

Identification d'indicateurs de la maturité numérique des
entreprises par une démarche de comparaison et de synthèse
des modèles existants

par

Bruno COGNET

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE
LA MAÎTRISE AVEC MÉMOIRE CONCENTRATION EN GÉNIE
AÉROSPATIAL

M. Sc. A.

MONTRÉAL, LE 21 AOÛT 2020

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Bruno COGNET, 2020



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

PRÉSENTATION DU JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

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

M. Jean-Philippe PERNOT, codirecteur de mémoire
Département de génie mécanique à Arts et Métiers Institute of Technology

M. Lucas HOF, président du jury
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Hany MOUSTAPHA, membre du jury
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Christophe DANJOU, examinateur externe
Département de mathématiques et de génie industriel à Polytechnique Montréal

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

LE 19 AOÛT 2020

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

La réalisation de ce projet a été l'occasion de rencontrer des personnes qui m'ont permis de découvrir le monde de la recherche et d'acquérir de nouvelles connaissances.

Je remercie, en premier lieu, Monsieur Louis RIVEST mon directeur de maîtrise, Professeur du département de génie des systèmes à l'École de technologie supérieure, pour son aide et sa disponibilité. De par son expertise, il a su m'orienter, me conseiller et m'encourager tout au long de mes deux années de maîtrise.

Je voudrais également remercier Monsieur Jean-Philippe PERNOT mon codirecteur de maîtrise, Professeur du département de génie mécanique à Arts et Métier Institute of Technology, qui m'a permis de structurer ma réflexion et mon travail. Durant la première année, nous avons beaucoup travaillé ensemble. J'ai ainsi retenu ses conseils qui m'ont été utiles pour le bon déroulement de ma maîtrise.

Je tiens à remercier Monsieur Christophe DANJOU, Professeur du département de mathématiques et de génie industriel à Polytechnique Montréal, pour l'apport de sa connaissance sur le thème de la « transformation numérique » et son expertise tout au long du projet.

J'aimerais exprimer ma reconnaissance à tous les experts et chercheurs, notamment les membres d'Aéro Montréal et les membres de l'équipe allemande du projet DIMLA, avec qui j'ai pu discuter et qui m'ont aidé à faire avancer mon projet.

Je tiens à remercier tous les membres du laboratoire LIPPS avec qui j'ai passé ses deux années de maîtrise et qui m'ont soutenu dans l'avancement de mon projet de recherche.

Enfin, ceci n'aurait pas été possible sans le soutien et les encouragements de mes parents.

Identification d'indicateurs de la maturité numérique des entreprises par une démarche de comparaison et de synthèse des modèles existants

Bruno COGNET

RÉSUMÉ

La quatrième révolution industrielle est en train de s'imposer dans les stratégies industrielles mondiales. Une véritable course à la transformation vers le numérique est lancée dans le monde entier. Cette transformation impacte toutes les entreprises, quelle que soit leur taille. Toutefois, afin de structurer leur transformation numérique, il est nécessaire, dans un premier temps, de faire un état des lieux sur l'organisation de l'entreprise. Pour ce faire, il est possible de recourir à des modèles d'évaluation de la maturité numérique. Ces modèles permettent de donner une indication aux entreprises sur le lancement et l'avancement de leur transformation, pour atteindre le concept d'« Industrie 4.0 », et de les accompagner. Actuellement, plusieurs modèles de maturité numérique sont disponibles et ont des portées différentes, dépendamment de leurs intérêts spécifiques, au travers d'indicateurs de maturité variés. L'objectif de ce mémoire est donc de proposer une liste globale d'indicateurs de maturité numérique, aussi appelé Indicateurs Clés de Performance (en anglais « Key Performance Indicators », KPI), à partir de la collection des modèles d'évaluation de la maturité numérique accessibles en ligne ou fournis par des organismes réalisant des audits dans les entreprises. Les premières observations montrent que tous les modèles ont des structures globalement similaires, mais leurs contenus diffèrent et n'évaluent pas les mêmes aspects de la transformation numérique. L'une des difficultés de cette étude repose alors sur la comparaison de modèles de maturité qui se recouvrent partiellement. La méthodologie adoptée pour atteindre l'objectif de ce mémoire se déroule en plusieurs étapes. Tout d'abord, il faut identifier et rédiger, par rétro-ingénierie, les KPI employés par les 13 modèles de maturité retenus pour cette étude. Des mots-clés sont ensuite assignés à chaque KPI de la littérature pour en représenter l'essence et les regrouper autour de concepts communs. Ces mots-clés sont ensuite triés de manière à structurer les KPI de la littérature en dimensions et sous-dimensions. Enfin, à partir de cette structure, une démarche de synthèse des KPI de la littérature est proposée. Elle permet d'obtenir une liste de nouveaux KPI absorbant l'ensemble des variétés des modèles de maturité retenus. Tout au long de ce processus, des indicateurs statistiques permettent de juger l'importance, la couverture ou encore les différences entre des KPI, des sous-dimensions et des dimensions. Un minimum de trois experts a été impliqué pour chaque étape pour assurer la validité de la liste de nouveaux KPI. Cette liste sera, à la suite de cette étude, transmise à des partenaires industriels pour la transformer en séries de questions et réponses permettant d'évaluer la maturité numérique et d'aider les Petites et Moyennes Entreprises (PME) dans le domaine de l'aéronautique.

Mots-clés : Industrie 4.0, Quatrième révolution industrielle, Transformation numérique, Modèles de maturité, Maturité numérique, Indicateurs clés de performance, KPI, Indicateurs de maturité numérique.

Identification of organization digital maturity indicators using an approach to compare and synthetize existing models

Bruno COGNET

ABSTRACT

The fourth industrial revolution is emerging in global industrial strategies. All around the world, a rush to move manufacturing processes towards digitalization is being launched. This transformation is impacting both small and large organization. However, in order to direct their digital transformation, it is essential to first define the state of an organization before beginning its transformation. To this end, digital maturity models can be used. A maturity model provides information to the organization on the implementation and the progress of their transformation. The goal of maturity models is to allow organizations to reach the concept of “Industry 4.0” by helping them in their transformation. Several digital maturity models are currently available and have different scopes, depending on their specific interests. The objective of this thesis is to put forward a global list of digital maturity indicators, also called Key Performance Indicators (KPIs), based on a collection of digital maturity assessment models available online or provided by institutions conducting business audits. At first sight, all the models have the same pattern globally, but their content differs and does not assess the same aspects of digital transformation. One of the difficulties of this study is therefore based on the comparison of the maturity models that partially overlap each other. The methodology adopted to achieve the objective of this thesis is a multi-step process. First, a step of identification and redaction, through a reverse engineering method, enables experts to formulate the KPIs employed by the 13 digital maturity models that are considered in this study. Keywords are then assigned to each literature KPI to characterize and group them around common concepts. These keywords are next classified in order to structure the literature KPIs into dimensions and subdimensions. Lastly, on the basis of this structure, a synthesis of KPIs from the literature leads to the creation of a new KPI list, containing all the notions of the maturity models that are considered. Throughout this methodology, statistic indicators helped experts to estimate the importance, the coverage and the difference between KPIs, subdimensions and dimensions. A minimum of three experts were involved in each step to ensure the validity of the new KPI list. The new KPI list will, after this study, be shared with industrial partners who will formulate questions and answers to evaluate digital maturity and help Small- and Medium-sized Enterprises (SMEs) in the field of aviation.

