur et à mesure par le département de contrôle des coûts. Les données d'avancement du chantier contenues dans les journaux de chantier ainsi que le recensement des dépenses permettent de procéder à l'analyse de suivi réalisée classiquement par l'entreprise. Celle-ci est faite à partir d'un certain nombre d'indicateurs que nous ne présenterons pas dans ce mémoire. Dans le cas où l'analyse de suivi révèle une non-conformité vis-à-vis de la planification, l'**activité 8** permet de soumettre des modifications au client. Une fois acceptées, les modifications sont mises en place via une rétroaction au niveau de l'activité 4. Ainsi une itération de suivi s'achève et une nouvelle peut commencer. Dans tous les cas, un rapport est édité de manière périodique à destination du directeur de projet lors de l'**activité 9**. Ce rapport est remis au client dans le cas des contrats dits de « gérance de projet ». Pour ne pas complexifier la cartographie

par l'ajout d'un nouvel intervenant, il a été choisi de ne pas représenter le directeur de projet et de décrire ses actions uniquement dans le couloir du client.

### 4.3.2 Besoins émergeant du processus

Cette première représentation du processus de gestion de projets, mais aussi et surtout les échanges qui ont permis de la développer, permettent d'en apprendre plus sur les besoins supplémentaires auxquels notre cartographie doit répondre. Ainsi, il a été possible d'identifier deux types de besoins. Un premier besoin s'est d'abord dégagé en termes de **représentation d'éléments** que la norme BPMN actuelle ne prend pas en compte. Il semble apparaître trois catégories d'éléments qu'il serait judicieux de mieux visualiser dans le contexte de l'industrie 4.0 :

- **La technologie** : La 4<sup>e</sup> révolution industrielle nécessite la mise en place de systèmes technologiques complexes. Ces systèmes ont besoin d'être caractérisés en termes de techniques de fonctionnement, d'intrants et extrants, de temporalité d'action, de coûts d'utilisation, de performance, etc. Bien que l'appellation « technologie 4.0 » soit souvent utilisée de façon un peu abusive, la représentation doit pouvoir identifier ces technologies.
- **Les données** : l'industrie 4.0 se basant principalement sur une aide à la décision fondée sur les données, la mise en place de technologies 4.0 s'accompagne d'une explosion du nombre de données exploitables. S'il faut pouvoir représenter les moyens de collecte de données, il faut aussi caractériser les données en termes de volume de données, de fréquence de rafraîchissement, de qualité, de techniques de traitement, ...
- **L'organisation** : la mise en place de technologies implique aussi des changements organisationnels. Il s'avère donc pertinent de représenter les compétences requises pour l'utilisation des systèmes technologiques.

Outre ces éléments, le partenaire a formulé un deuxième besoin qui concerne la **représentation en termes de performance** des impacts attendus du nouveau processus. Il est question ici de visualiser rapidement les avantages résultant des changements, par exemple les délais de transmission des données ou encore les coûts et gains des technologies mises en œuvre. Cela peut notamment passer par le calcul estimé de KPI. En génie industriel, il est souvent pertinent de discrétiser la notion de performance sur trois axes : le **temps**, le **coût** et la **qualité**. Par extrapolation, les exigences de l'entreprise partenaire représentent incontestablement aussi les

besoins en représentation 4.0 du secteur de la construction tout entier et embrassent sans nul doute les attentes d'autres domaines industriels.

#### **4.4 Extraction des caractéristiques de la littérature**

Avant d'aller plus en avant dans l'exploitation des besoins identifiés et exprimés par l'entreprise, il est préférable de revenir sur les caractéristiques présentes dans la littérature. Les améliorations des formalismes de cartographie actuels expriment déjà un certain nombre de fonctionnalités pour la représentation de l'industrie 4.0. Il s'agit donc d'extraire ces caractéristiques. Par la suite, il sera possible d'ajouter les caractéristiques provenant du partenaire industriel si elles ne sont pas déjà incluses (Section 4.5).

Les articles issus de la revue de littérature abordent la cartographie selon différents points de vue. En fait, certains comparent eux aussi des formalismes de cartographie entre eux (Constantinescu et al., 2015; Phuong & Guidat, 2018; Venkatakumar & Schmidt, 2019). Dans ce type d'articles, il est particulièrement intéressant de s'intéresser aux critères de comparaison des standards de modélisation, car un critère de comparaison peut aussi être vu comme une caractéristique que le formalisme doit remplir. D'autres articles s'intéressent davantage à l'ajout d'éléments comme des pictogrammes ou la prise en compte de concepts (Ahn & Chang, 2018; Busert & Fay, 2019; Cala et al., 2017; Mokhtari et al., 2019; Petrasch & Hentschke, 2016; Wang et al., 2019). Tous ces nouveaux outils sont des caractéristiques dont notre modèle pourrait avoir besoin pour représenter les enjeux de l'industrie 4.0. Finalement, des indicateurs de performance sont présentés dans la littérature (Busert & Fay, 2019; Hartmann et al., 2018; Meudt et al., 2017; Molenda et al., 2019; Phuong & Guidat, 2018; Wang et al., 2019). Ces indicateurs permettent la plupart du temps de juger la maturité d'un processus à différentes échelles (locale à globale) à partir de sa modélisation. Comparer chaque indicateur d'une itération de cartographie à celui de son successeur permet donc de préjuger de l'impact des changements implantés dans un processus.

En définitive, l'état de l'art présenté dans le Chapitre 2 permet de constituer une base de caractéristiques déjà éprouvées dans d'autres études. Ces caractéristiques ont été extraites des articles et exprimées sous forme de questions. Un code leur a été attribué suite à leur classification suivant les deux grandes familles identifiées dans la sous-section précédente. Ces deux familles ont ensuite été divisées comme présenté dans le Tableau 4.1, reprenant les décompositions des deux besoins identifiés chez le partenaire industriel (Section 4.3.2) :

Tableau 4.1 Décomposition en famille et concept de caractéristiques

Famille	Représentation					Performance		
Concept	Général	Technologie	Donnée	Cybersécurité	Organisation	Temps	Coût	Qualité
Code	RepG	RepT	RepD	RepC	RepO	PerFT	PerFC	PerFQ

Néanmoins, cet ensemble de critères n'est pas à appliquer tel quel à notre modèle de base. En effet, de manière native, le BPMN comprend d'ores et déjà certaines caractéristiques. De plus, une caractéristique n'est peut-être pas nécessairement pertinente pour le partenaire industriel. Par conséquent, il faut les confronter aux besoins identifiés dans la section précédente (Section 4.3.2). Le Tableau 4.2 suivant présente l'ensemble des caractéristiques théoriques (code « Th » dans les Tableaux 4.2 et 4.4) et l'Annexe A répond aux questions de la prise en compte native par le BPMN ainsi que de pertinence pour le partenaire de chaque critère.

Tableau 4.2 Tableau des caractéristiques théoriques extraites de la littérature

Famille	Concept	Code	Caractéristique considérée	Article de référence
Représentation	Généralité	Th-RepG.1	Peut-on représenter une logique événementielle ?	(Venkatakumar & Schmidt, 2019)
		Th-RepG.2	La représentation est-elle basée sur les entités ? (IoT)	(Venkatakumar & Schmidt, 2019)
		Th-RepG.3	Peut-on représenter l'exécution indépendante d'une activité par plusieurs entités ?	(Venkatakumar & Schmidt, 2019)
		Th-RepG.4	Peut-on différencier les communications internes et externes d'une entité ?	(Venkatakumar & Schmidt, 2019)
		Th-RepG.5	Peut-on augmenter le nombre d'entités sans augmenter la complexité de la représentation ?	(Venkatakumar & Schmidt, 2019)
		Th-RepG.6	Peut-on représenter l'apparition et la disparition d'entités au cours du processus ?	(Venkatakumar & Schmidt, 2019)
		Th-RepG.7	Peut-on représenter plusieurs niveaux d'abstraction ? (global / local)	(Venkatakumar & Schmidt, 2019) (Constantinescu, Francalanza, & Matarazzo, 2015)
		Th-RepG.8	Peut-on adapter la représentation entre des processus proches de différentes ampleurs ?	(Constantinescu, Francalanza, & Matarazzo, 2015)
		Th-RepG.9	Peut-on représenter les aspects juridiques et notamment relatifs à la propriété intellectuelle ?	(Constantinescu, Francalanza, & Matarazzo, 2015)
		Th-RepG.10	La représentation fait-elle consensus dans la communauté ?	(Constantinescu, Francalanza, & Matarazzo, 2015)
		Th-RepG.11	La représentation a-t-elle été comparée et approuvée dans la communauté ?	(Constantinescu, Francalanza, & Matarazzo, 2015)
		Th-RepG.12	La représentation est-elle plus efficace dans un domaine spécifique ?	(Constantinescu, Francalanza, & Matarazzo, 2015)
		Th-RepG.13	Peut-on représenter la notion "d'abordable pour une PME" ?	(Constantinescu, Francalanza, & Matarazzo, 2015)
		Th-RepG.14	Peut-on avoir une indépendance entre la modélisation et la solution ?	(Constantinescu, Francalanza, & Matarazzo, 2015)
		Th-RepG.15	Peut-on coupler des bonnes pratiques entre elles ?	(Constantinescu, Francalanza, & Matarazzo, 2015)
		Th-RepG.16	Peut-on représenter les changements entre plusieurs itérations de modélisation ?	(Cala, Luder, Vollmar, & Foehr, 2017)
		Th-RepG.17	Peut-on spécifier que l'activité est une opération manufacturière ?	(Ahn & Chang, 2018)
		Th-RepG.18	Peut-on représenter une matière première ou une pièce manufacturière ?	(Ahn & Chang, 2018)
		Th-RepG.19	Peut-on représenter l'inventaire nécessaire à une opération manufacturière ?	(Ahn & Chang, 2018) (Phuong & Guidat, 2018)
		Th-RepG.20	Peut-on représenter la frontière/limite d'un système ?	(Wang, Dittmann, & Anderl, 2019)
		Th-RepG.21	Peut-on spécifier qu'un document provient du monde physique ?	(Petrasch & Hentschke, 2016)

Tableau 4.2 Tableau des caractéristiques théoriques extraites de la littérature (suite)

Famille	Concept	Code	Caractéristique considérée	Article de référence
Représentation	Technologie	Th-RepT.1	Peut-on spécifier une activité comme "actionneur"	(Petrasch & Hentschke, 2016)
		Th-RepT.2	Peut-on spécifier une activité comme "capteur"	(Petrasch & Hentschke, 2016)
		Th-RepT.3	Peut-on représenter un Device de l'IoT ?	(Petrasch & Hentschke, 2016)
		Th-RepT.4	Peut-on représenter une interface Homme-Machine ?	(Petrasch & Hentschke, 2016)
		Th-RepT.5	Peut-on représenter le flux physique ?	(Molenda, Jugenheimer, Haefner, Oechsle, & Karat, 2019)
		Th-RepT.6	Peut-on représenter le flux d'information au niveau global ?	(Molenda, Jugenheimer, Haefner, Oechsle, & Karat, 2019)
		Th-RepT.7	Peut-on représenter le flux d'information au niveau local ?	(Molenda, Jugenheimer, Haefner, Oechsle, & Karat, 2019)
		Th-RepT.8	Peut-on mesurer la maturité du flux matériel ?	(Molenda, Jugenheimer, Haefner, Oechsle, & Karat, 2019)
		Th-RepT.9	Peut-on mesurer la maturité du flux d'information au niveau global ?	(Molenda, Jugenheimer, Haefner, Oechsle, & Karat, 2019)
		Th-RepT.10	Peut-on mesurer la maturité du flux d'information au niveau local ?	(Molenda, Jugenheimer, Haefner, Oechsle, & Karat, 2019)
	Données	Th-RepD.1	Peut-on représenter que la donnée transite entre deux humains ?	(Molenda, Jugenheimer, Haefner, Oechsle, & Karat, 2019)
		Th-RepD.2	Peut-on représenter que la donnée transite entre un humain et une machine ?	(Molenda, Jugenheimer, Haefner, Oechsle, & Karat, 2019)
		Th-RepD.3	Peut-on représenter que la donnée transite entre deux machines ?	(Molenda, Jugenheimer, Haefner, Oechsle, & Karat, 2019)
		Th-RepD.4	Peut-on représenter que la donnée est collectée par la vision ?	(Molenda, Jugenheimer, Haefner, Oechsle, & Karat, 2019)
		Th-RepD.5	Peut-on représenter que la donnée est collectée par la parole ?	(Molenda, Jugenheimer, Haefner, Oechsle, & Karat, 2019)
		Th-RepD.6	Peut-on représenter que la donnée est collectée sur un document manuscrit ?	(Molenda, Jugenheimer, Haefner, Oechsle, & Karat, 2019)
		Th-RepD.7	Peut-on représenter que la donnée est collectée sur un document imprimé ?	(Molenda, Jugenheimer, Haefner, Oechsle, & Karat, 2019)
		Th-RepD.8	Peut-on représenter que la donnée est collectée sur un fichier numérique ?	(Molenda, Jugenheimer, Haefner, Oechsle, & Karat, 2019)
		Th-RepD.9	Peut-on représenter que la donnée est stockée et diffusée par un humain ?	(Molenda, Jugenheimer, Haefner, Oechsle, & Karat, 2019)
		Th-RepD.10	Peut-on représenter que la donnée est stockée et diffusée par un document manuscrit ?	(Molenda, Jugenheimer, Haefner, Oechsle, & Karat, 2019)
		Th-RepD.11	Peut-on représenter que la donnée est stockée et diffusée par un document imprimé ?	(Molenda, Jugenheimer, Haefner, Oechsle, & Karat, 2019)
		Th-RepD.12	Peut-on représenter que la donnée est stockée et diffusée par un fichier numérique ?	(Molenda, Jugenheimer, Haefner, Oechsle, & Karat, 2019)
		Th-RepD.13	Peut-on représenter que la donnée est stockée et diffusée par un fichier numérique en cloud ?	(Molenda, Jugenheimer, Haefner, Oechsle, & Karat, 2019)
Th-RepD.14	Peut-on représenter que la donnée n'a pas d'usage ?	(Molenda, Jugenheimer, Haefner, Oechsle, & Karat, 2019)		
Th-RepD.15	Peut-on représenter que la donnée a un usage ?	(Molenda, Jugenheimer, Haefner, Oechsle, & Karat, 2019)		
Th-RepD.16	Peut-on représenter l'unité des données ? (Pièce / m / min / ...)	(Busert & Fay, 2019)		
Th-RepD.17	Peut-on représenter la fréquence de mise à jour des données ?	(Busert & Fay, 2019)		
Th-RepD.18	Peut-on représenter la précision des données ?	(Busert & Fay, 2019)		
Th-RepD.19	Peut-on représenter l'incertitude des données ?	(Venkatakumar & Schmidt, 2019)		
Th-RepD.20	Peut-on représenter plusieurs niveaux de bases de données ? (Local / Cloud...)	(Venkatakumar & Schmidt, 2019) (Petrasch & Hentschke, 2016)		
Th-RepD.21	Peut-on mesurer la disponibilité des données ?	(Meudt, Metternich, & Abele, 2017) (Hartmann, Meudt, Seifermann, & Metternich, 2018) (Molenda, Jugenheimer, Haefner, Oechsle, & Karat, 2019)		
Th-RepD.22	Peut-on mesurer l'utilisation des données ?	(Meudt, Metternich, & Abele, 2017) (Hartmann, Meudt, Seifermann, & Metternich, 2018) (Molenda, Jugenheimer, Haefner, Oechsle, & Karat, 2019)		
Th-RepD.23	Peut-on mesurer la digitalisation des données ?	(Meudt, Metternich, & Abele, 2017) (Hartmann, Meudt, Seifermann, & Metternich, 2018) (Molenda, Jugenheimer, Haefner, Oechsle, & Karat, 2019)		

Tableau 4.2 Tableau des caractéristiques théoriques extraites de la littérature (suite et fin)

Famille	Concept	Code	Caractéristique considérée	Article de référence
Représentation	Cybersécurité	Th-RepC.1	Peut-on représenter l'identification numérique d'un objet ?	(Mokhtari, Abou El Kalam, Benhadou, & Medroumi, 2019)
		Th-RepC.2	Peut-on représenter la méthode d'authentification des utilisateurs ?	(Mokhtari, Abou El Kalam, Benhadou, & Medroumi, 2019)
	Organisation	Th-RepO.1	Peut-on représenter la facilité d'utilisation et d'apprentissage ? Pratique, réaliste et pragmatique	(Constantinescu, Francalanza, & Matarazzo, 2015)
		Th-RepO.2	Peut-on représenter le nombre d'opérateurs affectés à une activité ?	(Phuong & Guidat, 2018)
Performance	Temps	Th-PerfT.1	Peut-on représenter le temps réel ?	(Venkatakumar & Schmidt, 2019)
		Th-PerfT.2	Peut-on représenter le temps de cycle d'un processus ?	(Phuong & Guidat, 2018)
		Th-PerfT.3	Peut-on représenter le temps à valeur ajoutée et sans valeur ajoutée d'un processus ?	(Phuong & Guidat, 2018)
		Th-PerfT.4	Peut-on représenter le temps d'opération planifié d'un processus ?	(Phuong & Guidat, 2018)
		Th-PerfT.5	Peut-on représenter le temps nécessaire à faire l'inventaire du processus ?	(Phuong & Guidat, 2018)
		Th-PerfT.6	Peut-on représenter les distances de trajets d'un flux ?	(Phuong & Guidat, 2018)
	Coûts	Th-PerfC.1	Peut-on représenter le coût d'utilisation ?	(Constantinescu, Francalanza, & Matarazzo, 2015)
		Th-PerfC.2	Peut-on représenter la rentabilité ?	(Constantinescu, Francalanza, & Matarazzo, 2015)
	Qualité	Th-PerfQ.1	Peut-on représenter la tolérance à l'erreur d'un processus ?	(Venkatakumar & Schmidt, 2019)
		Th-PerfQ.2	Peut-on représenter la notion de "durabilité" du processus ?	(Constantinescu, Francalanza, & Matarazzo, 2015)
		Th-PerfQ.3	Peut-on représenter le degré d'agilité d'un processus ?	(Constantinescu, Francalanza, & Matarazzo, 2015)
		Th-PerfQ.4	Peut-on représenter le taux de défaillance d'un processus ?	(Phuong & Guidat, 2018)
		Th-PerfQ.5	Peut-on mesurer la maturité du processus de traitement global des données ?	(Wang, Dittmann, & Anderl, 2019)
		Th-PerfQ.6	Peut-on mesurer la maturité de la communication intermachine ? M2M / Monde Virtuel	(Wang, Dittmann, & Anderl, 2019)
		Th-PerfQ.7	Peut-on mesurer la maturité en termes d'interopérabilité des systèmes de production ? Format / BdD / ...	(Wang, Dittmann, & Anderl, 2019)
		Th-PerfQ.8	Peut-on mesurer la maturité de la SupplyChain ? (Intégration des clients et fournisseurs)	(Wang, Dittmann, & Anderl, 2019)
		Th-PerfQ.9	Peut-on mesurer la maturité des interfaces homme-machines ? (Local / mobile / AR / ...)	(Wang, Dittmann, & Anderl, 2019)
		Th-PerfQ.10	Peut-on mesurer la maturité de la production en termes de flexibilité ? (adaptable au petit lot)	(Wang, Dittmann, & Anderl, 2019)
		Th-PerfQ.11	Peut-on représenter la consommation énergétique du processus ?	(Phuong & Guidat, 2018)
		Th-PerfQ.12	Peut-on représenter la consommation d'eau du processus ?	(Phuong & Guidat, 2018)
		Th-PerfQ.13	Peut-on représenter la production de déchets générés par le processus ?	(Phuong & Guidat, 2018)
Th-PerfQ.14		Peut-on représenter la dangerosité du processus ?	(Phuong & Guidat, 2018)	
Th-PerfQ.15		Peut-on représenter l'ergonomie d'un processus ?	(Phuong & Guidat, 2018)	

## 4.5 Caractéristiques sélectionnées

### 4.5.1 Caractéristiques additionnelles

La liste des caractéristiques théoriques provenant de la littérature est somme toute assez conséquente. Néanmoins, notre partenaire industriel a souhaité ajouter quelques critères supplémentaires à prendre en compte dans un souci de faciliter l'opérationnalisation de l'industrie 4.0. Ces caractéristiques issues de l'analyse de l'existant (code « Ex » dans les Tableaux 4.3 et 4.4), c'est-à-dire du partenaire industriel, sont présentées dans le Tableau 4.3 suivant.