Keywords: Industry 4.0, Fourth Industrial Revolution, Digital transformation, Maturity models, Digital maturity, Key Performance Indicators, KPI, Digital maturity indicators.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE	7
1.1 Historique des révolutions industrielles.....	7
1.1.1 Première révolution industrielle : la mécanisation de l'industrie et la machine à vapeur	8
1.1.2 Deuxième révolution industrielle : l'électricité, la production de masse et la division du travail.....	8
1.1.3 Troisième révolution industrielle : les Nouvelles Technologies de l'Information et de la Communication (NTIC).....	9
1.1.4 Quatrième révolution industrielle : la connectivité ubiquitaire	9
1.2 La transformation numérique et ses technologies.....	12
1.2.1 Définition des concepts autour de la transformation numérique	12
1.2.1.1 Liste des définitions	12
1.2.1.2 Synthèse	16
1.2.2 Les technologies associées à la transformation numérique	16
1.2.2.1 Différentes approches	17
1.2.2.2 Groupes technologiques supportant la transformation numérique des entreprises.....	19
1.3 Évaluation de la maturité numérique	19
1.3.1 Définitions.....	20
1.3.2 Étude des modèles évaluant la maturité numérique.....	23
1.3.2.1 Outils d'auto-évaluation ou d'audit et articles scientifiques.....	24
1.3.2.2 Structures des modèles de maturité.....	24
1.3.2.3 Questionnaires d'évaluation de la maturité numérique	27
1.3.2.4 Définition et attribution de niveaux de maturité	29
1.4 Méthodologies permettant la création d'un modèle de maturité	33
1.4.1 Développement des modèles de maturité	33
1.4.2 Méthodes de comparaison des modèles de maturité	36
1.4.3 Méthodes de prise de décision	38
1.4.3.1 Définition de poids.....	38
1.4.3.2 Aide à la décision.....	38
1.5 Synthèse	39
CHAPITRE 2 PRÉSENTATION GÉNÉRALE DE LA MÉTHODOLOGIE DE RECHERCHE.....	43
2.1 Choix relatifs à la méthodologie	43
2.2 Démarche méthodologique	44
2.2.1 Sélection des modèles de maturité numérique.....	45
2.2.2 Comparaison des modèles de maturité numérique	45
2.2.3 Synthèse des KPI de la littérature	46

2.2.4	Validation.....	47
2.2.5	Ressources de l'étude.....	47
CHAPITRE 3	DÉMARCHE DE COMPARAISON DES MODÈLES DE MATURITÉ ET DE SYNTHÈSE DES INDICATEURS DE MATURITÉ NUMÉRIQUE DE LA LITTÉRATURE	49
3.1	Notations	49
3.2	Première méthode de comparaison des KPI de la littérature (méthode « manuelle »)	50
3.2.1	Rédaction des KPI de la littérature	51
3.2.2	Méthode de comparaison manuelle des KPI de la littérature	52
3.2.3	Taux de remplissage : premier indicateur statistique pour analyser le résultat de la comparaison.....	53
3.2.4	Bilan	54
3.3	Deuxième méthode de comparaison des KPI de la littérature (méthode « semi-automatique »)	55
3.3.1	Attribution des mots-clés	56
3.3.2	Création d'une matrice basée sur les mots-clés	56
3.3.3	Calcul des correspondances des KPI de la littérature	58
3.3.4	Introduction de nouveaux indicateurs statistiques	60
3.3.4.1	Couverture des dimensions par les modèles de maturité	61
3.3.4.2	Appui des sous-dimensions sur les modèles de maturité.....	62
3.4	Ajustement et généralisation de la méthode semi-automatique.....	62
3.4.1	Superposition des matrices de comparaison obtenues avec les deux méthodes	64
3.4.2	Divers ajustements à différentes étapes des méthodes de comparaison ...	66
3.4.3	Généralisation de la méthode semi-automatique	67
3.5	Démarche pour synthétiser les KPI de la littérature	68
3.5.1	Collecte des données.....	70
3.5.2	Analyse des données	73
3.5.3	Rédaction des nouveaux KPI.....	75
3.5.4	Contrôle des KPI CAN	77
3.6	Synthèse	78
CHAPITRE 4	RÉSULTATS DE LA COMPARAISON DES MODÈLES DE MATURITÉ RETENUS.....	83
4.1	Modèles de maturité numérique retenus pour l'étude.....	83
4.2	Premiers résultats obtenus à partir de la comparaison de deux modèles de maturité.....	85
4.2.1	Comparaison manuelle des modèles de maturité.....	86
4.2.2	Comparaison semi-automatique des modèles de maturité.....	89
4.3	Ajustement des matrices de comparaison.....	91
4.3.1	Résultats de la superposition des matrices de comparaison.....	91
4.3.2	Ajustement des méthodes de comparaison manuelle et semi-automatique	92

4.4	Résultats de la comparaison semi-automatique des KPI de la littérature	96
4.4.1	Analyse générale des mots-clés employés.....	97
4.4.2	Classification des mots-clés et identification de dimensions et de sous-dimensions	97
4.4.3	Convergence des résultats.....	101
4.4.4	Analyse des matrices de comparaison obtenues avec la méthode semi-automatique.....	104
4.5	Comparaison des modèles de maturité étudiés	107
4.5.1	Étude des similarités et des différences entre les modèles de maturité retenus.....	108
4.5.2	Importance relative de chacune des sous-dimensions	110
4.6	Synthèse	112
CHAPITRE 5 RÉSULTATS DU TRAVAIL DE SYNTHÈSE DES KPI DE LA LITTÉRATURE		115
5.1	Mise en place de la démarche de synthèse des KPI de la littérature.....	116
5.1.1	Organisation du travail de synthèse des KPI	116
5.1.2	Exemple de synthèse des KPI d'une sous-dimension.....	118
5.2	Résultats de la synthèse des KPI de la littérature et suivi de leur utilisation.....	122
5.2.1	Liste de KPI CAN pour évaluer la maturité numérique des entreprises.....	122
5.2.2	Suivi de l'utilisation des KPI de la littérature.....	123
5.2.3	Couverture des dimensions et appui des KPI CAN sur les modèles de maturité retenus.....	126
5.3	Comparaison avec la liste de KPI établie par l'équipe allemande	131
5.3.1	Comparaison semi-automatique des KPI GER à l'aide des indicateurs statistiques.....	131
5.3.2	Analyse manuelle des correspondances entre les KPI CAN et les KPI GER.....	134
5.4	Synthèse	140
CHAPITRE 6 DISCUSSION		141
6.1	Avantages de la démarche proposée	141
6.2	Limites de la démarche adoptée.....	144
6.3	Validité de la méthodologie et de la liste de KPI CAN	147
CONCLUSION.....		151
ANNEXE I	ÉVOLUTION DES PUBLICATIONS SUR LA TRANSFORMATION NUMÉRIQUE	155
ANNEXE II	DÉFINITIONS DES 9 GROUPES TECHNOLOGIQUES SUPPORTANT LA TRANSFORMATION NUMÉRIQUE	159
ANNEXE III	INVENTAIRE DES MODÈLES DE MATURITÉ NUMÉRIQUE	165