Tableau 4.3 Caractéristiques additionnelles provenant de l'analyse de l'existant

Famille	Concept	Code	Caractéristique considérée
Représentation	Généralité		
	Technologie	Ex-RepT.1	Peut-on représenter la technologie mise en œuvre dans une activité ?
	Données	Ex-RepD.1	Peut-on spécifier le type de donnée ?
		Ex-RepD.2	Peut-on représenter un délai d'obtention ou de transmission de la donnée
	Cybersécurité		
	Organisation	Ex-RepO.1	Peut-on représenter le nombre d'équipes affectées à une activité ?
Ex-RepO.2		Peut-on spécifier les compétences requises pour la mise en œuvre d'un changement au niveau de l'activité ?	
Performance	Temps		
	Coûts	Ex-PerfC.1	Peut-on spécifier l'investissement financier nécessaire à la mise en œuvre des changements ?
	Qualité		

### 4.5.2 Caractéristiques retenues

Finalement, en concaténant le Tableau 4.2 et le Tableau 4.3, il est possible d'obtenir la liste exhaustive de caractéristiques permettant une meilleure représentation des enjeux de l'industrie 4.0, n'étant pas encore prise en compte par le formalisme BPMN et répondant aux besoins exprimés par notre partenaire industriel. Le Tableau 4.4 synthétise l'ensemble de ces caractéristiques.

Tableau 4.4 Liste des caractéristiques 4.0 nécessaires

Famille	Concept	Code	Caractéristique considérée
Représentation	Général	Th-RepG.16	Peut-on représenter les changements entre plusieurs itérations de modélisation ?
	Technologie	Ex-RepT.1	Peut-on représenter la technologie mise en œuvre dans une activité ?
	Données	Th-RepD.1	Peut-on représenter que la donnée transite entre deux humains ?
		Th-RepD.2	Peut-on représenter que la donnée transite entre un humain et une machine ?
		Th-RepD.3	Peut-on représenter que la donnée transite entre deux machines ?
		Th-RepD.4	Peut-on représenter que la donnée est collectée par la vision ?
		Th-RepD.5	Peut-on représenter que la donnée est collectée par la parole ?
		Th-RepD.6	Peut-on représenter que la donnée est collectée sur un document manuscrit ?
		Th-RepD.7	Peut-on représenter que la donnée est collectée sur un document imprimé ?
		Th-RepD.8	Peut-on représenter que la donnée est collectée sur un fichier numérique ?
		Th-RepD.9	Peut-on représenter que la donnée est stockée et diffusée par un humain ?
		Th-RepD.10	Peut-on représenter que la donnée est stockée et diffusée par un document manuscrit ?
		Th-RepD.11	Peut-on représenter que la donnée est stockée et diffusée par un document imprimé ?
		Th-RepD.12	Peut-on représenter que la donnée est stockée et diffusée par un fichier numérique ?
		Th-RepD.13	Peut-on représenter que la donnée est stockée et diffusée par un fichier numérique en cloud ?
		Th-RepD.14	Peut-on représenter que la donnée n'a pas d'usage ?
		Th-RepD.15	Peut-on représenter que la donnée a un usage ?
		Th-RepD.17	Peut-on représenter la fréquence de mise à jour des données ?
		Th-RepD.21	Peut-on mesurer la disponibilité des données ?
		Th-RepD.22	Peut-on mesurer l'utilisation des données ?
		Th-RepD.23	Peut-on mesurer la digitalisation des données ?
		Ex-RepD.1	Peut-on spécifier la type de donnée ?
	Ex-RepD.2	Peut-on représenter un délai d'obtention ou de transmission de la donnée ?	
	Organisation	Th-RepO.2	Peut-on représenter le nombre d'opérateurs affectés à une activité ?
		Ex-RepO.1	Peut-on représenter le nombre d'équipes affectées à une activité ?
		Ex-RepO.2	Peut-on spécifier les compétences requises pour la mise en œuvre d'un changement au niveau de l'activité ?
	Performance	Temps	Th-PerfT.1
Th-PerfT.2			Peut-on représenter le temps de cycle d'un processus ?
Coûts		Th-PerfC.1	Peut-on représenter le coût d'utilisation ?
		Th-PerfC.2	Peut-on représenter la rentabilité ?
		Ex-PerfC.1	Peut-on spécifier l'investissement financier nécessaire à la mise en œuvre des changements ?

## 4.6 Conclusion

Ce chapitre a permis de déterminer les besoins du partenaire industriel suite à la cartographie de son processus de gestion de projets de construction. D'autre part, les critères de modélisation des processus 4.0 ont pu être extraits de la revue de littérature puis passés par un filtre pour identifier leur pertinence vis-à-vis du formalisme de base et des appétences du partenaire. Finalement, l'objectif de recherche n°1 a été atteint. En effet, les caractéristiques pertinentes pour la modélisation des processus de l'industrie 4.0 ont été identifiées et listées dans le Tableau 4.4. Dans le chapitre suivant, il s'agira maintenant de développer des solutions graphiques qui répondront à chacune des caractéristiques listées.

## CHAPITRE 5 CARTOGRAPHIE 4.0 PROPOSÉE

### 5.1 Introduction

Le standard BPMN a été choisi comme formalisme de base pour notre modèle. À partir de l'analyse de l'existant et de la littérature, les caractéristiques auxquelles devra répondre une modélisation 4.0 ont pu être clairement identifiées. Il s'agit donc de parfaire le formalisme de base en répondant à chacun de ces besoins. Ainsi, ce chapitre présente le modèle de cartographie 4.0 développé dans ce mémoire et nommé « Gabarit de représentation et de modélisation pour l'industrie 4.0 » abrégé GRMI4.0.

### 5.2 Améliorations proposées

Les solutions graphiques conçues pour répondre à l'ensemble des caractéristiques, présentées dans le Tableau 4.4, sont détaillées dans les sections suivantes.

#### 5.2.1 Code couleur

La principale spécification que doit venir combler notre modèle de cartographie est le besoin de représenter les évolutions entre deux modélisations d'un même procédé. En effet, notre modèle a pour vocation de faciliter l'implantation de pratiques issues de l'industrie 4.0. Pour cela, le modèle va présenter la modélisation initiale, c'est-à-dire la situation du processus actuelle, qu'on appellera par convention l'instant  $T_0$ , puis des itérations d'améliorations nommées  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$ , ...  $T_n$  pourront prendre place. Le but est de visualiser efficacement les modifications apportées par une cartographie  $T_j$  par rapport à l'instant précédent  $T_i$ . La caractéristique Th-RepG.16, qui concerne la représentation des changements entre plusieurs itérations de modélisation, est justement extraite d'un article qui fournit une solution à ce problème (Cala et al., 2017). Les auteurs y suggèrent d'ajouter des « Tags », qui correspondent dans la pratique à un code couleur. Ce code couleur permet de catégoriser les éléments selon qu'ils soient nouveaux (en vert), hérités de l'itération précédente avec modifications (en jaune) ou sans modification (sans couleur). Dans notre cas, ce code couleur est tout à fait pertinent. Cependant, il doit être amélioré pour prendre en compte deux situations. Premièrement, un élément peut se voir réaffecté à quelqu'un. Ici, ni la nature de l'activité ni le moyen d'y arriver ne change. C'est uniquement un transfert de la charge de travail d'une entité à une autre. La couleur retenue pour ce cas de figure est le bleu. Deuxièmement, un élément peut

se voir supprimé. Pour pouvoir visualiser cette suppression, il est pertinent de le laisser visible dans l'itération suivante. Ici, le code couleur retenu est le gris.

## 5.2.2 Couloir technologique

La technologie est le prolongement quasiment naturel des concepts de l'industrie 4.0. En effet, un ensemble de technologies, plus ou moins récentes, est généralement inhérent à la mise en œuvre des concepts. Ainsi, la modélisation doit permettre de représenter les éléments technologiques. Ces éléments pourraient être ajoutés, comme le propose le BPMN, en tant qu'acteur indépendant prenant la forme d'une multitude de couloirs – « swimlanes » en anglais – propres à chaque technologie employée. Cependant, cette solution présente l'inconvénient d'apporter une grande complexité visuelle à notre représentation. C'est pourquoi dans le cadre du GRMI4.0 le choix a été fait de représenter ces éléments dans un seul et même couloir nommée « technologie » (Figure 5.1) et de spécifier la technologie dans le pictogramme de l'activité (détaillé dans la section 5.2.3.1 suivante). Outre répondre en partie à la caractéristique Ex-RepT.1, qui propose de représenter les technologies mises en œuvre, cet espace dédié aux activités technologiques permet de remplir les caractéristiques Th-RepD.1, Th-RepD.2 et Th-RepD.3. En effet, ces caractéristiques s'intéressent à la visualisation de la transmission des données respectivement entre deux humains, entre un humain et une machine et entre deux machines. Le couloir dédié aux technologies permet de bien s'apercevoir de ces 3 types d'interactions. Une donnée qui reste à l'intérieur (respectivement à l'extérieur) du couloir technologique est échangée uniquement entre deux machines (respectivement humains). Finalement, une donnée qui traverse la frontière du couloir technologique est échangée entre un humain et une machine.

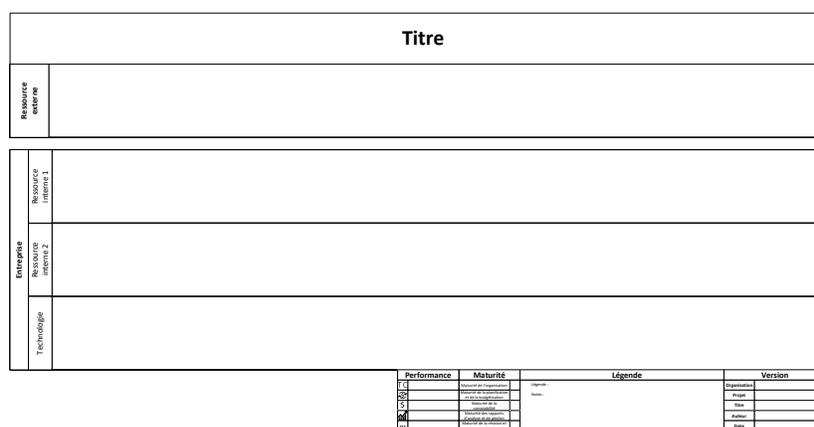


Figure 5.1 Représentation du couloir technologique dans l'espace d'une cartographie

### 5.2.3 Bonification des pictogrammes

Pour mieux prendre en compte les concepts de l'industrie 4.0, il convient de combler les lacunes majeures du BPMN à ce sujet. Ces lacunes se situent en partie au niveau des capacités de représentation en termes d'informations, sur des pictogrammes déjà existants comme les activités et les données (Figure 5.2). Pour rendre notre modèle de cartographie le plus visuel possible, il a été choisi de développer un ensemble de symboles permettant d'identifier la caractéristique tout en minimisant la taille des ajouts. Dans l'immense majorité des cas, l'information représentée n'est pas binaire, par exemple la capacité ou non d'être effectuée en temps réel. Une case sera ainsi disponible de manière adjacente au symbole pour insérer un texte permettant de spécifier la caractéristique. L'ensemble des ajouts ainsi que leur utilité sont détaillés dans les sous-sections suivantes.

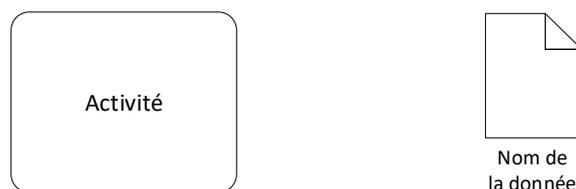


Figure 5.2 Pictogrammes d'activité (à gauche) et de donnée (à droite) en BPMN

#### 5.2.3.1 Activité

Dans le domaine de la modélisation des processus d'affaires, la clé de voûte de la représentation est le pictogramme d'activité. Une activité permet tout simplement de décrire une action réalisée dans un processus. Le BPMN permet dans une certaine mesure de spécifier les activités. En effet dans le coin en haut à gauche d'une activité, un jeu de symboles est d'ores et déjà disponible pour qualifier le type d'activité (Service, Réception, Envoi, Manuel, Utilisateur, Script, Règle métier, etc.). Au centre en bas d'une activité, il est aussi possible de spécifier la répétition d'une activité (Boucle, Instance multiple séquentielle ou parallèle, Compensation, etc.). Cependant, les constats antérieurs de ce mémoire (Section 4.5.2) ont permis d'observer qu'un certain nombre d'éléments manquaient pour le cas de l'industrie 4.0 (Tableau 4.4).

Tout d'abord, du point de vue organisationnel, les caractéristiques Th-RepO.2 et Ex-RepO.1 s'intéressent à présenter les ressources humaines affectées à l'activité et en particulier le nombre de personnes et d'équipes. Pour ce faire, une icône a été développée (Figure 5.3-a). Dans la case

adjacente, ces informations peuvent être écrites sous le format « [nombre de personnes] x [nombre d'équipes] ». Outre les ressources humaines, la caractéristique Ex-RepO.2 s'attarde sur l'énonciation des compétences nécessaires à la mise en œuvre d'un changement, qu'il soit de nature technologique ou non. Un symbole (Figure 5.3-b) a aussi été dessiné et un espace à sa droite permet d'y faire figurer sous forme de texte lesdites compétences.

Pour ce qui est de la technologie mise en œuvre, un symbole (Figure 5.3-c) a été imaginé. Les technologies employées pour réaliser l'activité peuvent ainsi y être présentées. La fonction de la caractéristique Ex-RepT.1 est alors remplie. Les notions d'organisation et de technologie permettent déjà de qualifier de manière plus fine qui exécute l'activité et comment. En effet une tâche peut être réalisée par un intervenant humain travaillant ou non sur un outil technologique et, à l'inverse, une technologie peut travailler de manière totalement autonome.

Deux icônes liées à l'aspect économique ont également vu le jour. La première vient combler le besoin exprimé par la caractéristique Ex-PerfC.1 consistant à indiquer au partenaire industriel le coût de mise en œuvre d'un changement. L'icône ainsi développée (Figure 5.3-d) représente l'investissement qu'il est nécessaire de déployer pour la mise en place de la nouvelle activité. Celle-ci servira majoritairement dans le cas d'un investissement technologique. La seconde icône imaginée (Figure 5.3-e) permet de quantifier le coût d'utilisation par unité de temps de l'activité. Cela vient accomplir l'objectif de la caractéristique Th-PerfC.1. Le montant indiqué dans la case adjacente pourra prendre en compte différents coûts : le salaire de l'employé affecté à l'opération, le coût énergétique de la technologie utilisée, etc.

Enfin, les deux dernières icônes présentes sur le pictogramme de l'activité ont trait à la temporalité. En premier lieu, un symbole (Figure 5.3-f) vient satisfaire la caractéristique Th-PerfT.2. En effet, il permet d'indiquer le temps d'exécution ou temps de cycle de l'activité. En second lieu, la caractéristique Th-PerfT.1 réclamait de mettre en évidence les activités réalisées en temps réel. Le dernier symbole présenté dans cette partie vient remplir ce rôle (Figure 5.3-g). Ce symbole est le seul à ne pas être accompagné d'une zone de texte. En effet, il vient fournir une information binaire : l'activité est en temps réel ou ne l'est pas. Cela permettra à terme de visualiser une chaîne d'activités effectuée en temps réel.



Figure 5.3 Icône du pictogramme d'activité : a) ressource humaine b) compétence c) technologie d) investissement e) coût d'exécution f) temps de cycle g) temps réel

Ces éléments ont été agrégés dans le pictogramme d'activité de notre modèle (Figure 5.4). Comme dans la VSM, les icônes d'activités s'accompagnent, en dessous d'elles, des blocs d'information utilisés pour faire apparaître des indicateurs de performance. On y retrouve quatre zones : en haut à gauche les informations organisationnelles, dans le coin en haut à droite les notions de temps, au milieu un espace décrivant la technologie et en bas une zone dédiée aux coûts. Il est à noter que le temps d'exécution ainsi que le coût d'exécution sont positionnés sur la droite du pictogramme. Cela facilitera le calcul du coût de l'activité obtenu par multiplication du coût d'exécution par le temps d'exécution.

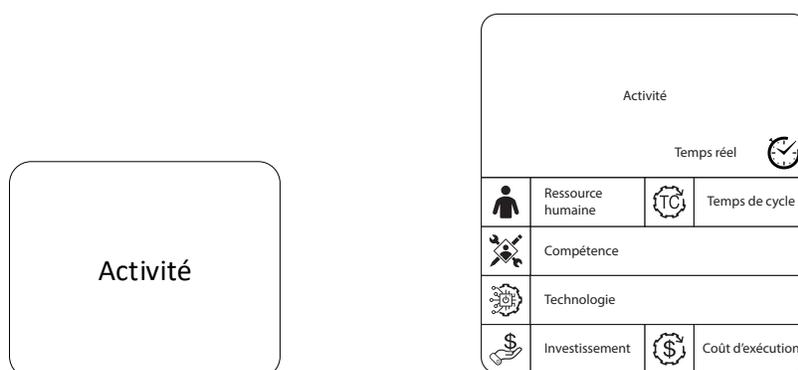


Figure 5.4 Pictogrammes d'activité : BPMN (à gauche) et GRMI4.0 (à droite)

### 5.2.3.2 Donnée

Dans le cadre de l'industrie 4.0, l'importance des données devient prépondérante. En effet, la 4<sup>e</sup> révolution industrielle se base sur l'analyse des données récoltées pour prendre les décisions les plus adaptées à la situation de terrain. L'analyse des capacités du BPMN a montré que ce standard n'exploite pas pleinement le concept de donnée qu'il introduit. Pour l'heure, il ne permet que de nommer la donnée. Notre modèle propose les ajouts suivants (Figure 5.5).

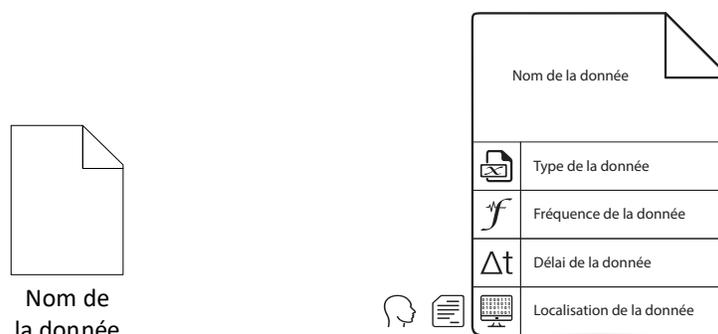


Figure 5.5 Pictogramme de donnée : BPMN (à gauche) et GRMI4.0 (à droite)

Comme le pictogramme du standard de base, celui du GRMI4.0 offre la possibilité d’attribuer un nom à la donnée. Cependant, si son emplacement est nativement en dessous du pictogramme, il a été choisi dans notre modèle de l’insérer en haut de l’icône agrandie. Néanmoins, le nom d’une donnée peut ne pas être assez explicite ou peut comporter plusieurs informations. Il est ainsi primordial de pouvoir spécifier la donnée le cas échéant comme le propose la caractéristique Ex-RepD.1. Ainsi un pictogramme (Figure 5.6-a) a été conçu pour préciser le type de donnée.