ANNEXE IV	CLASSIFICATION DES MOTS-CLÉS DANS LES DIMENSIONS ET LES SOUS-DIMENSIONS	169
ANNEXE V	EXEMPLE DE CALCUL D'UNE CORRESPONDANCE ENTRE DEUX KPI DE LA LITTÉRATURE AVEC LA MÉTHODE DE COMPARAISON SEMI-AUTOMATIQUE	175
ANNEXE VI	COUVERTURE DES DIMENSIONS PAR LES MODÈLES DE MATURITÉ RETENUS	179
ANNEXE VII	APPUI DES SOUS-DIMENSIONS SUR LES MODÈLES DE MATURITÉ NUMÉRIQUE RETENUS	183
ANNEXE VIII	LISTE DES KPI CAN OBTENUS AVEC LA SYNTHÈSE DES MODÈLES DE MATURITÉ RETENUS	187
ANNEXE IX	APPUI DES KPI CAN SUR LES MODÈLES DE MATURITÉ NUMÉRIQUE RETENUS	199
	LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	203

LISTE DES TABLEAUX

	Page	
Tableau 1.1	Listes des dimensions des modèles IMPULS et PwC, respectivement adapté de Lichtblau et al. (2015, p. 22) et de Geissbauer et al. (2016, p. 28)	25
Tableau 1.2	Analogie entre les réponses et les niveaux de maturité du modèle de l’University of Warwick (2017), adapté de l’outil d’auto-évaluation de l’University of Warwick (2017) et du rapport de Agca, Gibson, Godsell, Ignatius, & Wyn Davies (2017, p. 8).....	28
Tableau 1.3	Définition d’une boîte à outils (« cloud/storage ») du modèle SM ³ E, adapté de Mittal et al. (2018a, p. 161)	31
Tableau 4.1	Modèles de maturité numérique retenus pour l’étude.....	84
Tableau 4.2	Question et réponses issues du modèle de maturité IMPULS, adapté de l’outil d’auto-évaluation en ligne IMPULS (2015)	86
Tableau 4.3	Nombre de KPI rédigés en fonction du modèle de maturité numérique....	96
Tableau 4.4	Dimensions et sous-dimensions déduites de la matrice <i>MCmat</i>	98
Tableau 4.5	Définitions des termes autour de la dimension « Business, strategy & governance »	100
Tableau 4.6	Extrait du classement des sous-dimensions en fonction de leur appui sur les modèles de maturité retenus	111
Tableau 5.1	Extrait de la liste de KPI de la littérature en lien avec la sous-dimension « Business model & strategy » (avant l’exclusion des KPI de la littérature vus auparavant)	119
Tableau 5.2	Extrait du classement des KPI CAN en fonction de leur appui sur les modèles de maturité retenus	129
Tableau 5.3	Liste des 13 KPI CAN considérés comme prioritaires	138
Tableau 6.1	Liste des 3 KPI CAN avec un seul appui sur la littérature	149
Tableau-A III-1	Comparaison de la structure des modèles de maturité numérique.....	165
Tableau-A IV-1	Matrice de mots-clés <i>MCmat</i> incluant les dimensions et les sous-dimensions	170

Tableau-A VII-1	Classement des sous-dimensions en fonction de leur appui sur les modèles de maturités retenus.....	183
Tableau-A IX-1	Classement des KPI CAN en fonction de leur appui sur les modèles de maturités retenus.....	199

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 0.1	Ensemble des étapes du projet DIMLA5
Figure 1.1	Les quatre révolutions industrielles depuis la fin du XVIII ^e s., adaptée de Kagermann et al. (2013, p. 13)11
Figure 1.2	Exemple du modèle IMPULS avec des dimensions et des sous- dimensions, adaptée de Lichtblau et al. (2015, p. 22).....26
Figure 1.3	Définitions des niveaux de maturité pour la dimension « Strategy and Organization » du modèle IMPULS, adaptée de Lichtblau et al. (2015, p. 30).....30
Figure 1.4	Définitions des niveaux de maturité pour la dimension « Digital business models and customer access » du modèle PwC, adaptée de Geissbauer et al. (2016, p. 28)30
Figure 1.5	Exemple de résultats à la fin du questionnaire de PwC, adaptée de l'outil d'auto-évaluation en ligne PricewaterhouseCoopers (2015).....32
Figure 2.1	Principales étapes de la méthodologie de recherche proposée45
Figure 3.1	Méthode de comparaison manuelle pour deux modèles de maturité \mathcal{M}^1 et \mathcal{M}^250
Figure 3.2	Méthode de comparaison semi-automatique pour deux modèles de maturité \mathcal{M}^1 et \mathcal{M}^255
Figure 3.3	Ajustement itératif de la méthode de comparaison semi-automatique63
Figure 3.4	Démarche suivie pour la synthèse des KPI de la littérature.....69
Figure 3.5	Formulaire de saisie pour regrouper les données autour d'une sous-dimension71
Figure 3.6	Formulaire de saisie pour enregistrer les informations d'un nouveau KPI CAN76
Figure 3.7	Démarche complète de la comparaison modèles de maturité retenus et de la synthèse de KPI de la littérature.....82

Figure 4.1	Matrice de comparaison entre les modèles IMPULS et PwC obtenue avec la méthode de comparaison manuelle	88
Figure 4.2	Matrice de comparaison entre les modèles IMPULS et PwC obtenue avec la méthode de comparaison semi-automatique	90
Figure 4.3	Matrice de superposition des résultats de la comparaison des modèles IMPULS et PwC	92
Figure 4.4	Résultat des modifications des matrices de comparaison des modèles IMPULS et PwC avec les méthodes de comparaison manuelle (à gauche) et semi-automatique (à droite)	94
Figure 4.5	Matrice de superposition des résultats de la comparaison des modèles IMPULS et PwC après ajustements	95
Figure 4.6	Évolution chronologique du nombre de mots-clés	102
Figure 4.7	Évolution chronologique du nombre de sous-dimensions	103
Figure 4.8	Matrice de superposition avec les modèles IMPULS et PwC après la généralisation de la méthode de comparaison semi-automatique	105
Figure 4.9	Taux de remplissage (en pourcentage) des matrices de comparaison <i>MSAmat</i>	106
Figure 4.10	Comparaison de la couverture des modèles de maturité IMPULS et PwC selon les dimensions définies par les experts	108
Figure 4.11	Couverture des sous-dimensions de la dimension « Business, strategy & governance » par les modèles de maturité retenus	110
Figure 5.1	Suivi de l'utilisation des KPI de la littérature à la fin de la démarche de synthèse	124
Figure 5.2	Couverture de la liste de KPI CAN selon les dimensions définies par les experts	128
Figure 5.3	Matrice de comparaison obtenue avec la méthode de comparaison semi-automatique entre les KPI CAN et les KPI GER	133
Figure 5.4	Couverture de la liste de KPI GER selon les dimensions définies par les experts de l'équipe canadienne	134
Figure 5.5	Matrice de comparaison obtenue avec la méthode de comparaison semi-automatique et corrigée entre les KPI CAN et les KPI GER	135

Figure 5.6	Correspondances de la « shortlist CAN » avec les KPI GER.....	137
Figure 5.7	Correspondances de la « shortlist GER » avec les KPI CAN.....	139
Figure-A I-1	Nombre de publications par année en lien avec l’« Industrie 4.0 » entre 2006 et 2019, issue de la base de données Scopus, consultée le 18 mars 2020.....	156
Figure-A I-2	Pays avec le plus de publications sur l’« Industrie 4.0 » entre 2006 et 2019, issue de la base de données Scopus, consultée le 18 mars 2020.....	157
Figure-A VI-1	Couverture des modèles IMPULS et PwC selon les dimensions définies par les experts.....	179
Figure-A VI-2	Couverture des modèles ADN, BPI, SCR, FOR, AKD et MED selon les dimensions définies par les experts.....	180
Figure-A VI-3	Couverture des modèles de CEG, WAR, MAC, SIN, AGE et de la liste de KPI GER selon les dimensions définies par les experts	181

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

ADN	Modèle de maturité numérique du Ministère de l'Économie et de l'Innovation Québec (2017)
AGE	Modèle de maturité numérique de AGEFOS PME (2018)
AHP	Analytical Hierarchy Process
AKD	Modèle de maturité numérique de Akdil et al. (2018)
AR	Augmented Reality
BCG	Boston Consulting Group
BPI	Modèle de maturité numérique de Bpi France (2018)
CAO	Conception Assistée par Ordinateur
CEFARIO	Centre Francophone d'Informatisation des Organisations
CEG	Modèle de maturité numérique de Cegos (2017)
CPS	Cyber-Physical Systems
DFKI	Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz en français, Centre de recherche allemand sur l'intelligence artificielle
DIMLA	Digitalization and Internationalization Maturity Level in Aerospace
FOR	Modèle de maturité numérique de Gill & VanBoskirk (2016)
IIoT	Industrial Internet of Things
IMP	Modèle de maturité numérique de IMPULS (2015)
IoT	Internet of Things
IA	Intelligence Artificielle
IT	Information Technology
KPI	Key Performance Indicator dans ce mémoire, similaire à « indicateur de maturité numérique »

KPI CAN	Liste d'indicateurs de maturité numérique rédigée par l'équipe canadienne du projet DIMLA (objectif principal du mémoire)
KPI GER	Liste d'indicateurs de maturité numérique rédigée par l'équipe allemande du projet DIMLA
M2M	Machine-to-Machine
MAC	Modèle de maturité numérique de Aéro Montréal (2011)
MED	Modèle de maturité numérique de MEDEF France (2016)
NTIC	Nouvelles Technologies de l'Information et de la Communication
PLM	Product Lifecycle Management
PME	Petite ou Moyenne Entreprise
PwC	PricewaterhouseCoopers
PWC	Modèle de maturité numérique de PricewaterhouseCoopers (2015)
SCR	Modèle de maturité numérique de Scermin et al. (2018)
SIN	Modèle de maturité numérique de Singapore Economic Development Board (2017)
VBA	Visual Basic for Applications
WAR	Modèle de maturité numérique de l'University of Warwick (2017)

LISTE DES SYMBOLES

MODÈLE DE MATURITÉ NUMÉRIQUE

\mathcal{D}_k	Dimension k de la liste de KPI CAN
\mathcal{I}_j^i	KPI j appartenant au modèle de maturité numérique i
\mathcal{L}^i	Liste de KPI de la littérature du modèle de maturité numérique i
\mathcal{M}^i	Modèle de maturité numérique i
$\mathcal{MC}_m^{i,j}$	Mot-clé m du KPI j appartenant au modèle de maturité numérique i
\mathcal{SD}_l^k	Sous-dimension l appartenant à la dimension k de la liste de KPI CAN

NOMBRES FIXES

$N_{\mathcal{D}}$	Nombre de dimensions dans la liste de KPI CAN
N_j	Nombre de KPI de la littérature, obtenus par rétro-ingénierie
N_j^{CAN}	Nombre de KPI de la liste de KPI CAN
$N_{\mathcal{M}}$	Nombre de modèles de maturité retenus
N_{MC}	Nombre de mots-clés pour caractériser les KPI de la littérature
N_{MSA}	Nombre de matrices de comparaison, obtenues avec la méthode semi-automatique

NOMBRES VARIANTS

n_j^i	Nombre de KPI de la littérature dans le modèle de maturité numérique i , obtenus par rétro-ingénierie
$n_{MC}^{i,j}$	Nombre de mots-clés pour le KPI j appartenant au modèle de maturité numérique i
$n_{MC, distinct}^{i,j}$	Nombre de mots-clés distincts pour le KPI j appartenant au modèle de maturité numérique i
n_{SD}^k	Nombre de sous-dimensions dans la dimension k de la liste de KPI CAN

INDICES ET EXPOSANTS

i, i_1, i_2	Numéro d'un modèle de maturité numérique, allant de 1 à $N_{\mathcal{M}}$
j, j_1, j_2	Numéro d'un KPI de la littérature, allant de 1 à n_j^i
j_{CAN}	Numéro d'un KPI appartenant à la liste de KPI CAN, allant de 1 à N_j^{CAN}
k	Numéro d'une dimension de la liste de KPI CAN, allant de 1 à $N_{\mathcal{D}}$
l	Numéro d'une sous-dimension de la liste de KPI CAN, attaché à une dimension k , allant de 1 à n_{SD}^k
m, m_1, m_2	Numéro d'un mot-clé caractérisant un KPI j appartenant au modèle de maturité i , allant de 1 à $n_{MC}^{i,j}$

MATRICES

$MCmat$	Matrice de mots-clés
$MMmat^{i_1, i_2}$	Matrice de comparaison des modèles de maturité numérique i_1 et i_2 , obtenue avec la méthode de comparaison manuelle

$MSAmat^{i_1, i_2}$	Matrice de comparaison des modèles de maturité numérique i_1 et i_2 , obtenue avec la méthode de comparaison semi-automatique
$SPmat^{i_1, i_2}$	Matrice de superposition des matrices $MMmat^{i_1, i_2}$ et $MSAmat^{i_1, i_2}$

FONCTIONS

$\mathcal{F}_{MC}(\mathcal{MC}_{m_1}^{j_1, j_2})$	Fonction de comparaison d'un mot-clé m_1 du KPI j_1 avec les autres mots-clés KPI j_1 et ceux du KPI j_2
$\mathcal{F}_{MM}(J_{j_1}^{i_1}, J_{j_2}^{i_2})$	Fonction de calcul de la valeur de correspondance entre deux KPI j_1 et j_2 appartenant respectivement aux modèles de maturité numérique i_1 et i_2 dans la matrice de comparaison $MMmat^{i_1, i_2}$
$\mathcal{F}_{MSA}(J_{j_1}^{i_1}, J_{j_2}^{i_2})$	Fonction de calcul de la valeur la correspondance entre deux KPI j_1 et j_2 appartenant respectivement aux modèles de maturité numérique i_1 et i_2 dans la matrice de comparaison $MSAmat^{i_1, i_2}$
$\mathcal{F}_{SP}(J_{j_1}^{i_1}, J_{j_2}^{i_2})$	Fonction de comparaison de chacun des couples de KPI j_1 et j_2 appartenant respectivement aux modèles de maturité numérique i_1 et i_2 des matrices de comparaison $MMmat^{i_1, i_2}$ et $MSAmat^{i_1, i_2}$