La notion de temps est une composante importante de l’industrie 4.0 et particulièrement dans l’obtention des données pour réaliser une prise de décision qui tend à se faire en temps réel. Prendre les bonnes décisions, et ce le plus rapidement possible pour éviter toute divergence vis-à-vis des objectifs, dépend de la capacité à accumuler les informations le plus rapidement et le plus fréquemment possible. Comme le souligne la caractéristique Th-RepD.17, il est d’une part indispensable de connaître la fréquence de mise à jour des données. C’est pourquoi un symbole a été attribué à ce besoin (Figure 5.6-b). D’autre part, l’entreprise partenaire a notifié le besoin spécifique Ex-RepD.2 de visualiser les délais potentiels qui peuvent être imposés à certaines données, que ce soit dans leur capture ou leur acheminement. Dans le cas précis du partenaire, ce délai est nécessaire pour la prise en compte des dépenses. La Figure 5.6-c présente le symbole qui a été affecté à cette caractéristique.

Dans leur article, (Molenda et al., 2019) ont choisi d’être les plus explicites possible quant à la qualification en discrétisant le moyen de collecte et de stockage des données en six médias : vision humaine, parole humaine, formulaire manuscrit, formulaire imprimé, fichier numérique local, fichier numérique cloud. Pour répondre aux caractéristiques Th-RepD.4 à Th-RepD.13 relatives à la représentation de ces classes de données, notre modèle a pris le parti de limiter les possibilités. Tout d’abord, notre icône de donnée ne renseignera pas directement le moyen de récupérer

l'information. En effet, une donnée provient nécessairement d'une activité. Cette dernière spécifie déjà si elle est exécutée par un humain, un humain via une machine ou en autonomie par une machine. Ainsi, il ne reste plus qu'à qualifier le média de stockage. Notre modélisation va se limiter à trois médias représentés par trois icônes : la donnée humaine (Figure 5.6-d), la donnée papier (Figure 5.6-e) et la donnée numérique (Figure 5.6-f). La case adjacente au symbole permet de renseigner la localisation de la donnée, c'est-à-dire la personne disposant de la connaissance de la donnée dans le cas d'une information humaine, le document recensant la donnée dans le cas d'un formulaire papier et la base de données de stockage dans le cas d'une donnée numérique. Ce dernier cas crée une redondance vis-à-vis de l'icône de base de données présente nativement dans la norme BPMN. Il a été choisi de ne pas l'employer pour pouvoir améliorer la lisibilité des cartographies, les flèches se dirigeant vers les bases de données venant rapidement complexifier la représentation par une accumulation de lignes.



Figure 5.6 Icône du pictogramme de donnée : a) type de la donnée b) fréquence de la donnée  
c) délais de la donnée d) donnée humaine e) donnée papier f) donnée numérique

Finalement, concernant les données, un certain nombre de caractéristiques sont validées de manière native par notre modèle. Tout d'abord, les caractéristiques Th-RepD.14, Th-RepD.15 et Th-RepD.22 demandent de spécifier si une donnée possède une utilisation. Dans notre cas, une donnée a un usage si et seulement si elle est associée à une activité par une flèche d'association. Dans le cas contraire, elle n'a pas d'utilité. De même, pour savoir si une donnée est disponible, comme demandé par la caractéristique Th-RepD.21, elle doit émaner d'une activité. Finalement une donnée est considérée comme digitale, comme l'entend la caractéristique Th-RepD.23, si elle est numérique, c'est-à-dire que la donnée est décrite par la Figure 5.6-f.

#### 5.2.4 Cartouche et indicateur de performance

Par convention, la cartographie de processus possède toujours un bloc de version. Notre modèle (Figure 5.7) propose de le définir clairement avec les indications suivantes :

- Organisation : organisation pour laquelle la cartographie a été réalisée;
- Projet : projet dans le cadre duquel la cartographie a été réalisée;

- Titre : titre de la cartographie;
- Auteur : nom de l'auteur de la cartographie; et
- Date : date de création ou de mise à jour de la cartographie.

D'autre part, il est courant de voir apparaître un bloc de remarque permettant de faire apparaître des notes concernant la cartographie. Ce bloc est libre pour les auteurs de la modélisation.

Performance		Maturité		Remarque(s)	Version	
	Temps de cycle	Organisation	0...5		...	Organisation
	Coût d'exécution	Planification et budgétisation	0...5	Projet		...
	Investissement	Comptabilité	0...5	Titre		...
	Rentabilité	Rapport d'analyse et de gestion	0...5	Auteur		...
...	...	Révision et maintenance des données	0...5	Date		...

Figure 5.7 Cartouche du modèle 4.0

Pour l'instant, les caractéristiques mises en place spécifient à l'échelon local le processus. Il est cependant nécessaire de pouvoir qualifier les processus à l'échelon global, notamment pour permettre de comparer deux itérations du même processus. Un espace pour faire apparaître un certain nombre d'indicateurs globaux a donc été prévu. Il n'est pas possible de lister de manière explicite l'ensemble des indicateurs à mettre en place, car ils peuvent dépendre du cas d'application. Néanmoins, certains indicateurs locaux ont été agrégés à l'échelle globale. En effet, le temps de cycle d'un processus peut être obtenu en additionnant le temps de cycle des activités appartenant au chemin critique du processus. L'investissement nécessaire à la mise en place des changements est obtenu grâce à une simple somme. D'autre part le coût d'utilisation dépend de la présence de boucles de rétroaction. Il est cependant possible d'obtenir des estimations par simulation. Les moyens d'y arriver ne seront cependant pas abordés dans le cadre de ce mémoire. En comparant ces éléments d'une itération avec ses prédécesseurs, il est possible de calculer la rentabilité sous forme de gain. Une icône (Figure 5.8) a été définie pour symboliser cet indicateur qui remplit la fonction de la caractéristique ThPerfC.2.



Figure 5.8 Icône du cartouche : Rentabilité/Gain

## 5.3 Validation graphique

Telle que présentée dans le Chapitre 3, la validation de notre modèle se déroule en deux temps. Dans un premier temps les icônes développées ont été soumises en parallèle de leur conception à une validation graphique correspondant à l'approbation de leur forme et du message intrinsèque qu'elles véhiculent. Le deuxième temps consiste à valider la bonne interprétation lors de l'utilisation de notre modèle. Cette dernière partie sera effectuée à partir du cas d'étude et sera donc présentée dans le Chapitre 6.

### 5.3.1 Méthodologie

La méthodologie utilisée pour valider les icônes développées se base sur un processus de normalisation des pictogrammes (Vaillant, 1997). Ce processus est constitué de quatre essais :

1. Essai d'adéquation : sélectionner un « nombre limité » de candidats qui répondent grossièrement au besoin;
2. Essai de compréhension : identifier les traits communs des pictogrammes sélectionnés en mesurant leurs taux d'identification pour créer un seul pictogramme à partir des éléments-clés;
3. Essai d'appariement : vérifier que le pictogramme retenu ne puisse pas provoquer de confusion; et
4. Essai de discrimination : s'assurer de la bonne identification graphique en situation réelle.

Dans notre cas, la forme de chaque pictogramme présenté précédemment a été définie après consultation de multiples sources d'inspiration et dans le souci de respecter le style graphique actuel : le « Flat Design » (Dupuy, 2015). L'essai d'adéquation n'est ici pas nécessaire. De même, ayant un unique pictogramme par besoin, l'essai de compréhension se restreint à la mesure du taux d'identification. Ainsi, trois tests vont donc être mis en place sous forme de sondage :

1. Test de compréhension : valider qu'un minimum de 50% des sondés associent le pictogramme à la bonne description parmi 4 choix possibles;
2. Test d'appariement : valider qu'au moins 50% des sondés soient en accord avec l'association du pictogramme avec sa description; et
3. Test de discrimination : valider qu'au moins 50% des sondés arrivent à discerner les pictogrammes dans leur cadre d'utilisation réel.

Les deux premiers tests ont été envoyés à deux groupes distincts respectivement de 90 et 30 étudiants de Polytechnique Montréal ayant des notions en modélisation des processus d'affaires. La participation volontaire à nos tests est restée modeste, puisqu'elle a été d'environ un quart sur les deux tests, avec respectivement 21 et 9 répondants. Cependant, notre étude n'a aucune prétention statistique, puisqu'elle vient en support à la création du modèle. Finalement, pour le dernier test, un groupe de sept experts en modélisation des processus a été formé pour répondre au sondage après une explication du modèle développé.

## 5.3.2 Résultats

### 5.3.2.1 Test de compréhension

Ce test a donc été modifié par rapport à l'essai utilisé lors du processus de normalisation de pictogramme sur lequel il est basé. L'ensemble des icônes a ainsi été soumis au sondage. L'intégralité du sondage tel que soumis est disponible en Annexe B.

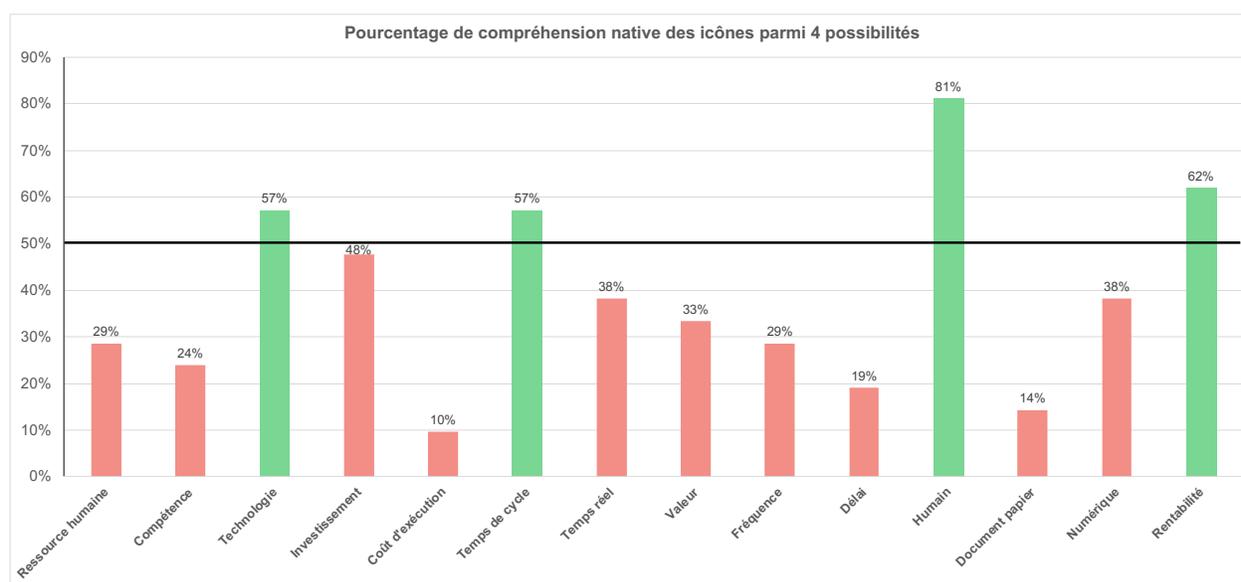


Figure 5.9 Résultats du test de compréhension

Une barre à 50% en termes d'identification intrinsèque, c'est-à-dire reconnaissable uniquement à leur forme, a été placée permettant de définir deux groupes d'icônes (Figure 5.9). Tout d'abord, les symboles dont le taux d'identification est inférieur à 50% ont dû être modifiés. L'icône de **ressource humaine** a été simplifiée pour ne pas être confondue avec la notion d'équipe. L'icône de **compétence** a été totalement revue pour y retirer la notion de réflexion. L'icône

d'**investissement** évoquant trop le dollar ou le coût a aussi été modifiée. La notion d'exécution s'est vue renforcée sur l'icône relative au **coût d'exécution**, permettant de diminuer l'aspect « économie circulaire ». L'icône **temps réel** a été réorienté vers l'aspect temps pour ne pas qu'elle soit confondue avec une cible. L'icône du **type de donnée** a initialement été testée sous la description « valeur de la donnée ». Cette description étant imparfaite, elle a été modifiée. De plus, le symbole a été revu en le calquant sur le modèle des types de fichier que l'on peut retrouver en informatique. Pour ne pas être confondue avec une fonction, une pulsation a été ajoutée à l'icône de **fréquence**.

Tableau 5.1 Différentes versions des icônes : Initial (Version 1)  
et après le test de compréhension (Version 2)

Icône	Ressource humaine	Compétence	Technologie	Investissement	Coût d'exécution	Temps de cycle	Temps réel
Version 1						TC	
Version 2							

Icône	Type de donnée	Fréquence	Humain	Document papier	Numérique	Délai	Rentabilité
Version 1							
Version 2						$\Delta t$	

Pour leur part, les icônes de **technologie**, d'**humain** et de **rentabilité** ayant obtenues un score supérieur à 50%, elles ont été conservées à l'identique. D'autre part, l'apparence de l'icône de **temps de cycle** a été harmonisée avec celle du coût d'exécution dans un souci d'homogénéisation entre les deux symboles qui permettent, par multiplication au niveau d'une activité, de déterminer le coût de l'activité. Pour spécifier la notion temporelle de l'écart, la lettre « t » a été ajoutée à l'icône de **délai**. L'icône **document papier**, étant trop orienté vers une imprimante, a été totalement revue. Finalement, la notion de numérique a été accentuée par l'ajout de code binaire sur l'icône du **numérique**. La version initiale des icônes (Version 1) ainsi que celle résultant des modifications

consécutives au test de compréhension (Version 2) sont présentées dans le Tableau 5.1. Les résultats détaillés du sondage sont aussi à retrouver en Annexe C.

### 5.3.2.2 Test d'appariement

Au cours du second test, l'ensemble des icônes a été présenté avec leur description respective. Ainsi, les répondants ont dû juger s'ils étaient en accord avec l'association proposée en répondant pour chaque icône à un questionnaire à choix unique ayant pour réponse : tout à fait d'accord, d'accord, pas d'accord, pas du tout d'accord. Le sondage est disponible en Annexe D.

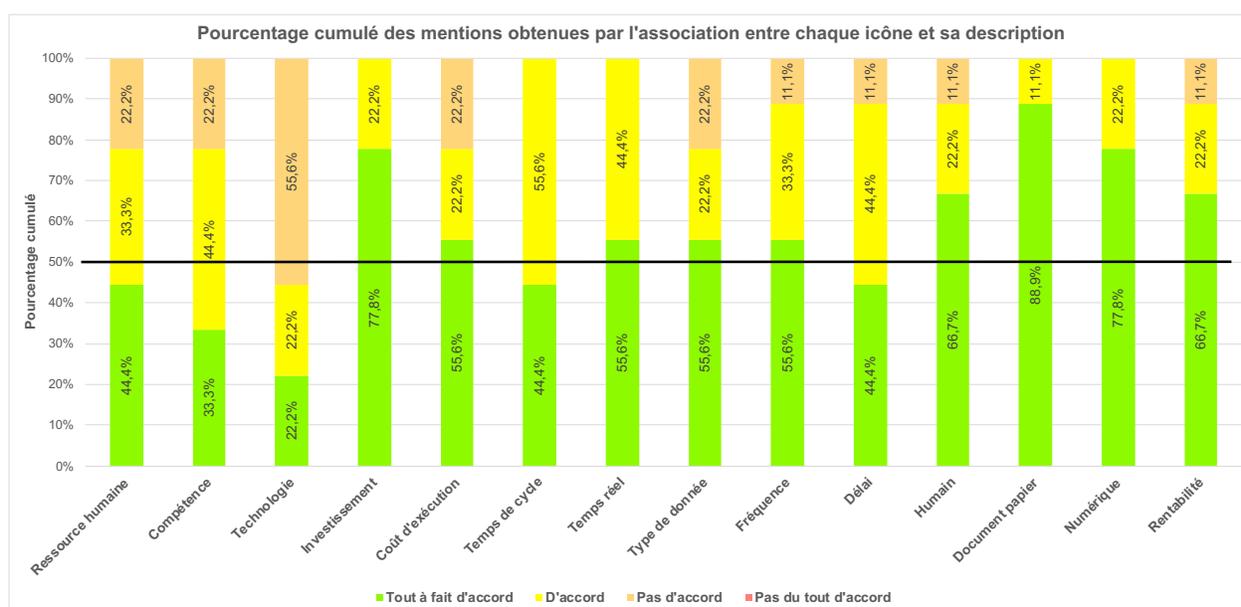


Figure 5.10 Résultats du test d'appariement : histogramme en pourcentage cumulé

A l'instar d'un scrutin utilisant le jugement majoritaire, la mention médiane sur un histogramme en pourcentage cumulé a été relevée pour chaque icône (Figure 5.10). Ainsi la mention obtenue par chaque icône reflète l'avis exprimé par au moins 50% des répondants. Nos résultats permettent de distinguer trois groupes. Tout d'abord les icônes faisant l'unanimité en ayant reçu la mention « tout à fait d'accord », car elles ont été approuvées à plus de 50% par cette mention. Ce groupe est constitué des icônes d'**investissement**, de **coût d'exécution**, de **temps réel**, de **type de donnée**, de **fréquence**, d'**humain**, de **document papier**, de **numérique** et de **rentabilité**. Un autre groupe est constitué des icônes ayant obtenu la mention « d'accord », c'est-à-dire qui ont été approuvées à plus de 50% par au moins ce jugement ou la mention « tout à fait d'accord ». Cet ensemble englobe les icônes de **ressource humaine**, de **compétence**, de **temps de cycle** et de **délai**. Ces

deux groupes d'icônes présentent des mentions favorables et sont ainsi approuvés pour la suite du processus.

Finalement, un dernier groupe présentant la mention « Pas d'accord » peut être établi. Il est uniquement constitué de l'icône de **technologie**. Ainsi, un élément de ce pictogramme provoque un risque de confusion qui n'avait pas été soulevé lors du test de compréhension. C'est pourquoi il a été choisi de légèrement modifier l'icône en lui attribuant un aspect de technologie numérique qui est sans doute davantage en phase avec l'idée que se fait la société actuelle de la technologie. La version des icônes soumises lors de ce second sondage (Version 2) ainsi que celle résultant des modifications consécutives au test d'appariement (Version 3) sont présentées dans le Tableau 5.2. Les résultats détaillés du sondage sont aussi à retrouver en Annexe E.

Tableau 5.2 Différentes versions des icônes : Après le test de compréhension (Version 2) et après le test d'appariement (Version 3)

Icône	Ressource humaine	Compétence	Technologie	Investissement	Coût d'exécution	Temps de cycle	Temps réel
Version 2							
Version 3							

Icône	Type de donnée	Fréquence	Humain	Document papier	Numérique	Délai	Rentabilité
Version 2							
Version 3							

### 5.3.2.3 Test de discrimination

Le dernier test de validation graphique s'est effectué en deux temps. Tout d'abord, une formation a été délivrée sur le GRMI4.0 sous la forme d'une capsule vidéo<sup>7</sup>. Puis les sondés ont dû répondre

<sup>7</sup> La capsule vidéo est disponible en suivant le lien : <https://youtu.be/9Iq6Lo3E1Ik>

à un ensemble de 18 questions portant sur une cartographie des processus conçue spécifiquement pour ce sondage. Les questions du sondage visaient à confirmer l'intelligibilité de notre modèle par le biais des choix graphiques effectués pour la représentation des différentes caractéristiques. Le questionnaire est disponible en Annexe F.

Pour ce qui est des résultats, l'ensemble des questions a eu un taux de bonnes réponses supérieur à la limite de 50% qui avait été fixée (Figure 5.11). Dans les faits, le pourcentage de retours favorables dépasse même 70% pour 17 des 18 questions. Ce sondage montre ainsi, que suite à une courte formation, le GRMI4.0 est intelligible par une majorité de sondés familiers avec le BPMN. Les résultats complets de ce test sont à retrouver en Annexe G.

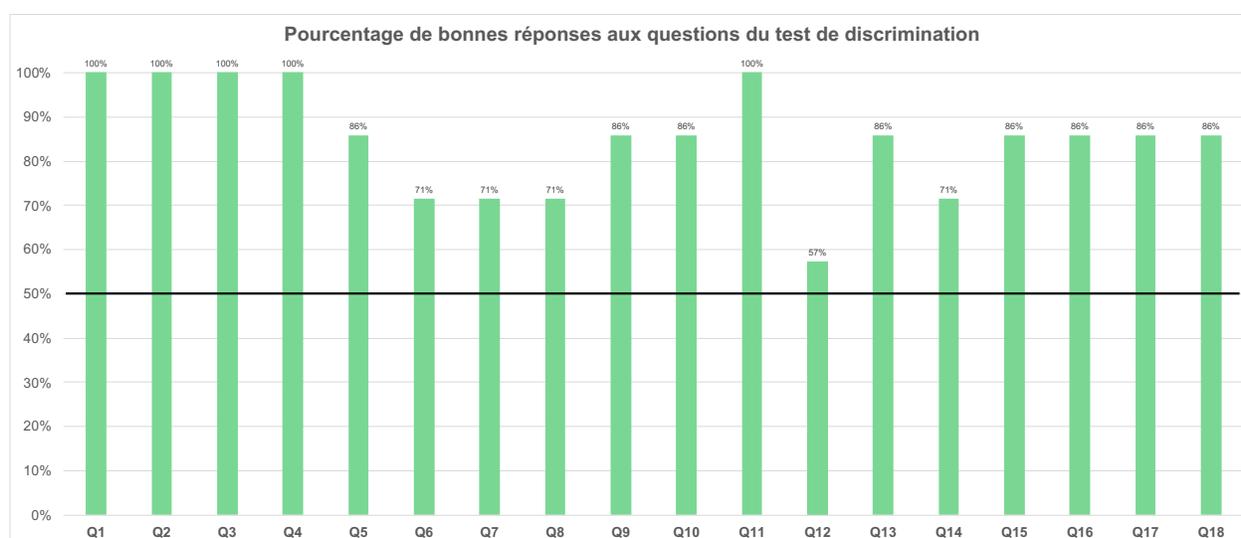


Figure 5.11 Résultats du test de discrimination

## 5.4 Outil numérique

Une fois la nouvelle symbolique établie et validée, il a été nécessaire, pour utiliser notre solution, de l'implémenter dans un logiciel de modélisation. Ainsi, cette section sert principalement à présenter les éléments graphiques tels qu'ils seront utilisés dans le Chapitre 6.

Dans le cadre de cette recherche, nous avons utilisé le logiciel Microsoft Visio. Ce logiciel possède des jeux de pictogrammes propres à chaque formalisme utilisable dans le logiciel. Il a été possible

de développer un gabarit Microsoft Visio, c'est-à-dire un jeu de pictogrammes, pour le GRMI4.0<sup>8</sup> à partir de celui disponible pour le BPMN. Ainsi le pictogramme d'activité a été modifié pour accueillir les nouvelles caractéristiques. Pour sa part le pictogramme de donnée a été décliné en trois, permettant sa déclinaison en donnée humaine, papier et numérique. La Figure 5.12 présente donc le pictogramme d'activité et les trois déclinaisons du pictogramme de donnée. Finalement, les quatre blocs constituant le cartouche ont été créés.

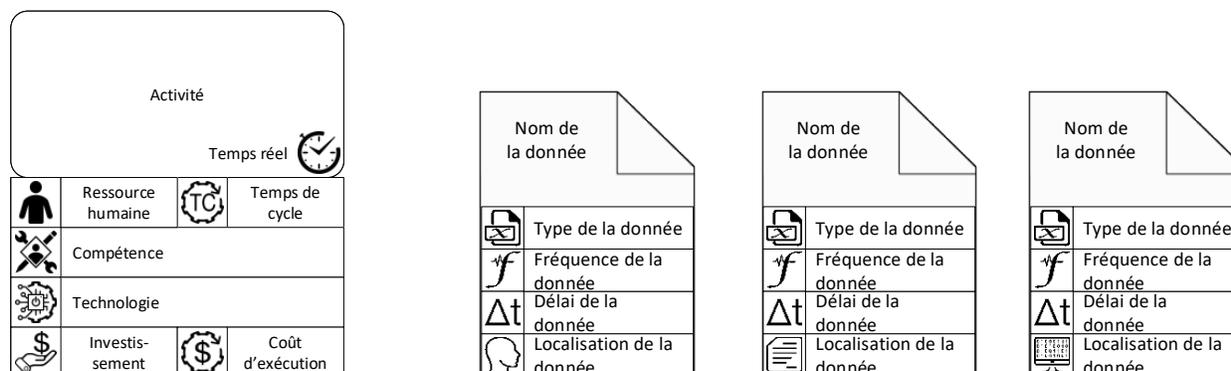


Figure 5.12 Pictogrammes d'activité (à gauche) et de donnée (à droite) dans Microsoft Visio

## 5.5 Conclusion

Ce chapitre a permis de présenter notre modèle de cartographie 4.0. Pour ce faire, les caractéristiques préalablement identifiées dans le Chapitre 4 ont été mises en œuvre sous forme graphique. Bien que le BPMN permette de modéliser fidèlement les processus, pour satisfaire les besoins de l'industrie 4.0 il est nécessaire de compléter ce standard, en particulier au niveau de la description des technologies et des données. Les ajouts graphiques ont pu être développés et validés en parallèle grâce à l'application du processus adapté de normalisation de pictogrammes. Pour faciliter l'utilisation de notre modèle, un gabarit a été créé sous Microsoft Visio. Finalement, le GRMI4.0, qui sera validé de manière expérimentale dans le chapitre suivant, remplit l'objectif n°2 de notre recherche qui consistait au développement d'un modèle de cartographie adaptée à l'industrie 4.0.

<sup>8</sup> Le gabarit Microsoft Visio permettant d'utiliser le GRMI4.0 est téléchargeable en suivant ce lien: <https://drive.google.com/file/d/1lrHQyHmX22Ny40kYBmR2pntep6G1N00Q/view?usp=sharing>

## CHAPITRE 6 EXPÉRIMENTATION

### 6.1 Introduction

La dernière étape de la méthode DRM consiste en l'application du modèle développé sur un cas d'étude. Le Chapitre 6 présente dans un premier temps l'expérimentation sur le cas d'étude du partenaire industriel : l'implantation de la méthode de gestion de projet par valeur acquise. Dans un second temps, la validation expérimentale du modèle sera menée.

### 6.2 Application du modèle à l'implantation de la méthode de la valeur acquise

Le partenaire industriel est un acteur du secteur de la construction qui souhaite implanter à grande échelle sur ses chantiers en bâtiments et en génie civil, la méthode de la valeur acquise pour compléter ses outils de suivi classiques.

#### 6.2.1 Présentation de la méthode de gestion par valeur acquise

Le principal objectif de la gestion de projet en phase d'exécution est de garantir que le travail accompli respecte au mieux l'échéancier et le budget alloué lors de la phase de planification. Le suivi de projet classique se base donc essentiellement sur la comparaison entre les dépenses réellement effectuées (Coût réel – CR) par rapport aux dépenses budgétées (Valeur planifiée – VP). Le principal inconvénient de ce type de suivi réside dans le fait qu'il ne présente aucune notion temporelle. Par exemple, un projet peut sembler mal en point, car le coût réel est très élevé alors que, dans les faits, cet excédent de dépenses peut être dû au fait que le projet ait pris de l'avance. Pour pallier ce problème, la méthode de la valeur acquise découple la notion de coût et de temps en introduisant la valeur du travail effectué (Valeur acquise – VA). Cette valeur est donc comparée au coût réel et à la valeur planifiée pour obtenir l'écart respectif de coût et de temps permettant de savoir si le projet est plus économe que prévu ou s'il est trop coûteux et d'autre part si le projet est en avance ou en retard. Le cœur de ce mémoire n'étant pas la méthode de la valeur acquise, il n'abordera pas plus en détail les possibilités offertes par cette méthode.

Néanmoins, avant de pouvoir mener toute analyse de la valeur acquise, il est nécessaire de la calculer. Pour ce faire, il est primordial de connaître l'avancement du projet. Ainsi, le besoin sous-jacent au déploiement de la méthode de la valeur acquise est l'obtention, pour chaque activité du

projet, du pourcentage d'avancement aux dates de suivi. Cette donnée d'avancement doit ainsi être la plus objective possible et demeurer la plus à jour par rapport à la situation réelle.

## 6.2.2 Modélisation via le GRMI4.0

Après avoir été informé de la méthode que souhaitait implanter l'organisation partenaire dans son processus de gestion de projet, il est à présent possible de lui proposer les clés de cette transformation grâce à la modélisation développée dans le Chapitre 5. Pour commencer, la représentation du processus, présenté au format BPMN dans le Chapitre 4, sera adaptée au GRMI4.0. Par la suite, il sera possible de proposer une vision à l'entreprise, c'est-à-dire modéliser un cas d'implantation idéal : l'instant  $T_n$ . Finalement, il est possible de modéliser une infinité d'étapes intermédiaires entre les instants  $T_0$  et  $T_n$ . Il est important de rappeler que les concepts de l'industrie 4.0 doivent être mis en place progressivement et non par une révolution brutale (Danjou et al., 2017b). Conformément au souhait de l'entreprise partenaire, une seule étape intermédiaire sera réalisée. Par souci de compréhension, les différentes cartographies seront présentées dans l'ordre chronologique ( $T_0$ ,  $T_1$  puis  $T_n$ ) et non dans l'ordre dans lequel elles ont été réalisées ( $T_0$ ,  $T_n$  puis  $T_1$ ).

### 6.2.2.1 Modélisation de l'instant initial : $T_0$

La Figure 6.1 présente la modélisation du processus de gestion et de suivi de projet de construction du partenaire industriel à l'instant initial  $T_0$  grâce au GRMI4.0<sup>9</sup>. La description de la modélisation à l'instant  $T_0$  en neuf étapes synthétiques ayant été menée lors de la cartographie au format BPMN (Figure 4.1), ce paragraphe tâchera de détailler les apports notables introduits par notre modèle 4.0.

Tout d'abord, en ce qui concerne l'ensemble des **activités 1 à 9**, le GRMI4.0 permet, comme attendu, de spécifier les activités en termes de ressources humaines, de technologie, de temps et de coûts, et les données en termes de valeur, de fréquence, de délai et de localisation. Ces spécifications supplémentaires permettent aussi de calculer les indicateurs de performance globaux présents dans le cartouche de la cartographie. Cependant, ce nouveau formalisme permet aussi de

---

<sup>9</sup> Pour plus de lisibilité, la cartographie à  $T_0$  est disponible en version numérique via le lien : <https://drive.google.com/file/d/1wuiYliUk65zwOm3FPDJ--csNp2nIQaXp/view?usp=sharing>

mettre en avant des éléments problématiques via le code couleur. En particulier dans l'**activité 4**, il est à noter que la faible interopérabilité entre le logiciel comptable et Microsoft Project, pour gérer la Baseline, est problématique dans le processus actuel de l'entreprise. Dans l'**activité 7**, on retrouve ce même problème avec un suivi qui est effectué sur deux plateformes informatiques différentes. D'autre part, les ajouts du GRMI4.0 permettent de mettre en lumière un délai susceptible d'atteindre 30 jours pour l'enregistrement des dépenses, ce qui peut provoquer un ralentissement préjudiciable au processus.

### 6.2.2.2 Modélisation d'étape intermédiaire : T1

Ce paragraphe décrit la cartographie T1 présentée dans la Figure 6.2<sup>10</sup>. Comme annoncé, la modélisation de cet instant T1 a, dans les faits, été réalisée postérieurement à l'obtention de la cartographie Tn. En effet, une fois que l'origine et la solution idéale d'implantation de la méthode de la valeur acquise ont été modélisées, il est possible de détailler le chemin à suivre pour atteindre la vision présentée dans Tn. Cependant, pour que les modifications soient plus intelligibles pour notre lecteur, une présentation chronologique a été préférée. Pour le cas d'étude, l'entreprise partenaire a souhaité qu'il ne soit mis en œuvre qu'une seule étape intermédiaire décrivant l'implantation immédiate de la méthode de la valeur acquise et nécessitant le moins de développements technologiques possible. Les mesures proposées sont issues d'un projet de recherche parallèle à nos travaux et prescrivant au partenaire industriel un standard de mise en œuvre de la méthode de la valeur acquise (Panquet, 2020). Notre travail utilisera les prescriptions émises – et en particulier les valeurs issues de l'analyse de maturité relative à la méthode de la valeur acquise – et se contentera de les modéliser.

À T1, le processus de gestion de projet reprend logiquement les neuf activités du processus à T0. L'**activité 1** est légèrement modifiée avec l'apparition d'une ébauche de WBS. Lors de l'**activité 2**, le développement du WBS final du projet, qui était basé au préalable sur de bonnes pratiques, devra se baser sur un WBS standard clairement défini. Puis, à partir de « l'Organization Breakdown Structure » (OBS) – en français structure organisationnelle du projet – propre à l'entreprise et du

---

<sup>10</sup> Pour plus de lisibilité, la cartographie à T1 est disponible en version numérique via le lien : [https://drive.google.com/file/d/1tTIyiZRMnPcNflcWc3zX0D\\_glDfnjLhQ/view?usp=sharing](https://drive.google.com/file/d/1tTIyiZRMnPcNflcWc3zX0D_glDfnjLhQ/view?usp=sharing)

WBS, il est suggéré par le standard de réaliser la « Responsibility Assignment Matrix » (RAM) – en français « matrice des responsabilités » – du projet, affectant les activités du WBS aux ressources humaines de l'OBS. Pour ce qui est de l'**activité 3** de planification, deux améliorations sont apportées. D'une part, le budget est réalisé par le département de contrôle de coût. D'autre part, une règle de progrès est affectée à chaque activité planifiée. Une règle de progrès correspond à l'outil qui va permettre concrètement de mesurer la progression des tâches et ainsi rendre possible le calcul d'un pourcentage d'avancement pour chaque activité. Au début de l'**activité 4**, grâce à l'ajout du budget et des règles de progrès, la « Baseline » devient la « Performance Measurement Baseline » (PMB) – en français « référence pour la mesure de la performance ». Finalement le problème d'intégration entre le logiciel comptable et Microsoft Project n'est toujours pas résolu à T1 qui correspond à une implantation de la méthode dans des délais très courts. Au niveau de l'**activité 5**, le modèle BIM n'a pas encore été étendu à l'intégration des coûts et des règles de progrès pour ne pas apporter de développement technologique trop long et complexe qui se révélerait inexploitable ou peu rentable sans gros investissement technologique dans la suite du processus. Ainsi, comme à T0, le BIM est uniquement utilisé par le partenaire industriel de manière limitée comme par exemple la visualisation marketing des projets. Grâce à la conception des règles de progrès, il devient ainsi possible pour le gestionnaire de projet, dans l'**activité 6**, de déterminer un pourcentage d'avancement des activités à partir de l'évaluation de la progression du chantier mené par ses surintendants. Le cœur de l'implantation de la méthode de la valeur acquise se fait à l'**activité 7**. L'enregistrement des dépenses est désormais effectué par le département de contrôle de coût. L'importation dans le logiciel comptable des pourcentages d'avancement du projet, issus de Microsoft Project, rend possible le calcul de la valeur acquise, en plus de la valeur planifiée et du coût réel. Il est donc possible d'analyser la valeur acquise en plus de l'analyse de suivi standard réalisée par l'entreprise. Pour minimiser les biais, il est préconisé que ces analyses soient effectuées par le département de contrôle des coûts. Au début de l'**activité 8**, ce département va ainsi pouvoir challenger le gestionnaire de projet en lui soumettant les non-conformités dans le suivi et en lui suggérant des mesures correctives. Finalement, l'**activité 9** ne se voit pas modifiée.

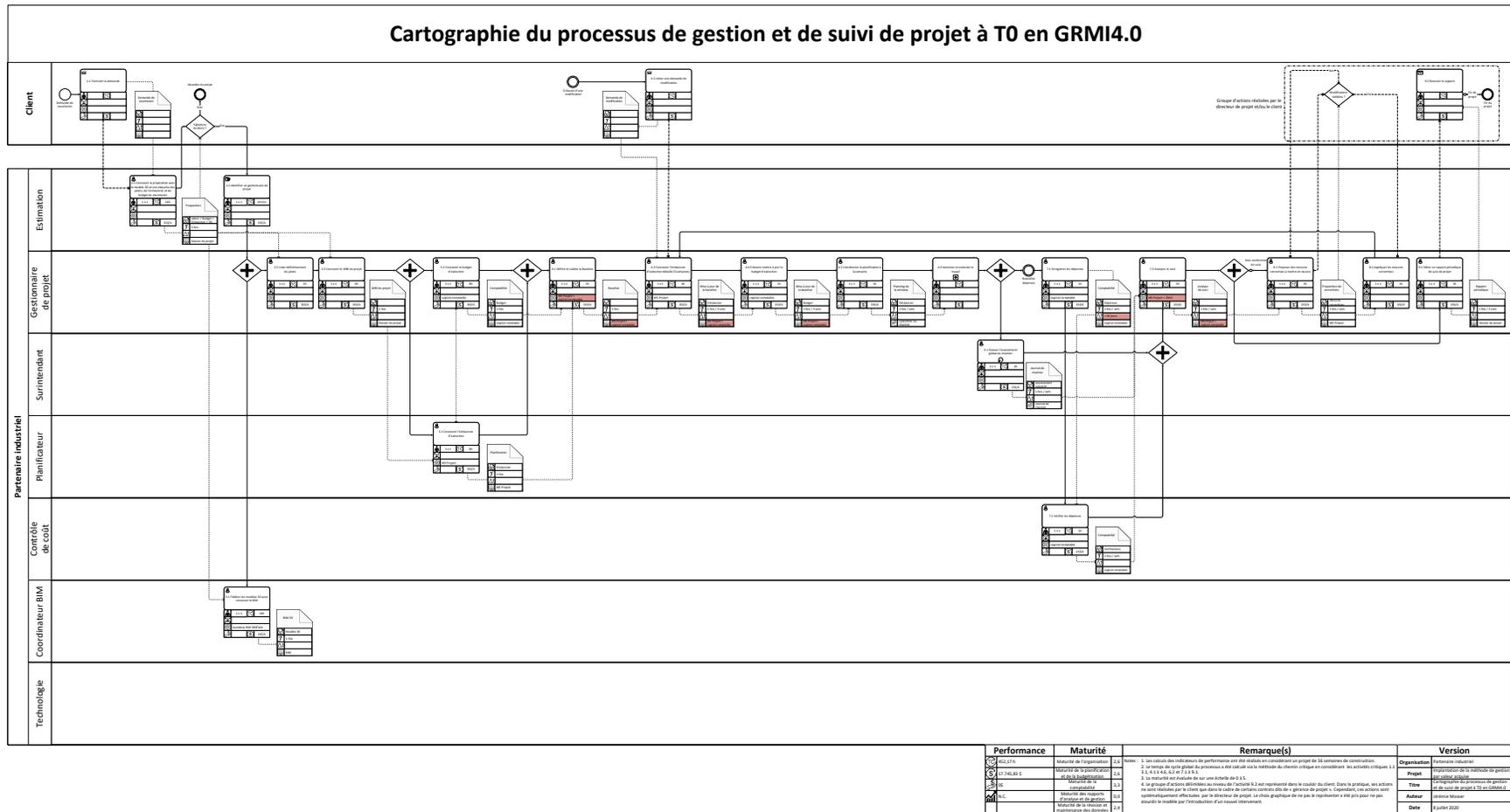


Figure 6.1 Cartographie du processus de gestion et de suivi de projet du partenaire industriel à l'instant T0 en GRMI4.0