INDICATEURS STATISTIQUES

$\mathcal{X}_{Appui, KPI\ CAN}^{k, l}$	Indicateur statistique d'appui d'un KPI CAN sur les modèles de maturité numérique retenus
$\mathcal{X}_{Appui, \mathcal{SD}}^{k, l}$	Indicateur statistique d'appui d'une sous-dimension \mathcal{SD}_l^k sur les modèles de maturité numérique retenus
$\mathcal{X}_{Couverture, \mathcal{D}}^{i, k}$	Indicateur statistique de couverture des dimensions \mathcal{D}_k par un modèle de maturité numérique i
$\mathcal{X}_{Remplissage, MM}^{i_1, i_2}$	Indicateur statistique de remplissage d'une matrice de comparaison $MMmat^{i_1, i_2}$
$\mathcal{X}_{Remplissage, MSA}^{i_1, i_2}$	Indicateur statistique de remplissage d'une matrice de comparaison $MSAmat^{i_1, i_2}$

INTRODUCTION

En 2011, les bases d'une nouvelle révolution industrielle ont été posées lors du Salon de la Technologie Industrielle à Hanovre en Allemagne (Kagermann, Wahlster, & Helbig, 2013 ; Kohler & Weisz, 2013). Cette révolution est la quatrième et a été présentée au travers du concept d'« Industrie 4.0 ». Elle va impacter le monde de l'industrie et le mode de fonctionnement de la société comme les précédentes. Elle se caractérise par une réorganisation complète des services, des produits et des systèmes de production d'une entreprise prévoyant une meilleure efficacité opérationnelle (Hermann, Pentek, & Otto, 2016). L'objectif est de les connecter pour induire un travail collaboratif entre toutes les parties prenantes de l'industrie, optimiser les prises de décisions en temps réel et accroître la productivité et répondre aux besoins de chaque client (Kagermann et al., 2013). La quatrième révolution industrielle repose sur l'utilisation de différentes technologies qui doivent permettre aux entreprises d'être plus **autonomes, flexibles et interconnectées**, pour in fine être plus **compétitives**.

Ce phénomène d'« interconnexion » s'observe déjà dans la société actuelle qui vit dans un environnement numérisé. La population mondiale est connectée en permanence au travers de nombreuses technologies telles que les smartphones ou encore les satellites. Le développement de réseaux sociaux comme Facebook, Twitter ou encore Instagram donne la possibilité à tous les humains de communiquer avec d'autres personnes, quel que soit leur lieu et leur identité. La quatrième révolution vise à pousser cette idée d'« interconnexion » aux machines entre elles, aux machines avec les humains, mais également aux produits entre eux (Kohler & Weisz, 2016). Ainsi, le produit et l'ensemble de son cycle de vie, de la première idée à la production jusqu'à sa mise sur le marché, sont impactés par cette révolution (Lichtblau et al., 2015).

Cette diversification des connexions engendre une augmentation des flux de communication et ces échanges doivent être plus rapides. Le déploiement du réseau 5G est un des éléments qui permettra de concrétiser la quatrième révolution industrielle (Walia, Hämmänen, Kilkki,

& Yrjölä, 2019). Ce réseau doit permettre le partage de données industrielles et les communications dès l'heure que les équipements de production (machines, robots) sont capables de se connecter à ce réseau (Walia et al., 2019). Le monde assiste alors à une connexion totale entre toutes les parties prenantes, c'est-à-dire que des échanges sont observables entre l'entreprise, ses fournisseurs et également ses clients (Kohler & Weisz, 2016).

Le développement de technologies, telles que l'Internet des Objets (en anglais « Internet of Things », IoT) ou les Systèmes Cyber-Physiques (en anglais « Cyber-Physical Systems », CPS), coïncide avec la volonté des entreprises de **capter et d'utiliser un maximum de données**. Elles proviennent des équipements de production, des produits (pendant la fabrication, mais aussi la phase d'utilisation) et des résultats des enquêtes de satisfactions menées auprès des clients. Ces données sont capitales pour permettre aux entreprises d'améliorer leur production et pour répondre au mieux aux besoins du client. Cette nouvelle industrie devrait être en mesure de mettre fin à la production de masse pour favoriser la production unitaire. La conséquence est le **rapprochement de l'entreprise avec ses clients**.

Le numérique est au centre des préoccupations dans le concept d'« Industrie 4.0 » (Lichtblau et al., 2015). Ainsi, dans la suite de ce manuscrit, l'emploi de l'expression « transformation numérique » sera préféré à l'expression « Industrie 4.0 ». La « **transformation numérique** » est une expression plus générique et permet de s'affranchir du concept « Industrie 4.0 » qui est l'initiative allemande et non pas l'initiative mondiale.

En effet, toutes les régions du monde ne désignent pas l'« Industrie 4.0 » de la même manière bien que les termes soient proches : « “Smart Manufacturing” (predominantly used in the USA), “Industry 4.0” (predominantly used in Germany/Europe) and “Smart Factory” (predominantly used in Korea/Asia/Europe) » (Mittal, Khan, Romero, & Wuest, 2018b, p. 197).

Cette quatrième révolution tend à s'imposer comme un élément clé de la stratégie des entreprises qui concentrent leurs efforts sur l'intégration de ces technologies dites numériques. Dans le monde actuel, les gouvernements développent des programmes de recherche et allouent des ressources financières et humaines conséquentes pour aider les entreprises à se transformer et à améliorer leur productivité (« Industrie 4.0 » en Allemagne, « Made in China 2025 » en Chine).

Certains pays sont en avance sur d'autres, car leur industrie est déjà très développée et ils avaient anticipé la numérisation des procédés comme l'Allemagne, le Japon ou encore la Corée du Sud (Bidet-Mayer, 2016). A l'opposé, la France est en retard et, elle doit moderniser son industrie pour entrer dans l'ère de la numérisation (Bidet-Mayer, 2016).

L'évaluation de la maturité d'une entreprise a été traitée par de nombreux experts lors de l'intégration de nouvelles méthodes de gestion telles que le Lean Management ou encore le Product Lifecycle Management (PLM). Pour contrôler et réussir cette transformation, de nombreux travaux ont permis l'apparition d'outils similaires **pour évaluer la maturité numérique des entreprises**. Ainsi, différents modèles de maturité numérique sont développés par des scientifiques et des consultants depuis l'apparition du concept « Industrie 4.0 » (Felch, Asdecker, & Sucky, 2019). De la même manière que les autres méthodes de gestion, ces modèles de maturité permettent de valider les critères pour qu'une entreprise réponde aux exigences générées par l'avènement de la transformation numérique.

Ce projet est une partie d'un projet international, Digitalization and Internationalization Maturity Level in Aerospace (DIMLA) (Figure 0.1), réunissant une équipe canadienne et une équipe allemande. Ces équipes sont composées d'universitaires (École de technologie supérieure et Hamburg University of Technology), de personnes provenant de Petites ou Moyennes Entreprises (PME), et de consultants. Elles sont supportées par deux clusters

mondiaux de l'aéronautique que sont respectivement Aéro Montréal¹ et Hamburg Aviation². L'objectif du projet DIMLA est de **développer un modèle de maturité numérique** pour donner la possibilité aux PME d'évaluer leur état de maturité au travers d'une grille d'indicateurs de maturité numérique, nommés Indicateurs Clés de Performance (en anglais « Key Performance Indicator », KPI). Un échantillon de PME, qui sont membres des clusters, permettront de tester, d'ajuster et de valider le modèle de maturité.