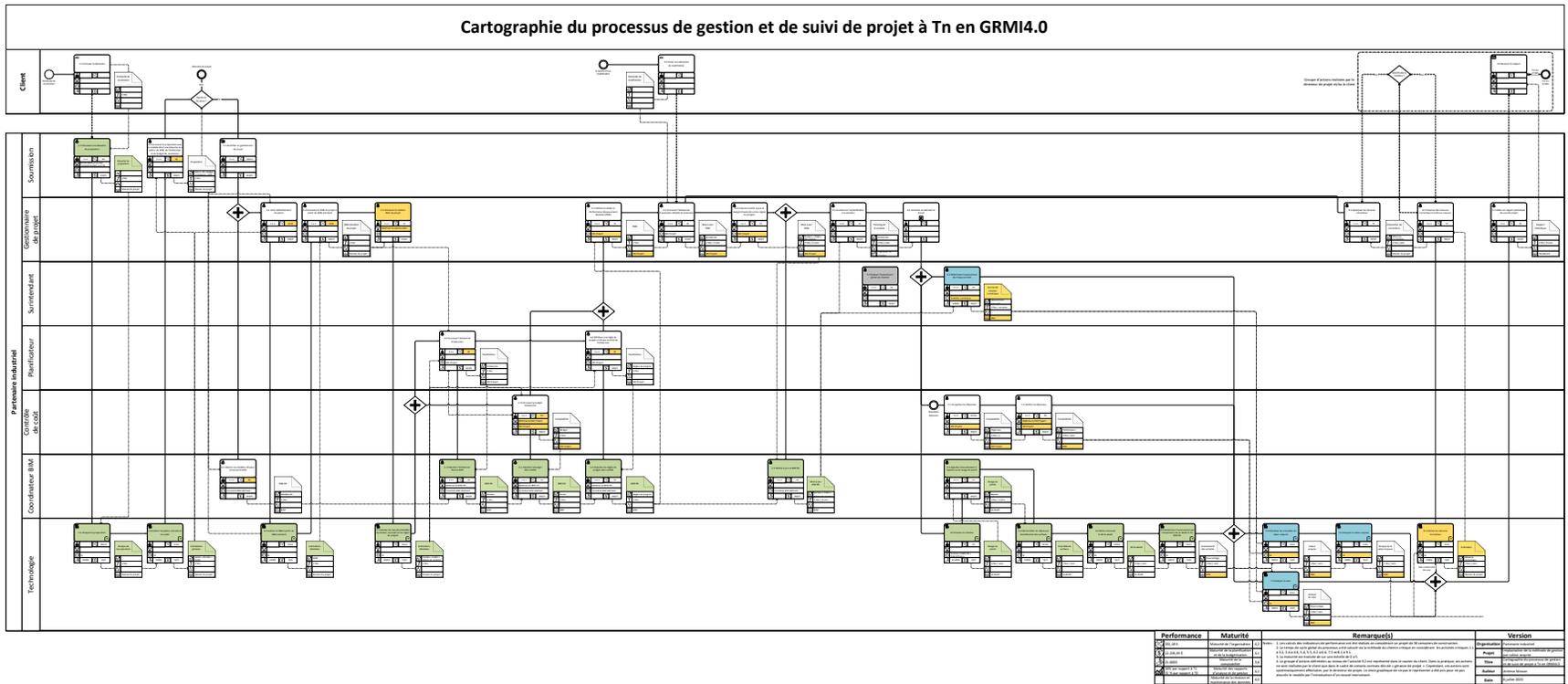


Figure 6.3 Cartographie du processus de gestion et de suivi de projet du partenaire industriel à l'instant Tn en GRMI4.0

### 6.2.2.3 Modélisation de la solution technologique : Tn

La deuxième étape menée dans notre cas d'application consistait à donner une vision à notre partenaire quant à la solution idéale qu'il serait souhaitable de mettre en œuvre pour parvenir à une application de la méthode de la valeur acquise en phase avec les concepts de l'industrie 4.0. Ainsi, la Figure 6.3 expose la cartographie Tn<sup>11</sup> présentant de manière assez prescriptive les choix retenus en termes technologiques. Bien que l'industrie 4.0 puisse tendre vers l'autonomie des systèmes, les améliorations sélectionnées viennent majoritairement en support des décisions humaines. Ainsi, pour faciliter l'acceptation des changements vers l'industrie 4.0, il est préconisé de laisser la décision finale aux ressources humaines.

Lors de l'**activité 1**, le département d'estimation qui reçoit la demande de soumission va dans un premier temps traduire cette proposition pour la rendre intelligible par une Intelligence artificielle (IA). L'IA va pouvoir analyser cette proposition en se basant sur un algorithme d'analyse de données massives. Ces données sont en fait celles des projets antérieurs menés par l'entreprise. L'analyse de cette proposition permettra ensuite d'estimer les activités nécessaires à la conduite du projet. Ces estimations sont par la suite utilisées par l'estimateur pour déterminer la proposition de solution qui sera soumise au client. De la même manière, dans les **activités 2 et 3**, il est possible d'estimer, à l'aide d'une IA, le WBS du projet ainsi que la durée, le coût et la règle de progrès de chaque activité, ce qui vient grandement faciliter les choix des ressources humaines et ainsi réduire le temps de travail consacré à ces tâches. Il a été choisi de basculer la comptabilité, donc l'élaboration du budget, directement dans Microsoft Project pour régler le problème d'incompatibilité technologique entre Microsoft Project et le logiciel comptable. Mis à part l'utilisation exclusive de Microsoft Project, l'**activité 4** n'est pas modifiée entre l'instant T1 et Tn. En parallèle des étapes menant à la création du PMB et de ses trois éléments caractéristiques (échancier, budget et règles de progrès), l'**activité 5** offre de saisir les pleines compétences du BIM. En effet, en intégrant l'échancier, puis le budget et enfin les règles de progrès, le BIM 3D

---

<sup>11</sup> Pour plus de lisibilité, la cartographie à Tn est disponible en version numérique via le lien : [https://drive.google.com/file/d/1rL7nDQR6P8-wa\\_MAD9dny7fv23y4oVEh/view?usp=sharing](https://drive.google.com/file/d/1rL7nDQR6P8-wa_MAD9dny7fv23y4oVEh/view?usp=sharing)

devient BIM 4D puis BIM 5D et enfin BIM XD<sup>12</sup>. Le BIM ayant été conçu pour agréger les données des projets de construction, il a semblé judicieux d'utiliser cet outil pour devenir la base de centralisation des données qu'elles soient géométriques, temporelles, budgétaires ou relevant de l'avancement. Ainsi le BIM XD aura besoin d'être mis à jour aussi régulièrement que le projet subira des modifications.

Dans la cartographie Tn, la détermination de l'avancement des activités lors de l'**activité 6** s'obtient de deux manières : robotique et humaine. Tout d'abord des drones au sol ou dans les airs équipés de scanner LASER 3D ainsi que d'outils de navigation sont déployés sur les sites de construction. Ces robots permettent de fournir un nuage de points à partir de la numérisation des chantiers. Après une opération de repérage souvent manuelle des nuages de points, une IA est capable, par identification de surfaces, de rétroconcevoir un modèle 3D As-Build – en français « tel que construit ». Connaissant la date de la numérisation 3D, le modèle As-Build devient 4D. En comparant le modèle 4D As-Build avec celui du BIM XD, il est ainsi possible d'obtenir le pourcentage d'avancement de chaque activité de manière totalement objective suivant les règles de progrès établies. Finalement, pour ne pas dépendre entièrement de ressources robotisées, les journaux de chantier deviennent digitaux grâce à une plateforme numérique supportée par le modèle BIM, en cours de déploiement chez le partenaire industriel. Ainsi, les surintendants de chantier ne se contentent plus d'évaluer la progression globale du chantier, mais renseignent directement les journaux avec l'avancement des activités grâce à l'intégration de cette plateforme numérique sur une tablette. Par la suite, les activités d'analyse de suivi standard et via la méthode de la valeur acquise de l'**activité 7**, peuvent aussi être réalisées en temps réel grâce à l'emploi d'une IA. L'IA par analyse de données va aussi, dans l'**activité 8**, pouvoir estimer les mesures correctives

---

<sup>12</sup> Il n'existe pas de consensus dans l'industrie quant aux dimensions supérieures à 5 pour le BIM. Cependant il est fréquent de retenir :

- BIM 6D : ajout des concepts liés au développement durable (ex : analyse énergétique, ...)
- BIM 7D : ajout des concepts liés à la durée de vie (ex : informations de maintenance, ...)
- BIM XD : ajout de n'importe quelles autres données (ici : règles de progrès)

pour maintenir le projet dans le droit chemin, afin de les soumettre au gestionnaire de projet qui pourra prendre les décisions finales. Ultiment, l'**activité 9** n'est toujours pas modifiée.

### 6.2.3 Analyse comparative

Il est dorénavant possible de mener une analyse comparative des différentes itérations de cartographies présentées dans le but d'étudier les gains obtenus au niveau du processus global. Il est important de différencier le but des deux transformations présentées.

Tout d'abord, le passage de T0 à T1 est une transformation qualitative du processus. Il n'est pas question ici de réduire les coûts ou la durée de celui-ci, mais de le bonifier par l'ajout de la méthode de la valeur acquise pour le suivi de la gestion de projet. Ainsi, on remarque un processus plus long et plus coûteux dû à l'ajout des différentes étapes. Cependant cette transformation ne nécessite pas d'investissement technologique et permet donc de mettre en place un certain nombre de projets pilotes pour prouver l'efficacité de la méthode de suivi mise en place et ainsi faciliter l'implantation complète de la méthode au sein de la société en limitant la résistance au changement. Ainsi, la visibilité des changements se traduit principalement au niveau des indicateurs de maturité. En effet les niveaux de maturité deviennent en moyenne supérieurs à 3, ce qui correspond à une maîtrise du processus de valeur acquise encore imparfaitement standardisé, sur de multiples projets et non plus sur des projets uniques. Le franchissement de ce cap est nécessaire à l'implantation de la méthode de gestion par valeur acquise (Panquet, 2020).

A l'inverse, le passage de T1 à Tn est une transformation qui vise à maximiser l'efficacité du processus. En effet, la maturité en termes de valeur acquise est restée semblable entre les deux itérations comme l'attestent les niveaux de maturité des différents indicateurs. Ce sont ici les moyens de mise en œuvre de la méthode qui ont été modifiés. Le processus originellement effectué de manière quasi intégralement manuelle devient très technologique grâce à l'utilisation de drones et surtout de l'IA qui vient alléger la plupart des tâches de planification de projet. Ainsi, des gains de performance significatifs en termes de coût et de temps d'exécution du processus sont obtenus. Bien évidemment, ces bénéfices requièrent en contrepartie un investissement technologique conséquent.

## 6.3 Retour du partenaire industriel sur les cartographies

Après avoir validé la forme de notre modèle en parallèle de sa création (Section 5.3), il est logique de s'intéresser à l'intelligibilité du GRMI4.0 en vue de sa mise en pratique. Il s'agit en particulier de garantir que les messages véhiculés par la cartographie soient correctement interprétés par les destinataires de la modélisation.

### 6.3.1 Méthodologie

Pour ce faire, notre partenaire industriel a été mis à contribution pour effectuer un retour d'expérience. Ce type de validation ne peut se faire que difficilement de manière quantitative. Ainsi, il a été choisi de réaliser une analyse qualitative au moyen de questions ouvertes permettant d'amener une discussion libre sur le sujet (Tableau 6.1), faisant émerger les points forts et les points faibles de l'outil développé. Il est important de noter que les retours fournis par l'organisation partenaire ne concernent ni la forme du modèle qui a été validé en parallèle de son développement ni son application au cas précis de l'industriel, mais bien aux capacités du modèle à fournir l'information nécessaire à l'implantation de pratiques 4.0

Tableau 6.1 Retour du partenaire : questionnaire d'aide à la discussion

Concept	N°	Questions ouvertes
Général	1	Que pensez-vous de cette représentation ? En quoi est-elle compréhensible ?
	2	Pourquoi faut-il mettre en œuvre ces changements ?
Technologie	3	Que pensez-vous de l'impact des technologies mises en œuvre ?
Données	4	Pourquoi est-il nécessaire de visualiser les caractéristiques des données ? Et en particulier leur lieu de stockage ?
Organisation	5	Comment pensez-vous être impacté par ces changements ? Pensez-vous devoir être formé ?
Indicateurs	6	Que pensez-vous des indicateurs de performance disponibles ? Qu'en est-il de l'indicateur de rentabilité ?
	7	En quoi les temps de cycle des activités et celui du processus global sont-ils des informations pertinentes ?
	8	En quoi les indicateurs de coût d'exécution et d'investissement vous semblent-ils importants ?
	9	Que pensez-vous des indicateurs de maturité disponibles ?
Ouverture	10	Quels éléments auriez-vous souhaité voir plus développés ?
	11	Voyez-vous des éléments manquants à cette représentation ?
	12	Avez-vous d'autres remarques sur ces cartographies ?

Pour ce qui est des employés sollicités au niveau de l'entreprise partenaire, la plupart des retours ont été faits par nos deux interlocuteurs privilégiés au sein de la firme. L'un des intérêts à l'évaluation par ces deux personnes réside, d'une part dans leur expérience plus importante au niveau de la recherche académique, et d'autre part, dans le fait qu'ils aient pu apporter un regard critique sur l'évolution du modèle de cartographie au fil du temps rendue possible par l'application de la méthode DRM. En outre, nos deux collaborateurs sont aussi devenus, au sein de l'entreprise,

des « champions » des transformations proposées par notre travail et ont ainsi collecté les avis des employés que nous avons sollicités lors de l'audit du partenaire.

### 6.3.2 Résultats

De manière globale, le modèle de cartographie est jugé clair, avec une grande richesse au niveau des informations qui sont fournies par rapport à d'autres formalismes connus par le partenaire comme l'ANSI ou la VSM. L'analyse du processus est différente par rapport à la VSM, ce qui la rend complémentaire. Les représentations sont axées sur l'opérationnalisation, ce qui est un point extrêmement positif pour l'entreprise, intéressée par une mise en place rapide. De plus, grâce à sa relative simplicité, il est possible d'avoir une bonne compréhension des processus cartographiés sans avoir une très grande maîtrise du formalisme.

Pour notre partenaire, la principale limite de notre modèle est sa nature statique. Il aurait souhaité pouvoir mieux interagir avec la cartographie. En effet, dans un souci d'implantation effective des mesures proposées, l'entreprise doit prioriser ses investissements et procéder de manière progressive aux changements. C'est pourquoi le partenaire aurait souhaité pouvoir sélectionner de manière locale une partie du processus pour pouvoir l'optimiser et connaître les indicateurs de performance globaux, notamment l'investissement et la rentabilité, pour une amélioration donnée. Finalement, fournir un lien entre les mêmes activités ou leurs modifications, entre les différentes itérations du même processus, aurait aussi été un plus. De manière assez logique, l'étape suivante pour l'entreprise serait de concevoir un logiciel permettant d'une part la représentation des processus grâce au GRMI4.0 et d'autre part la simulation de scénarios d'implantation.

## 6.4 Conclusion

Cet ultime chapitre a permis d'expérimenter notre modèle de cartographie sur le cas d'étude de l'implantation de la méthode de la valeur acquise en gestion de projet chez notre partenaire industriel. Après avoir cartographié la situation initiale en GRMI4.0, ce qui a permis l'identification d'éventuels éléments préjudiciables, deux transformations successives ont été prescrites sous la forme de deux cartographies (à T1 et à Tn). La présentation de ces cartographies sous la forme de plan d'action à plus ou moins long terme a offert la possibilité de valider l'intelligibilité de notre modèle. Finalement, ce cas d'étude permet de valider l'objectif n°3 de notre recherche qui consistait en la mesure de l'applicabilité du modèle de cartographie au secteur de la construction.

## CHAPITRE 7 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

La cartographie pour la modélisation des processus d'affaires est une étape cruciale de l'amélioration continue ou de la réingénierie des processus. Le passage à des pratiques industrielles relevant de l'industrie 4.0 ne peut que difficilement s'envisager sans la réaliser. Cependant, il est légitime de s'interroger sur la capacité réelle des formalismes de cartographie actuels à représenter les processus de manière efficace, avec le souci de faciliter l'opérationnalisation des solutions technologiques. Notre revue de littérature a ainsi mis en évidence les lacunes des formalismes actuels et de leurs nombreuses améliorations, quant à leur réponse à la problématique de représentation de l'industrie 4.0. Nos travaux de recherche ont comblé ces lacunes et ont abouti au développement d'un nouveau modèle de cartographie : le « Gabarit de représentation et de modélisation pour l'industrie 4.0 » (GRMI4.0)

Du point de vue scientifique, nos travaux de recherche et le mémoire qui en résulte contribuent à l'avancement des connaissances suivant trois axes :

- Tout d'abord, un état de l'art sur la modélisation des processus a été établi alors qu'il était quasi inexistant dans la littérature actuelle. En outre, il n'existait pas de comparaison de formalisme de cartographie à aussi grande échelle. En ce sens, nos travaux viennent combler un vide dans la littérature scientifique;
- Puis un ensemble de caractéristiques pertinentes pour la représentation de l'industrie 4.0 a été extrait de la littérature. Cette liste d'attributs constitue en tant que telle un support pour le développement d'outils en lien avec la mise en place de pratiques 4.0; et
- Finalement, un modèle de cartographie des processus – le GRMI 4.0 – a été développé, permettant de préfigurer l'implantation de l'industrie 4.0 – ou d'en améliorer les composantes – en visualisant et en quantifiant les transformations induites.

Plus encore, notre travail va au-delà du simple modèle, puisqu'il comporte une contribution pratique et technologique pour l'industrie, permettant une réelle opérationnalisation de pratiques relevant de l'industrie 4.0. En effet, nous proposons un outil pour sa mise en application informatique grâce au développement d'un gabarit au format Microsoft Visio permettant son exploitation.

Néanmoins, un certain nombre de limites à notre modèle peuvent être évoquées. Tout d'abord au niveau de sa conception, la liste des caractéristiques 4.0 a été réduite suite au choix du BPMN comme base du GRMI4.0, puis les besoins émergents du partenaire industriel non encore inclus ont été ajoutés. Cependant, ceux-ci ne sont peut-être pas tant généralisables au secteur de la construction que supposé, ce qui pourrait alors mener au développement d'un modèle trop spécifique. D'autre part, les indicateurs de performance ne sont pas fournis avec des méthodes de calcul spécifiques et il convient de mener une évaluation à part. De même, la lecture du processus cartographié ne permet pas le calcul des niveaux de maturité. Ces données sont le résultat d'une analyse externe.

Finalement, nos travaux ouvrent la voie de manière contiguë à de nouveaux axes de recherche. En effet, notre modèle a pris en compte les besoins du secteur de la construction en matière de représentation 4.0. Il serait sans doute avantageux d'explorer la généralisation de notre modèle à l'ensemble de l'industrie. Ultimement, il serait tout aussi profitable de s'intéresser à l'informatisation de notre modèle en développant un logiciel permettant, d'une part de générer la cartographie d'un processus de manière plus aisée et permettant de conserver davantage de liens entre différentes itérations, et d'autre part d'intégrer des outils permettant le calcul des indicateurs de performance par simulation du processus. Des recherches complémentaires seraient donc pertinentes dans le but de faciliter l'implantation de pratiques 4.0 et ainsi permettre de mieux appréhender la 4<sup>e</sup> révolution industrielle.

## RÉFÉRENCES

- Ahn, H., & Chang, T. W. (2018). *Measuring similarity for manufacturing process models* (vol. 536). IFIP International Conference on Advances in Production Management Systems: Springer, Cham.
- Annane, A., Aussenac-Gilles, N., & Kamel, M. (2019). *BBO: BPMN 2.0 based ontology for business process representation*. Communication présentée à 20th European Conference on Knowledge Management, ECKM 2019, Lisbon; Portugal (vol. 1, p. 49-59). doi:10.34190/KM.19.113
- Blessing, L. T. M., & Chakrabarti, A. (2009). *DRM, a design research methodology*. London: Springer.
- Bocciarelli, P., D'Ambrogio, A., Giglio, A., & Paglia, E. (2017). *A BPMN extension for modeling Cyber-Physical-Production-Systems in the context of Industry 4.0, ICNSC 2017*. Communication présentée à 14th IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control, Calabria; Italy (p. 599-604). doi:10.1109/ICNSC.2017.8000159
- Brecher, C., Kusmenko, E., Lindt, A., Rumpel, B., Storms, S., Wein, S., . . . Wortmann, A. (2018). *Multi-level modeling framework for machine as a service applications based on product process resource models*. Communication présentée à 2nd International Symposium on Computer Science and Intelligent Control, ISCSIC 2018, Stockholm; Sweden. doi:10.1145/3284557.3284714
- Busert, T., & Fay, A. (2019). Extended Value Stream Mapping Method for Information based Improvement of Production Logistics Processes. *IEEE Engineering Management Review*, 47(4), 119-127. doi:10.1109/EMR.2019.2934953
- Cadavid, J., Alférez, M., Gérard, S., & Tessier, P. (2015). *Conceiving the model-driven smart factory*. Communication présentée à International Conference on Software and Systems Process, ICSSP 2015, Tallinn; Estonia (vol. 24-26-August-2015, p. 72-76). doi:10.1145/2785592.2785602
- Cala, A., Luder, A., Vollmar, J., & Foehr, M. (2017). *Evaluation of migration scenarios towards cyber-physical production systems using SysML*. Communication présentée à 3rd Annual IEEE International Symposium on Systems Engineering, ISSE 2017, Vienna; Austria. doi:10.1109/SysEng.2017.8088287
- Christoulakis, F., & Thramboulidis, K. (2016). *IoT-based integration of IEC 61131 industrial automation systems: The case of UML4IoT*. Communication présentée à 25th IEEE International Symposium on Industrial Electronics, ISIE 2016, Santa Clara; United States (vol. 2016-November, p. 322-327). doi:10.1109/ISIE.2016.7744911
- Constantinescu, C. L., Francalanza, E., & Matarazzo, D. (2015). *Towards knowledge capturing and innovative human-system interface in an open-source factory modelling and simulation environment*. Communication présentée à 9th CIRP International Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering, CIRP ICME 2014, Capri; Italy (vol. 33, p. 23-28). doi:10.1016/j.procir.2015.06.006

- Dallasega, P., Rauch, E., & Linder, C. (2018). Industry 4.0 as an enabler of proximity for construction supply chains: A systematic literature review. *Computers in Industry*, 99, 205-225. doi:10.1016/j.compind.2018.03.039
- Danjou, C., Bled, A., Cousin, N., Roland, T., Perrier, N., Bourgault, M., & Pellerin, R. (2020). Industry 4.0 in Construction Site Logistics: A Comparative Analysis of Research and Practice. *The Journal Of Modern Project Management*, 7(4). doi:10.19255/jmpm527
- Danjou, C., Rivest, L., & Pellerin, R. (2017a). *Douze positionnements stratégiques pour l'Industrie 4.0 : entre processus, produit et service, de la surveillance à l'autonomie*. Communication présentée à 12ème Congrès International de Génie Industriel; CIGI 2017, Compiègne; France (p. 1-8). Tiré de <https://espace2.etsmtl.ca/id/eprint/16253>
- Danjou, C., Rivest, L., & Pellerin, R. (2017b). *PME 2.0 Le passage au numérique - Industrie 4.0 : des pistes pour aborder l'ère du numérique et de la connectivité*, CEFRIO (p. 1-27). Tiré de [https://cefrio.qc.ca/media/1268/pme\\_20-le-passage-au-numerique.pdf](https://cefrio.qc.ca/media/1268/pme_20-le-passage-au-numerique.pdf)
- Doulfarah, K. (2019). *Industrie 4.0 : Tendances et défis*. (Mémoire de Maîtrise, Polytechnique Montréal, Montréal, Canada).
- Drath, R., & Horch, A. (2014). Industrie 4.0: Hit or hype? [Industry Forum]. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 8(2), 56-58. doi:10.1109/MIE.2014.2312079
- Dupuy, J.-P. (2015). Sémiotique des interfaces : la promesse du flat design. *Sensible et communication : Du cognitif au symbolique*, ISTE, Sciences cognitives. Tiré de <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01266762>
- Hartmann, L., Meudt, T., Seifermann, S., & Metternich, J. (2018). *Value stream method 4.0: Holistic method to analyse and design value streams in the digital age*. Communication présentée à 6th CIRP Global Web Conference, CIRPe 2018, Shantou; China (vol. 78, p. 249-254). doi:10.1016/j.procir.2018.08.309
- Hermann, M., Pentek, T., & Otto, B. (2016). *Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios: A Literature Review*. Communication présentée à 49th Hawaii international conference on system sciences (HICSS), Grand Hyatt on the Island of KauaiKoloa; United States (p. 3928-3937). doi:10.13140/RG.2.2.29269.22248
- Hwang, G., Lee, J., Park, J., & Chang, T. W. (2017). Developing performance measurement system for Internet of Things and smart factory environment. *International Journal of Production Research*, 55(9), 2590-2602. doi:10.1080/00207543.2016.1245883
- Jena, M. C., Mishra, S. K., & Moharana, H. S. (2019). Application of Industry 4.0 to enhance sustainable manufacturing. *Environmental Progress and Sustainable Energy*, 39(1). doi:10.1002/ep.13360
- Kettinger, W. J., Teng, J. T. C., & Guha, S. (1997). Business process change: A study of methodologies, techniques, and tools. *MIS Quarterly: Management Information Systems*, 21(1), 55-80. doi:10.2307/249742
- Kikolski, M. (2019). *Sample measurement of the ISO 22400 standard key performance indicators with the use of simulation models*. Communication présentée à 2019 IEEE Technology and Engineering Management Conference, TEMSCON 2019, Atlanta; United States. doi:10.1109/TEMSCON.2019.8813585

- Meudt, T., Metternich, J., & Abele, E. (2017). Value stream mapping 4.0: Holistic examination of value stream and information logistics in production. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 66(1), 413-416. doi:10.1016/j.cirp.2017.04.005
- Mokhtari, J. E. L., Abou El Kalam, A., Benhadou, S., & Medroumi, H. (2019). *PrivUML: A privacy metamodel*. Communication présentée à 10th International Conference on Ambient Systems, Networks and Technologies, ANT 2019 and The 2nd International Conference on Emerging Data and Industry 4.0, EDI40 2019, Affiliated Workshops, Leuven; Belgium (vol. 151, p. 53-60). doi:10.1016/j.procs.2019.04.011
- Molenda, P., Jugenheimer, A., Haefner, C., Oechsle, O., & Karat, R. (2019). *Methodology for the visualization, analysis and assessment of information processes in manufacturing companies*. Communication présentée à 29th CIRP Design Conference, CIRP Design 2019, Povia de Varzim; Portugal (vol. 84, p. 5-10). doi:10.1016/j.procir.2019.04.291
- Object Management Group. (2011). *Business Process Model and Notation (BPMN) : Specification Version 2.0*. Object Management Group. Tiré de <https://www.omg.org/spec/BPMN/2.0/About-BPMN/>
- Oesterreich, T. D., & Teuteberg, F. (2016). Understanding the implications of digitisation and automation in the context of Industry 4.0: A triangulation approach and elements of a research agenda for the construction industry. *Computers in Industry*, 83, 121-139. doi:10.1016/j.compind.2016.09.006
- Panquet, Q. (2020). *Méthodologie de plan de déploiement d'implantation de la méthode de gestion par valeur acquise en entreprise*. (Mémoire de Maîtrise, Polytechnique Montréal, Montréal, Canada).
- Park, J. M. (2017). Improved methodology for RMS adaptability evaluation. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 18(11), 1537-1546. doi:10.1007/s12541-017-0182-5
- Petrasch, R., & Hentschke, R. (2016). *Process modeling for industry 4.0 applications: Towards an industry 4.0 process modeling language and method*. Communication présentée à 13th International Joint Conference on Computer Science and Software Engineering, JCSSE 2016, Khon Kaen; Thailand. doi:10.1109/JCSSE.2016.7748885
- Phuong, N. A., & Guidat, T. (2018). *Sustainable value stream mapping and technologies of Industry 4.0 in manufacturing process reconfiguration: A case study in an apparel company*. Communication présentée à 2018 IEEE International Conference on Service Operations and Logistics, and Informatics, SOLI 2018, Singapore; Singapore (p. 85-90). doi:10.1109/SOLI.2018.8476750
- Rolstadås, A. (1991). ESPRIT basic research action no. 3143-F FOF production theory. A conceptual reference model seen from the functional view. *Computers in Industry*, 16(2), 129-139. doi:10.1016/0166-3615(91)90085-N
- Roy, U., Li, Y., & Zhu, B. (2015). *Building a rigorous foundation for performance assurance assessment techniques for 'smart' manufacturing systems*. Communication présentée à 2nd IEEE International Conference on Big Data, IEEE Big Data 2014, Washington; United States (p. 1015-1023). doi:10.1109/BigData.2014.7004335

- Shrouf, F., Ordieres, J., & Miragliotta, G. (2014). *Smart factories in Industry 4.0: A review of the concept and of energy management approached in production based on the Internet of Things paradigm*. Communication présentée à 2014 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, IEEM 2014, Selangor; Malaysia (vol. 2015-January, p. 697-701). doi:10.1109/IEEM.2014.7058728
- Supekar, S. D., Graziano, D. J., Riddle, M. E., Nimbalkar, S. U., Das, S., Shehabi, A., & Cresko, J. (2019). *A framework for quantifying energy and productivity benefits of smart manufacturing technologies*. Communication présentée à 26th CIRP Conference on Life Cycle Engineering, LCE 2019, West Lafayette; United States (vol. 80, p. 699-704). doi:10.1016/j.procir.2019.01.095
- Suri, K., Cadavid, J., Alferez, M., Dhouib, S., & Tucci-Piergiovanni, S. (2017). *Modeling business motivation and underlying processes for RAMI 4.0-aligned cyber-physical production systems*. Communication présentée à 22nd IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, ETFA 2017, Limassol; Cyprus (p. 1-6). doi:10.1109/ETFA.2017.8247702
- Vaillant, P. (1997). *Interaction between semiotic modalities: from icon to language*. (Thèse de doctorat, Université Paris Sud - Paris XI, Paris, France). Tiré de <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00327266>
- Venkatakumar, H., & Schmidt, W. (2019). *Subject-oriented specification of IoT scenarios*. Communication présentée à 11th International Conference on Subject-Oriented Business Process Management, S-BPM ONE 2019, Seville; Spain. doi:10.1145/3329007.3329011
- Wang, Y., Dittmann, M., & Anderl, R. (2019). *Holistic scenarios by using platform technologies for small batch-sized production*. Communication présentée à AHFE International Conference on Neuroergonomics and Cognitive Engineering, 2018, Orlando; United States (vol. 775, p. 297-306). doi:10.1007/978-3-319-94866-9\_30
- Watson, A. (2011). Digital buildings - Challenges and opportunities. *Advanced Engineering Informatics*, 25(4), 573-581. doi:10.1016/j.aei.2011.07.003
- World Economic Forum. (2016). *Shaping the Future of Construction : A Breakthrough in Mindset and Technology*. Genève; Suisse: World Economic Forum. Tiré de <https://www.weforum.org/reports/shaping-the-future-of-construction-a-breakthrough-in-mindset-and-technology>

## ANNEXE A SELECTION DES CARACTERISTIQUES THEORIQUES

Tableau A.1 Tableau de sélection des caractéristiques théoriques

Familie	Concept	Code	Caractéristique considérée	Prise en compte du BPMN		Intérêt du Partenaire
				Oui/Non ?	Comment ?	
Représentation	Généralité	Th-RepG.1	Peut-on représenter une logique événementielle ?	Oui	Evènements	
		Th-RepG.2	La représentation est-elle basée sur les entités ? (IoT)	Oui	Swimlane	
		Th-RepG.3	Peut-on représenter l'exécution indépendante d'une activité par plusieurs entités ?	Oui	Role	
		Th-RepG.4	Peut-on différencier les communications internes et externes d'une entité ?	Non		Non
		Th-RepG.5	Peut-on augmenter le nombre d'entités sans augmenter la complexité de la représentation ?	Oui	Plusieurs niveaux	
		Th-RepG.6	Peut-on représenter l'apparition et la disparition d'entités au cours du processus ?	Non		Non
		Th-RepG.7	Peut-on représenter plusieurs niveaux d'abstraction ? (global / local)	Oui	Processus Sous-processus	
		Th-RepG.8	Peut-on adapter la représentation entre des processus proches de différents ampleurs ?	Oui	Copier/Coller	
		Th-RepG.9	Peut-on représenter les aspects juridiques et notamment relatifs à la propriété intellectuelle ?	Non		Non
		Th-RepG.10	La représentation fait-elle consensus dans la communauté ?	Oui	Trivial	
		Th-RepG.11	La représentation a-t-elle été comparée et approuvée dans la communauté ?	Oui	Trivial	
		Th-RepG.12	La représentation est-elle plus efficace dans un domaine spécifique ?	Oui	Trivial	
		Th-RepG.13	Peut-on représenter la notion "d'abordable pour une PME" ?	Oui	Utilisation par les PME	
		Th-RepG.14	Peut-on avoir une indépendance entre la modélisation et la solution ?	Oui	Trivial	
		Th-RepG.15	Peut-on coupler des bonnes pratiques entre elles ?	Oui	Trivial	
		Th-RepG.16	Peut-on représenter les changements entre plusieurs itérations de modélisation ?	Non		Oui
		Th-RepG.17	Peut-on spécifier que l'activité est une opération manufacturière ?	Non		Non
		Th-RepG.18	Peut-on représenter une matière première ou une pièce manufacturière ?	Non		Non
		Th-RepG.19	Peut-on représenter l'inventaire nécessaire à une opération manufacturière ?	Non		Non
		Th-RepG.20	Peut-on représenter la frontière/limite d'un système ?	Oui	Groupe	
		Th-RepG.21	Peut-on spécifier qu'un document provient du monde physique ?	Oui	Icône données	
Représentation	Technologie	Th-RepT.1	Peut-on spécifier une activité comme "actionneur" ?	Partiellement	Activité d'action	Non
		Th-RepT.2	Peut-on spécifier une activité comme "capteur" ?	Partiellement	Activité de capture	Non
		Th-RepT.3	Peut-on représenter un Device de l'IoT ?	Oui		
		Th-RepT.4	Peut-on représenter une interface Homme-Machine ?	Non		Non
		Th-RepT.5	Peut-on représenter le flux physique ?	Oui	Ligne pleine	

Tableau A.1 Tableau de sélection des caractéristiques théoriques (suite)

Représentation	Technologie	Th-RepT.6	Peut-on représenter le flux d'information au niveau global ?	Oui	Ligne pointillée --- ou ...	
		Th-RepT.7	Peut-on représenter le flux d'information au niveau local ?	Oui	Ligne pointillée --- ou ...	
		Th-RepT.8	Peut-on mesurer la maturité du flux matériel ?	Non		Non
		Th-RepT.9	Peut-on mesurer la maturité du flux d'information au niveau global ?	Non		Non
		Th-RepT.10	Peut-on mesurer la maturité du flux d'information au niveau local ?	Non		Non
	Données	Th-RepD.1	Peut-on représenter que la donnée transite entre deux humains ?	Partiellement	Ligne pointillée ---	Oui
		Th-RepD.2	Peut-on représenter que la donnée transite entre un humain et une machine ?	Partiellement	Ligne pointillée ...	Oui
		Th-RepD.3	Peut-on représenter que la donnée transite entre deux machines ?	Partiellement	Ligne pointillée ...	Oui
		Th-RepD.4	Peut-on représenter que la donnée est collectée par la vision ?	Non		Oui
		Th-RepD.5	Peut-on représenter que la donnée est collectée par la parole ?	Non		Oui
		Th-RepD.6	Peut-on représenter que la donnée est collectée sur un document manuscrit ?	Non		Oui
		Th-RepD.7	Peut-on représenter que la donnée est collectée sur un document imprimé ?	Non		Oui
		Th-RepD.8	Peut-on représenter que la donnée est collectée sur un fichier numérique ?	Non		Oui
		Th-RepD.9	Peut-on représenter que la donnée est stockée et diffusée par un humain ?	Non		Oui
		Th-RepD.10	Peut-on représenter que la donnée est stockée et diffusée par un document manuscrit ?	Non		Oui
		Th-RepD.11	Peut-on représenter que la donnée est stockée et diffusée par un document imprimé ?	Non		Oui
		Th-RepD.12	Peut-on représenter que la donnée est stockée et diffusée par un fichier numérique ?	Non		Oui
		Th-RepD.13	Peut-on représenter que la donnée est stockée et diffusée par un fichier numérique en cloud ?	Non		Oui
		Th-RepD.14	Peut-on représenter que la donnée n'a pas d'usage ?	Non		Oui
		Th-RepD.15	Peut-on représenter que la donnée a un usage ?	Non		Oui
		Th-RepD.16	Peut-on représenter l'unité des données ? (Pièce / m / min / ...)	Partiellement	Attribut de l'icone donnée	Non
		Th-RepD.17	Peut-on représenter la fréquence de mise à jour des données ?	Non		Oui
		Th-RepD.18	Peut-on représenter la précision des données ?	Non		Non
Th-RepD.19		Peut-on représenter l'incertitude des données ?	Non		Non	
Th-RepD.20		Peut-on représenter plusieurs niveaux de bases de données ? (Local / Cloud...)	Non	Plusieurs BdD...	Non	
Th-RepD.21		Peut-on mesurer la disponibilité des données ?	Non		Oui	
Th-RepD.22		Peut-on mesurer l'utilisation des données ?	Non		Oui	
Th-RepD.23		Peut-on mesurer la digitalisation des données ?	Non		Oui	

Tableau A.1 Tableau de sélection des caractéristiques théoriques (suite et fin)