Afin de répondre aux exigences du marché, qui impose aux industries d'être flexibles et productives, il faut être en mesure de distinguer les différences entre les entreprises, et notamment les PME. Le coût des technologies a diminué, mais cela reste un investissement important pour ce type d'entreprises (Taisch et al., 2018). De plus, les PME ont souvent connaissance de cette révolution et comprennent son importance, mais peu d'entre elles transforment leur système de production à cause d'un manque d'expertise et de ressources (Taisch et al., 2018). Il faut donc les guider efficacement dans leur transformation pour qu'elles conservent leur compétitivité. En effet, une mauvaise gestion des investissements, une mauvaise utilisation des nouvelles technologies ou encore un manque de connaissance en lien avec la transformation numérique peut entraîner une baisse de la compétitivité de l'entreprise, et ainsi aller à l'inverse de l'effet désiré (Taisch et al., 2018).

L'objectif principal de ce mémoire est de **créer un ensemble d'indicateurs de maturité numérique des entreprises à partir des modèles d'évaluation de la maturité numérique** libres d'accès dans la littérature et les outils d'audit fournis par divers organismes. Cet ensemble d'indicateurs de maturité numérique devrait prendre en compte différents aspects de l'entreprise évaluée, tels que les produits, les services, les procédés de fabrication, les technologies utilisées, la structure organisationnelle, la stratégie numérique et la dimension humaine de l'entreprise. Cet objectif principal comprend trois objectifs spécifiques :

¹ « Montréal compte parmi les grands centres aérospatiaux avec Toulouse et Seattle » selon le Ministère de l'Économie et de l'Innovation (<https://www.economie.gouv.qc.ca> ; aussi https://www.aeromontreal.ca/industrie_fr.html).

² « Hamburg Aviation is [...] one of the world's most important locations in the civil aviation industry » (<https://www.hamburg-aviation.de/#accordion-34763>).

- faire l'inventaire des indicateurs de maturité numérique proposés par les différents modèles de maturité numérique disponibles,
- concevoir un cadre de travail permettant de comparer les indicateurs de maturité numérique des différents modèles,
- proposer une liste d'indicateurs de maturité numérique découlant de la synthèse des indicateurs en provenance de ces modèles.

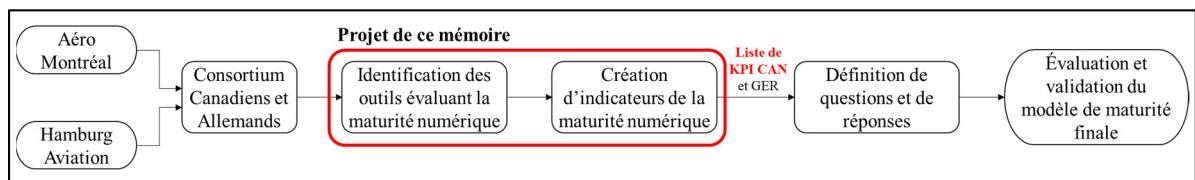


Figure 0.1 Ensemble des étapes du projet DIMLA

Pour atteindre les objectifs fixés pour cette recherche, la méthodologie suivante a été retenue :

- identifier des modèles de maturité en lien avec la transformation numérique,
- dégager les KPI préconisés par ces modèles de maturité numérique au travers des jeux de questions et réponses qu'ils proposent,
- développer une méthodologie et des outils informatiques pour **automatiser la comparaison des KPI issus des modèles de maturité numérique**,
- mettre en place des indicateurs statistiques pour analyser les résultats de la comparaison,
- **synthétiser en nouveaux KPI**, les KPI issus des modèles de maturité existants.

Ce mémoire est organisé en six chapitres. Le chapitre 1 présente une revue de la littérature qui permet de cerner les contours de la « transformation numérique » et d'analyser les modèles permettant l'évaluation de la maturité numérique. La méthodologie mise en œuvre dans ce mémoire est ensuite présentée au chapitre 2. Le chapitre 3 présente la démarche adoptée pour comparer l'ensemble des KPI issus des modèles d'évaluation de la maturité numérique et pour synthétiser ces KPI. Le chapitre 4 montre les résultats de l'analyse des KPI issus des modèles de maturité numérique à l'aide d'indicateurs statistiques. Pour donner

suite à cette analyse, le travail de synthèse des KPI issus des modèles de maturité numérique et la création d'une liste de KPI, notée KPI CAN, sont présentés au chapitre 5. Une comparaison de cette liste avec celle produite par l'équipe universitaire allemande du projet DIMLA est proposée à la fin de ce chapitre. Enfin, le chapitre 6 propose une discussion sur les limites de la démarche adoptée.

Les résultats de cette étude permettent d'aider les entreprises dans leur transformation numérique. La volonté de moderniser le tissu industriel, d'améliorer sa productivité et son attractivité profite aux gouvernements et aux entreprises. Ainsi, elles auront accès à des indicateurs de maturité numérique pour connaître les **grandes directives à suivre** pour qu'une entreprise puisse **réussir sa transformation numérique**.

CHAPITRE 1

REVUE DE LITTÉRATURE

Cette revue de littérature propose une vue d'ensemble sur la **transformation numérique** et l'**évaluation de la maturité des entreprises**. Premièrement, un bref historique des trois premières révolutions industrielles donne un aperçu de la situation dans laquelle évoluent les entreprises aujourd'hui. Cette première section permet de caractériser l'importance du concept « Industrie 4.0 » dans le monde vis-à-vis de la littérature scientifique. La deuxième section propose une collecte des définitions caractérisant la quatrième révolution industrielle et identifie les différents groupes technologiques qui sont associés à la transformation numérique. La troisième section porte sur les modèles de maturité et les KPI. Enfin, la quatrième section identifie différentes méthodes mises en œuvre pour développer un modèle de maturité et identifier les indicateurs de maturité numérique.

1.1 Historique des révolutions industrielles

Une révolution industrielle entraîne une modification profonde du fonctionnement des entreprises (Schwab, 2016). Ce changement provient de la découverte et de l'utilisation de nouvelles technologies et d'une nouvelle pensée qui impactent les modes de production, les produits et les services (Larousse). Les effets de cette révolution dépassent l'industrie elle-même. Elle a des conséquences sur la société et son mode de vie, l'économie et l'environnement (Schwab, 2016).

Avant l'apparition de l'« Industrie 4.0 », les entreprises ont connu trois révolutions industrielles. Dans cette section, une description de ces révolutions donne un aperçu sur des facteurs qui provoque une transformation majeure de l'industrie et la société. Elle repose essentiellement sur le contenu disponible dans l'encyclopédie en ligne Larousse et les termes les plus appropriés ont été retenus.

1.1.1 Première révolution industrielle : la mécanisation de l'industrie et la machine à vapeur

A la fin du XVIII^e siècle, l'industrie a commencé à se mécaniser avec l'arrivée des énergies hydraulique et fossile (Beaudoin et al., 2016). Ainsi, la première révolution industrielle a été marquée par l'apparition de la machine à vapeur dans les industries textiles et de la métallurgie. Elle a provoqué un véritable changement dans la société. D'une part, la population, encore rurale à l'époque, a été appelée à travailler dans les usines. La production a été considérablement accrue. D'autre part, cette première révolution a eu un impact sur les moyens de transport. Les premiers chemins de fer et le train à vapeur ont été développés au début du XIX^e siècle.