<b>Représentation</b>	<b>Cybersécurité</b>	Th-RepC.1	Peut-on représenter l'identification numérique d'un objet ?	Non		Non
		Th-RepC.2	Peut-on représenter la méthode d'authentification des utilisateurs ?	Non		Non
	<b>Organisation</b>	Th-RepO.1	Peut-on représenter la facilité d'utilisation et d'apprentissage ? Pratique, réaliste et pragmatique	Non		Non
		Th-RepO.2	Peut-on représenter le nombre d'opérateurs affectés à une activité ?	Non		Oui
<b>Performance</b>	<b>Temps</b>	Th-PerfT.1	Peut-on représenter le temps réel ?	Non		Oui
		Th-PerfT.2	Peut-on représenter le temps de cycle d'un processus ?	Non		Oui
		Th-PerfT.3	Peut-on représenter le temps à valeur ajoutée et sans valeur ajoutée d'un processus ?	Non		Non
		Th-PerfT.4	Peut-on représenter le temps d'opération planifié d'un processus ?	Non		Non
		Th-PerfT.5	Peut-on représenter le temps nécessaire à faire l'inventaire du processus ?	Non		Non
		Th-PerfT.6	Peut-on représenter les distances de trajets d'un flux ?	Non		Non
	<b>Coûts</b>	Th-PerfC.1	Peut-on représenter le coût d'utilisation ?	Non		Oui
		Th-PerfC.2	Peut-on représenter la rentabilité ?	Non		Oui
	<b>Qualité</b>	Th-PerfQ.1	Peut-on représenter la tolérance à l'erreur d'un processus ?	Non		Non
		Th-PerfQ.2	Peut-on représenter la notion de "durabilité" du processus ?	Non		Non
		Th-PerfQ.3	Peut-on représenter le degré d'agilité d'un processus ?	Non		Non
		Th-PerfQ.4	Peut-on représenter le taux de défaillance d'un processus ?	Non		Non
		Th-PerfQ.5	Peut-on mesurer la maturité du processus de traitement global des données ?	Non		Non
		Th-PerfQ.6	Peut-on mesurer la maturité de la communication intermachine ? M2M / Monde Virtuel	Non		Non
		Th-PerfQ.7	Peut-on mesurer la maturité en termes d'interopérabilité des systèmes de production ? Format / BdD / ...	Non		Non
Th-PerfQ.8		Peut-on mesurer la maturité de la SupplyChain ? (Intégration des clients et fournisseurs)	Non		Non	
Th-PerfQ.9		Peut-on mesurer la maturité des interfaces homme-machines ? (Local / mobile / AR / ...)	Non		Non	
Th-PerfQ.10	Peut-on mesurer la maturité de la production en termes de flexibilité ? (adaptable au petit lot)	Non		Non		
Th-PerfQ.11	Peut-on représenter la consommation énergétique du processus ?	Non		Non		
Th-PerfQ.12	Peut-on représenter la consommation d'eau du processus ?	Non		Non		
Th-PerfQ.13	Peut-on représenter la production de déchets générés par le processus ?	Non		Non		
Th-PerfQ.14	Peut-on représenter la dangerosité du processus ?	Non		Non		
Th-PerfQ.15	Peut-on représenter l'ergonomie d'un processus ?	Non		Non		

**ANNEXE B TEST N°1 COMPREHENSION – QUESTIONNAIRE**

Cocher la ou les réponse(s) pouvant décrire l'icône présentée. \*



- Equipe
- Ressource humaine
- Point de rassemblement
- Famille

Cocher la ou les réponse(s) pouvant décrire l'icône présentée. \*



- Compréhension
- Compétence
- Réflexion
- Imagination

Cocher la ou les réponse(s) pouvant décrire l'icône présentée. \*



- Réseau
- Virus informatique
- Contrôleur
- Technologie

Cocher la ou les réponse(s) pouvant décrire l'icône présentée. \*



- Coût
- Investissement
- Dollar
- "S"

Cocher la ou les réponse(s) pouvant décrire l'icône présentée. \*



- Coût périodique
- Coût d'exécution
- Economie circulaire
- Taux de change

Cocher la ou les réponse(s) pouvant décrire l'icône présentée. \*



- "TC"
- Take Care
- Temps de cycle
- Transport Canada

Cocher la ou les réponse(s) pouvant décrire l'icône présentée. \*



- Joint étanche
- Temps réel
- A l'heure
- Cible validée

Cocher la ou les réponse(s) pouvant décrire l'icône présentée. \*



- "X"
- Variable
- Valeur
- Multiplication

Cocher la ou les réponse(s) pouvant décrire l'icône présentée. \*



- Fonction
- Facebook
- "F"
- Fréquence

Cocher la ou les réponse(s) pouvant décrire l'icône présentée. \*



- Ecart
- Triangle
- Delta
- Délai

Cocher la ou les réponse(s) pouvant décrire l'icône présentée. \*



- Tête
- Chauve
- Humain
- Visage

Cocher la ou les réponse(s) pouvant décrire l'icône présentée. \*



- Scanner
- Fax
- Imprimante
- Document papier

Cocher la ou les réponse(s) pouvant décrire l'icône présentée. \*



- Ordinateur
- Métro / Tramway
- Numérique
- Ecran

Cocher la ou les réponse(s) pouvant décrire l'icône présentée. \*



- Rentabilité
- Croissance
- Bourse
- Productivité

## ANNEXE C TEST N°1 COMPREHENSION – RESULTATS

Tableau C.1 Résultats du test n°1 de compréhension

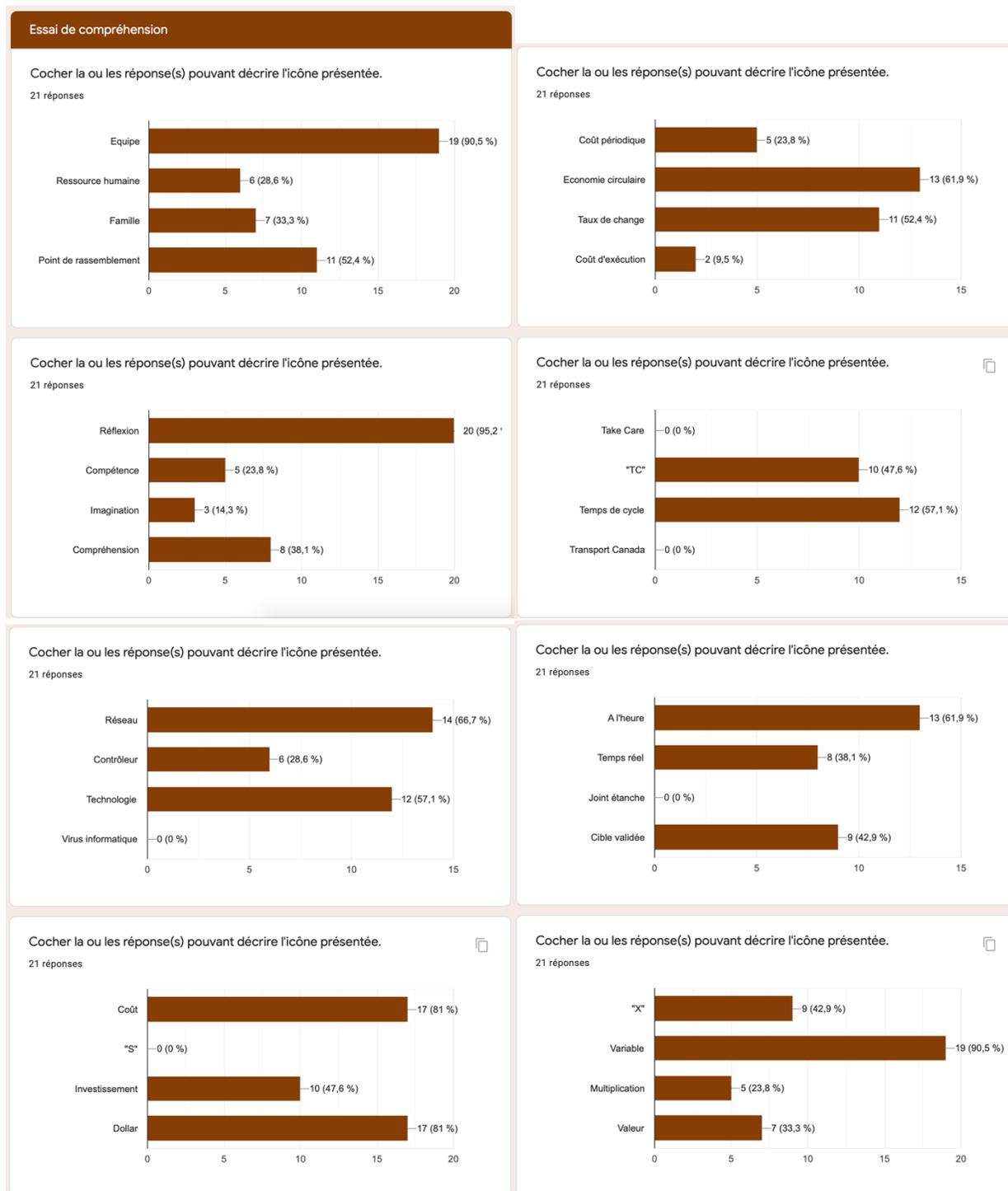
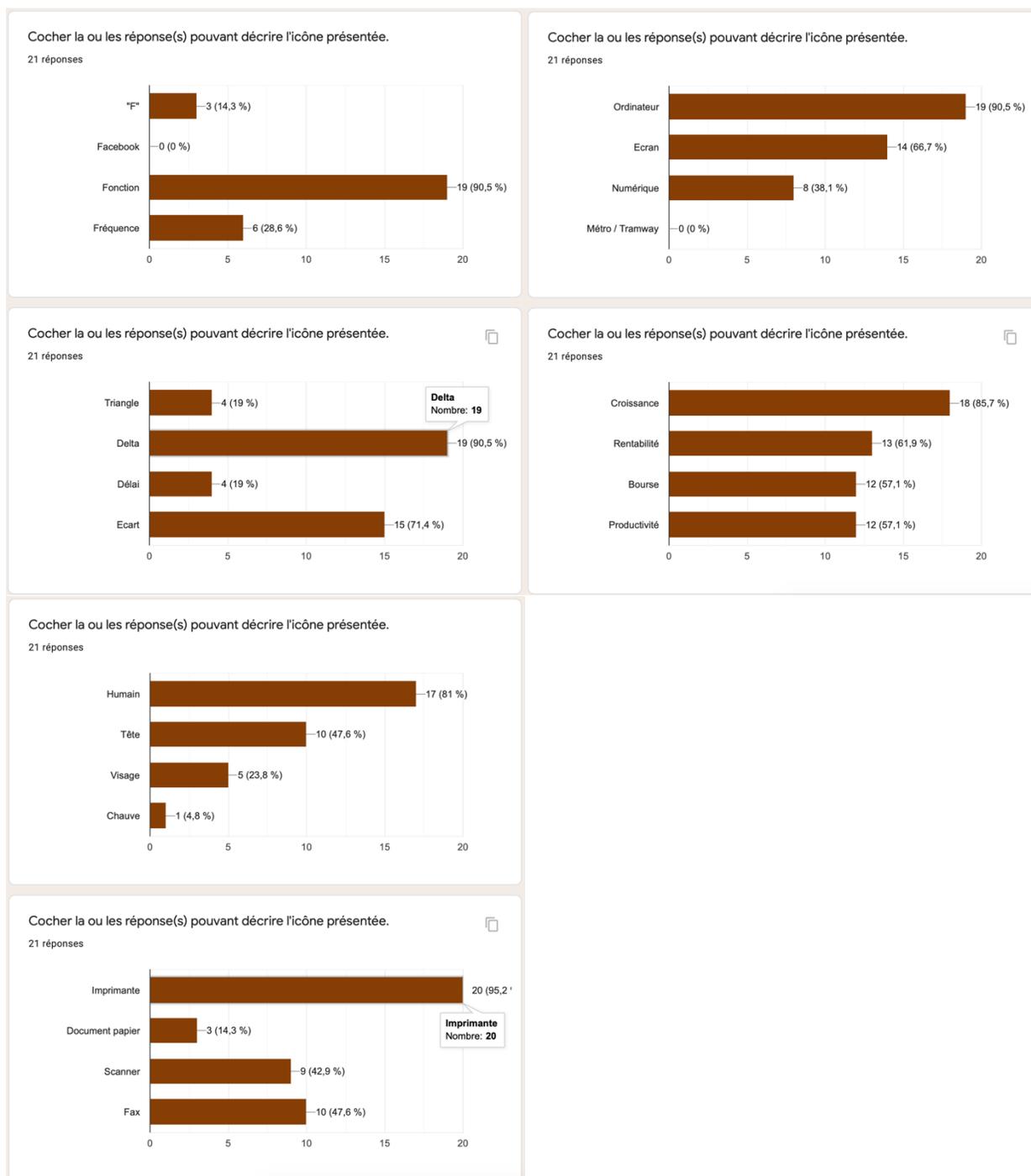


Tableau C.1 Résultats du test n°1 de compréhension (suite et fin)



**ANNEXE D TEST N°2 APPARIEMENT – QUESTIONNAIRE**

La description "Ressource humaine" est en accord avec l'icône présentée. \*



Tout à fait  
d'accord

D'accord

Pas d'accord

Pas du tout  
d'accord

Ressource  
humaine

La description "Compétence" est en accord avec l'icône présentée. \*



Tout à fait  
d'accord

D'accord

Pas d'accord

Pas du tout  
d'accord

Compétence

La description "Technologie" est en accord avec l'icône présentée. \*



Tout à fait  
d'accord

D'accord

Pas d'accord

Pas du tout  
d'accord

Technologie

La description "Investissement" est en accord avec l'icône présentée. \*



	Tout à fait d'accord	D'accord	Pas d'accord	Pas du tout d'accord
Investissement	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

La description "Coût d'exécution" est en accord avec l'icône présentée. \*



	Tout à fait d'accord	D'accord	Pas d'accord	Pas du tout d'accord
Coût d'exécution	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

La description "Temps de cycle" est en accord avec l'icône présentée. \*



	Tout à fait d'accord	D'accord	Pas d'accord	Pas du tout d'accord
Temps de cycle	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

La description "Temps réel" est en accord avec l'icône présentée. \*



Tout à fait  
d'accord

D'accord

Pas d'accord

Pas du tout  
d'accord

Temps réel

La description "Type de donnée" est en accord avec l'icône présentée. \*



Tout à fait  
d'accord

D'accord

Pas d'accord

Pas du tout  
d'accord

Type de donnée

La description "Fréquence" est en accord avec l'icône présentée. \*



Tout à fait  
d'accord

D'accord

Pas d'accord

Pas du tout  
d'accord

Fréquence

La description "Délai" est en accord avec l'icône présentée. \*



	Tout à fait d'accord	D'accord	Pas d'accord	Pas du tout d'accord
Délai	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

La description "Humain" est en accord avec l'icône présentée. \*



	Tout à fait d'accord	D'accord	Pas d'accord	Pas du tout d'accord
Humain	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

La description "Document papier" est en accord avec l'icône présentée. \*



	Tout à fait d'accord	D'accord	Pas d'accord	Pas du tout d'accord
Document papier	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

La description "Numérique" est en accord avec l'icône présentée. \*



Numérique

Tout à fait  
d'accord

D'accord

Pas d'accord

Pas du tout  
d'accord

La description "Rentabilité" est en accord avec l'icône présentée. \*



Rentabilité

Tout à fait  
d'accord

D'accord

Pas d'accord

Pas du tout  
d'accord

## ANNEXE E TEST N°2 APPARIEMENT – RESULTATS

Tableau E.1 Résultats du test n°2 d'appariement

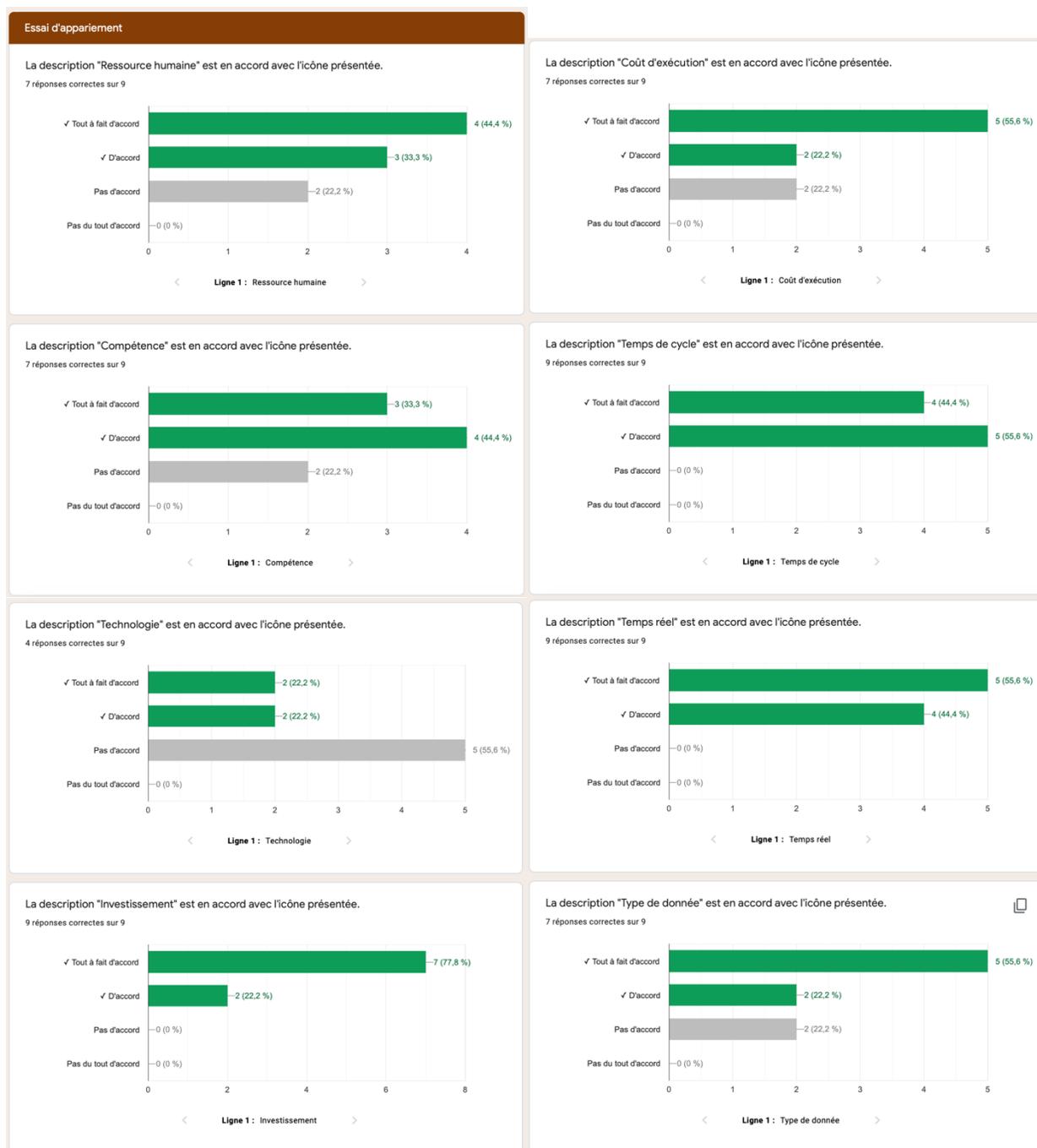


Tableau E.1 Résultats du test n°2 d'appariement (suite et fin)



## ANNEXE F TEST N°3 DISCRIMINATION – QUESTIONNAIRE

### Test de discrimination

Tout d'abord ce questionnaire vous propose une formation au Gabarit de Représentation et de Modélisation pour l'Industrie 4.0 (GRMI4.0) que nous avons développé dans le cadre de ce projet de recherche.

Par la suite, une cartographie au format GRMI4.0 d'un "processus d'achat dans un magasin sans caisse" vous est présentée. 18 questions vous sont ensuite posées, concernant cette cartographie, sous la forme de questions à choix unique. Les résultats de ce test permettront de nous assurer de la bonne identification graphique des éléments de notre modèle en situation réelle.

Une formation au GRMI4.0 est présentée dans la capsule vidéo ci-dessous.