La propagation à travers le monde, de ces nouvelles technologies, n'a cependant pas été uniforme. Cette révolution a débuté au Royaume-Uni, ce qui lui a permis de prendre de l'avance sur ses concurrents et de conserver sa domination sur les autres pays industrialisés. Elle s'est ensuite étendue en France, en Belgique et en Suisse au début du XIX^e siècle. Enfin, dans la seconde moitié du XIX^e siècle, l'Allemagne et les Etats-Unis ont été les derniers pays où la première révolution a eu un impact significatif.

1.1.2 Deuxième révolution industrielle : l'électricité, la production de masse et la division du travail

La deuxième révolution industrielle a eu lieu à la fin du XIX^e siècle. Elle a reposé sur le développement de chaînes de production telle que celle des abattoirs de Cincinnati en 1870 selon le Centre de recherche allemand sur l'intelligence artificielle (DFKI) (cité par Kagermann et al., 2013) et sur l'extension de l'électricité (au cours des années 1880). L'électricité a apporté de nouvelles technologies comme le tramway, le moteur électrique ou encore l'éclairage. Cette deuxième révolution a également permis une réorganisation plus logique des entreprises qui ont abandonné les systèmes complexes et coûteux des poulies/courroies imposés par les machines à vapeur. La division du travail, avec les méthodes de Taylor et de Ford, a permis une nouvelle fois d'augmenter la production des

usines qui n'ont cessé de s'agrandir. L'économie s'est ainsi structurée autour de « grandes usines » (Larousse, s.d.). De nouveaux matériaux ont été utilisés comme l'acier. Le niveau de vie des ouvriers s'est amélioré.

Cette révolution a commencé aux États-Unis puis a atteint l'Europe avec la production de masse en armement pour la Première Guerre mondiale.

1.1.3 Troisième révolution industrielle : les Nouvelles Technologies de l'Information et de la Communication (NTIC)

L'arrivée de l'énergie nucléaire, des NTIC et de la production automatisée a constitué la troisième révolution industrielle. Elle est intervenue dans la deuxième moitié du XX^e siècle. Elle a également été soutenue par l'apparition de l'électronique, notamment des microprocesseurs ainsi que des automates programmables. Dans les pays occidentaux (États-Unis, Europe de l'Ouest) et le Japon, le secteur tertiaire s'est développé au détriment des entreprises manufacturières qui se sont automatisées. Cette révolution a promu l'utilisation des énergies renouvelables et réduit la consommation des énergies fossiles (pétrole, charbon).

Les États-Unis ont encore été à l'origine de cette révolution qui s'est ensuite répandue au Japon et en Europe occidentale. Elle s'est par la suite généralisée au monde entier.

1.1.4 Quatrième révolution industrielle : la connectivité ubiquitaire

La quatrième révolution industrielle est une nouvelle rupture dans le monde de l'entreprise, autant dans sa gestion que dans son organisation, comme les révolutions précédentes. Elle englobe le concept d'« Industrie 4.0 » et un ensemble de technologies (sous-section 1.2.2). « It is the fusion of these technologies and their interaction across the physical, digital and biological domains that make the fourth industrial revolution fundamentally different from previous revolutions » (Schwab, 2016, p. 12). Cette révolution nécessite l'utilisation de plusieurs technologies simultanément. Le concept d'« Industrie 4.0 » est basé sur la connexion des systèmes de production pour accroître leur productivité et leur autonomie et

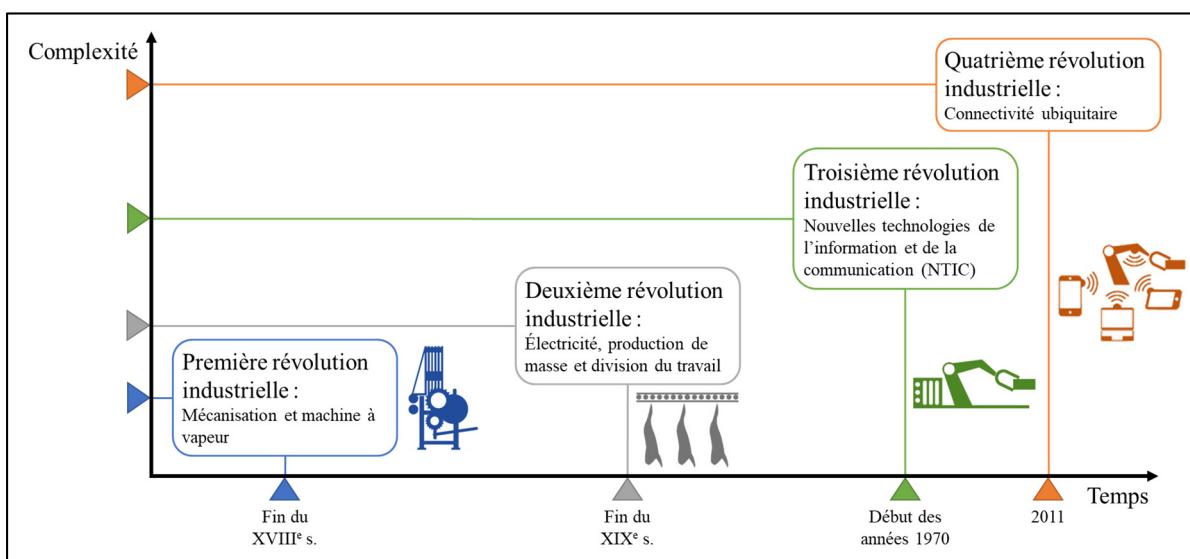
impacte également les produits et les services. De plus, les outils virtuels deviennent importants, puisqu'ils sont en mesure de collaborer avec les systèmes physiques pour personnaliser et créer de nouveaux produits (Schwab, 2016). La quatrième révolution est parfois qualifiée de « transformation numérique » (en anglais « digital transformation ») comme dans l'ouvrage de Schaeffer (2017) ou le rapport de (Lichtblau et al., 2015).

L'Allemagne s'est lancée en premier dans cette révolution et l'a annoncé officiellement en 2011 (Kagermann et al., 2013). Elle a été propulsée par une des initiatives d'innovation supportées par le gouvernement allemand depuis 2006 (Kagermann et al., 2013). Les États-Unis ainsi que les pays d'Europe occidentale (à l'exception de l'Allemagne), la Chine, le Japon et la Corée du Sud ont lancé des programmes d'investissements pour soutenir la transformation des entreprises vers ce nouveau modèle. Elle se généralise progressivement à l'ensemble des pays industrialisés.

L'annexe I fournit le détail des requêtes menées à partir de la base de données Scopus pour observer, via les publications scientifiques et industrielles, l'engouement du monde entier pour la transformation numérique. Elle s'inspire d'une étude menée par Danjou, Rivest, & Pellerin (2017). Ainsi, le nombre de publications en lien avec la transformation numérique double quasiment chaque année depuis 2015. Cet essor montre **l'intérêt croissant** que portent les chercheurs **à l'égard de la transformation numérique**.

Cette annexe montre également que l'Allemagne est le pays qui publie le plus sur le sujet de la transformation numérique. Elle est suivie par les États-Unis et la Chine. Les États-Unis ont lancé leur projet de numérisation peu de temps après le concept allemand. La Chine a pris conscience de l'importance de la transformation numérique en 2015 et cherche à rattraper son retard. Cette révolution s'étend au monde entier et 80 pays possèdent au moins 10 publications sur le sujet de la transformation numérique (contre 34 dans l'étude de Danjou et al., 2017).