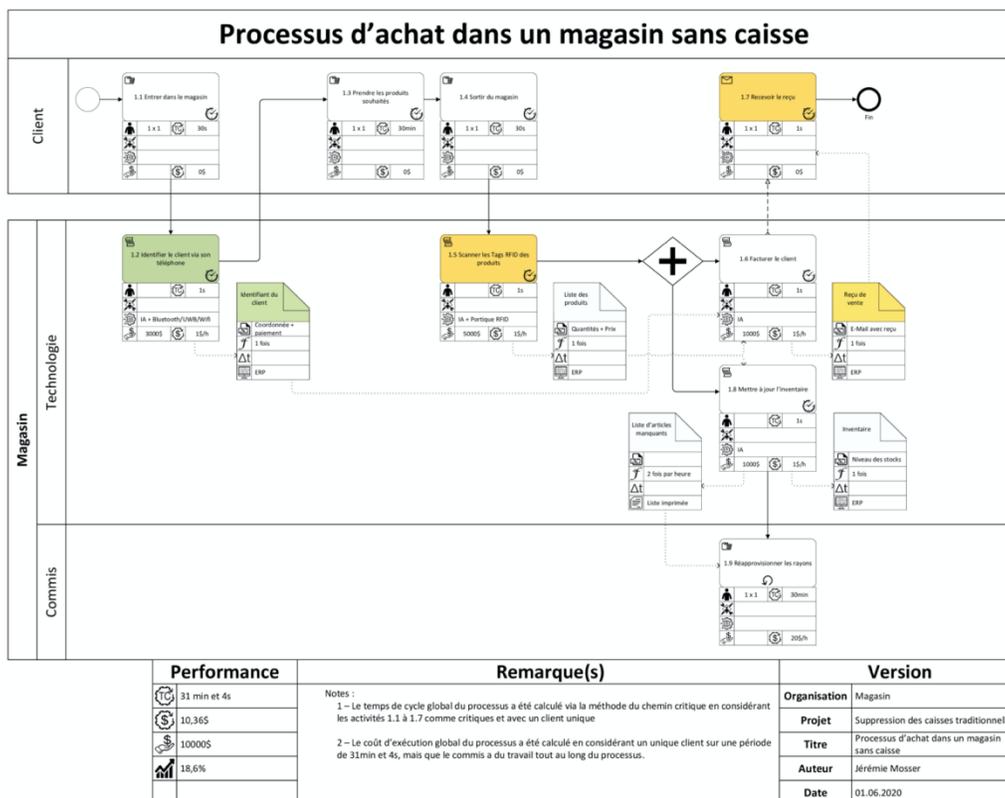
### Capsule vidéo - GRMI4.0



Un aide mémoire concernant le GRMI4.0 est disponible via le lien suivant :

<https://drive.google.com/file/d/18jBrMHIG1oRS5NKJbuGtnYD7Pn2D80gO/view?usp=sharing>

La suite du questionnaire porte sur la cartographie du processus d'achat dans un magasin sans caisse présentée ci-dessous. Attention celle-ci est différente de celle présentée dans la capsule vidéo.



Si vous rencontrez des problèmes de qualité d'image la cartographie est disponible au format pdf en suivant le lien suivant :

[https://drive.google.com/file/d/1OifBhHJlqS\\_f5siSbvlsFrPwZqfxFPw/view?usp=sharing](https://drive.google.com/file/d/1OifBhHJlqS_f5siSbvlsFrPwZqfxFPw/view?usp=sharing)

Combien de fois le pictogramme d'activité est-il présent ? \*

- 14
- 5
- 9
- 17

Arrivez-vous facilement à distinguer le pictogramme d'activité ? \*

- Tout à fait d'accord
- D'accord
- Pas d'accord
- Pas du tout d'accord

Combien de fois le pictogramme de donnée est-il présent ? \*

- 17
- 5
- 14
- 9

Arrivez-vous facilement à distinguer le pictogramme de donnée ? \*

- Tout à fait d'accord
- D'accord
- Pas d'accord
- Pas du tout d'accord

Combien de personnes différentes interviennent dans ce processus ? \*

- 2
- 0
- 1
- 3

Combien de formation(s) différente(s), chacune relative à une nouvelle compétence, faudra-t-il organiser ? \*

- 0
- 3
- 2
- 1

Combien d'activités utilisent l'Intelligence Artificielle (IA) ? \*

- 8
- 4
- 2
- 6

Combien d'activités sont exécutées en temps réel ? \*

- 2
- 4
- 6
- 8

Quel est le temps de cycle de ce processus ? \*

- 31min et 1s
- 1h 1min et 6s
- 30min et 4s
- 31min et 4s

Quel est le coût d'exécution de ce processus ? \*

- 20\$/h
- 0\$
- 1\$/h
- 10,36\$

Quel investissement nécessite ce processus ? \*

- 10000\$
- 1000\$
- 3000\$
- 5000\$

De quelle(s) activité(s) la donnée de quantité et de prix des produits est-elle l'intrant/entrée ? \*

- 1.8
- 1.6 + 1.8
- 1.5 + 1.6 + 1.8
- 1.6

Combien de données sont mises à jour plus d'une fois ? \*

- 1
- 2
- 0
- 4

Combien de données comprennent un délai ? \*

- 2
- 4
- 0
- 1

Combien de données sont détenues par un humain ? \*

- 0
- 4
- 2
- 1

Combien de données sont au format papier ? \*

- 1
- 0
- 2
- 4

Combien de données sont numériques ? \*

- 2
- 0
- 4
- 1

Quelle est la rentabilité du processus par rapport à un processus manuel ? \*

- 10000\$
- 715 jour
- 18,6%
- N.C.

## ANNEXE G TEST N°3 DISCRIMINATION – RESULTATS

Tableau G.1 Résultats du test n°3 de discrimination

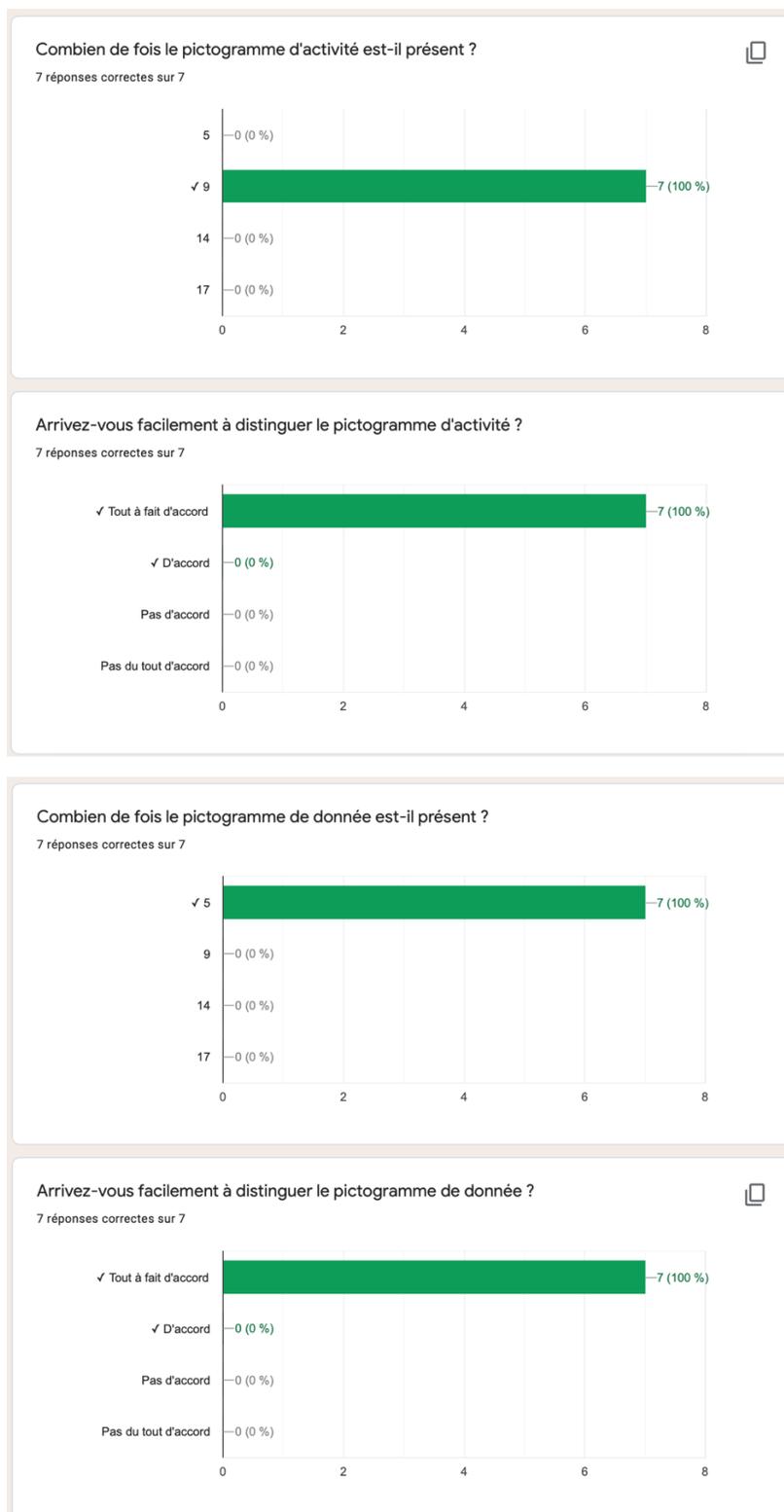


Tableau G.1 Résultats du test n°3 de discrimination (suite)

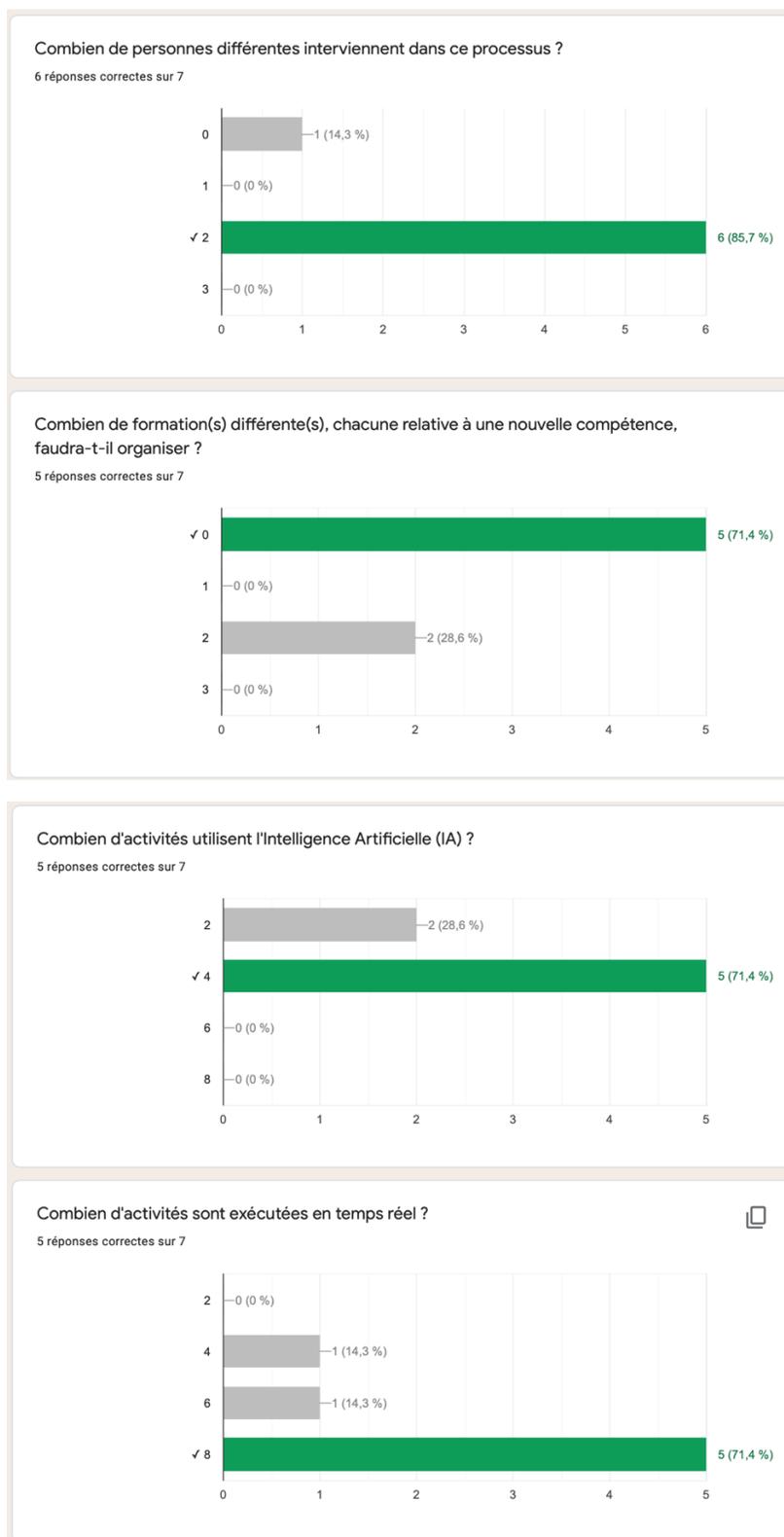


Tableau G.1 Résultats du test n°3 de discrimination (suite)

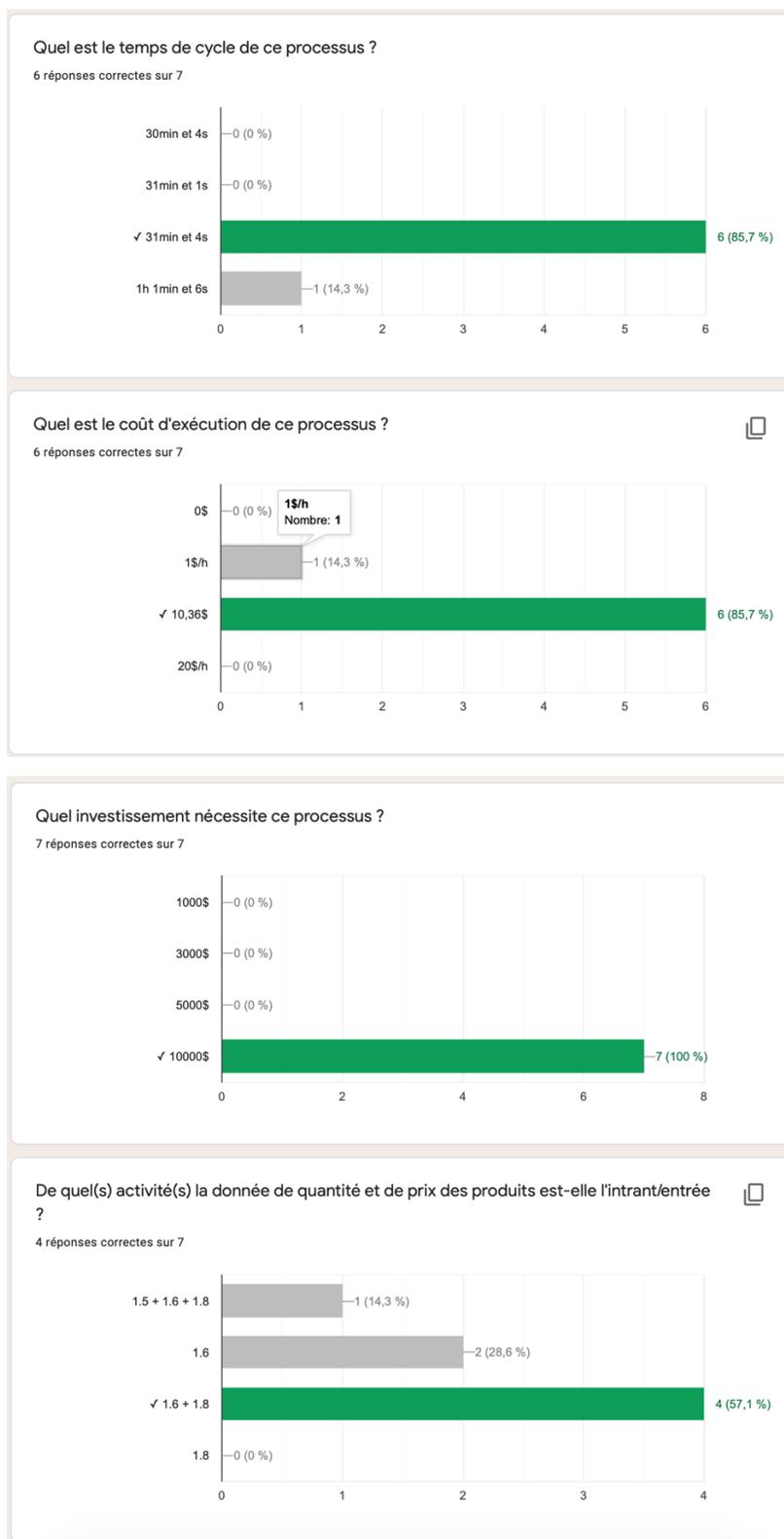


Tableau G.1 Résultats du test n°3 de discrimination (suite)

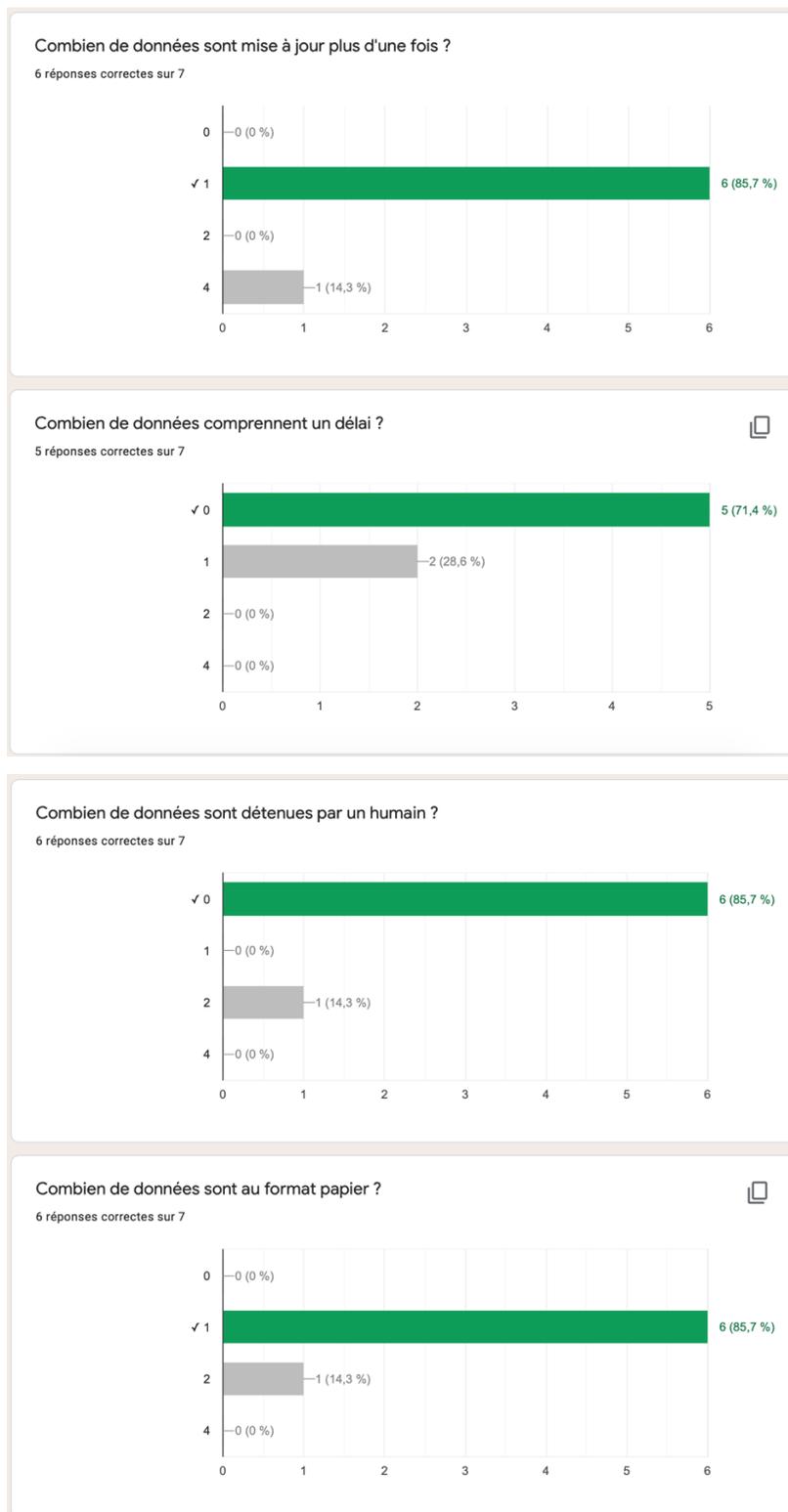


Tableau G.1 Résultats du test n°3 de discrimination (suite et fin)