La frise chronologique en Figure 1.1, inspirée d'un travail du DFKI, résume les quatre révolutions industrielles présentées précédemment. Elle permet également de souligner que, d'un côté, les **révolutions** surviennent **de plus en plus fréquemment** et que, de l'autre côté, il y a une **augmentation de la complexité** à chaque révolution. En effet, la rapidité du développement de nouvelles technologies, de produits, de services ainsi que leur introduction dans la société imposent une adaptation constante des systèmes de production industriels.



Cette complexité a un coût, c'est pourquoi de nombreux programmes d'investissement sont créés pour supporter les entreprises dans leur transformation. De plus, il s'agit de la première fois qu'une révolution industrielle est prédictive (Drath & Horch, 2014 cités par Hermann et al., 2016) et les technologies qui la supportent existent, pour certaines, depuis plusieurs décennies.

Cette quatrième révolution pousse les entreprises à modifier leur organisation afin de **rester compétitif face à leurs concurrents**. Dans un rapport du Centre Francophone d'Informatisation des Organisations (CEFARIO) (Danjou et al., 2017), il est montré que la

transformation numérique impacte la stratégie des entreprises aux niveaux « **des processus, des produits et des services** ».

1.2 La transformation numérique et ses technologies

Tous les auteurs n'ont pas la même définition de la transformation numérique. Il devient alors intéressant de regarder de plus près, les différentes façons dont les auteurs nomment et définissent la transformation numérique. Dans ce mémoire, l'expression « transformation numérique » englobe toutes les initiatives et les concepts en lien avec la quatrième révolution industrielle. Dans la littérature, l'expression « Industry 4.0 » est une des expressions les plus fréquemment utilisées pour désigner la transformation numérique (Oztemel & Gursev, 2020), c'est pourquoi cette section examine les définitions disponibles pour les deux expressions.

Cette étape de caractérisation de la transformation numérique est nécessaire pour identifier les KPI permettant d'évaluer la maturité numérique des entreprises. De plus, une discussion sur les technologies qui vont modifier le fonctionnement des entreprises est proposée.

1.2.1 Définition des concepts autour de la transformation numérique

1.2.1.1 Liste des définitions

Actuellement, il n'existe pas une définition claire de ce qu'est vraiment la transformation numérique. De nombreux points de vue peuvent être observés dans la littérature. « While some of the researcher focusing their attention on digitization, others consider communication aspect dominating the manufacturing structure. The others opting for intelligence and autonomy of the systems by being the primer features of Industry 4.0. » (Oztemel & Gursev, 2020, p. 129).

De plus, la traduction du terme « numérisation », en anglais, mène à deux termes : « digitization » et « digitalization ». Le premier caractérise l'action de transformer un objet physique en un objet numérique (par exemple, numériser (au sens « scanner ») un document)

(Gatner cité par Bloomberg, 2018). Le deuxième comprend ce passage de l'état physique à l'état numérique et implique également une modification des processus de travail (par exemple, intégration des données pour gérer son système de production) (Schaeffer, 2017 ; Gatner cité par Bloomberg, 2018). Ainsi, le terme « **digitization** » désigne davantage une action d'enregistrement numérique alors que le terme « **digitalization** » désigne la volonté d'une entreprise à tirer profit des données numériques pour transformer ces processus de fabrication et créer une valeur ajoutée aux produits et aux services (i-SCOOP, s.d.). Pour la suite de ce mémoire, seul le terme « **digitalization** » sera retenu.

Dans leur rapport, Lichtblau et al. (2015) définissent le concept « Industrie 4.0 » comme une **transformation de l'ensemble du cycle de vie du produit**. Dans le même rapport, il est possible de noter que ce nouveau cycle s'adapte aux besoins spécifiques de chacun des clients et s'appuie sur les échanges d'informations en temps réel.

Le concept « Industrie 4.0 » est « la réponse allemande à la menace que fait peser l'irruption du numérique sur les chaînes de valeur industrielles. Il s'agit d'une ambition technologique consistant à produire des séries de taille 1 à des coûts équivalents à ceux de la production de masse en introduisant des systèmes de production cyber-physiques dans l'usine » (Kohler & Weisz, 2016, p. 51).

La transformation numérique impacte alors le mode de fonctionnement de cette nouvelle industrie et vise à améliorer les performances et les rendements tout en satisfaisant au mieux les clients. Le produit peut être personnalisable selon les souhaits du consommateur et peut même interagir avec la machine de production.

Il est possible de trouver le même type de définition dans le Grand Dictionnaire Terminologique (Office québécois de la langue française, 2018b). Cette définition met en avant l'interconnexion entre toutes les parties prenantes et caractérise l'« Industrie 4.0 » avec l'utilisation de l'Intelligence Artificielle (IA).

En plus, du contour général de l'« Industrie 4.0 », des comparaisons avec les précédentes révolutions industrielles sont proposées. Ainsi, dans leur rapport, Geissbauer, Vedso, & Schrauf (2016) indiquent que la troisième révolution industrielle impactait chacun des systèmes individuellement sans prendre en compte les autres systèmes de l'entreprise, alors que la quatrième révolution industrielle, au travers de **la transformation numérique, impacte la globalité de l'entreprise et ses partenaires**. Il est possible d'observer une transformation transversale, c'est-à-dire que tous les secteurs de l'entreprise sont concernés, mais également les relations avec les partenaires de cette entreprise.

Danjou et al. (2017) définissent quatre niveaux de capacités des « processus, produits et services [4.0 qui sont] la surveillance, le contrôle, l'optimisation et l'autonomie » à partir du travail de Porter & Heppelmann (2014). Ces capacités correspondent aux étapes que peut suivre une entreprise pour réussir sa transformation numérique. Dans ce même rapport, il est indiqué qu'une initiative de transformation numérique n'est possible que si l'entreprise a accès à des données. Geissbauer et al. (2016) considèrent même que la collecte de données et leur analyse doivent devenir « une capacité de base » pour les entreprises.

Certaines définitions reposent sur un groupe de technologies. Certains auteurs, tels que Schaeffer (2017) ou encore Kagermann et al. (2013), axent leur réflexion au sujet de la transformation numérique sur un groupe technologique précis. Le premier considère que l'IoT est indispensable à cette révolution tandis que les seconds placent les CPS au centre de leur réflexion.

Dans leur article, Samaranayake, Ramanathan et Laosirihongthong (2017) vont même plus loin. Ils considèrent que les CPS vont modifier les modes de production et seront au centre de l'architecture des entreprises.

Hermann et al. (2016) définissent l'« Industrie 4.0 » comme étant la combinaison de plusieurs technologies et concepts. Ainsi, l'IoT et les CPS permettent de créer une usine intelligente en connectant les employés, les produits et les machines. Cependant, les CPS y

occupent tout de même une place centrale. « Industrie 4.0 is a collective term for technologies and concepts of value chain organization. Within the modular structured Smart Factories of Industrie 4.0, CPS monitor physical processes, create a virtual copy of the physical world and make decentralized decisions. Over the IoT, CPS communicate and cooperate with each other and humans in real time » (Hermann, Pentek, & Otto, 2015, p. 11).

L'« Industrie 4.0 » peut également être définie comme un changement absolu. Ainsi, Schwab (2016) étend les frontières du concept 4.0 qui ne se limite pas à l'implantation de machines intelligentes et de systèmes connectés dans les entreprises. Au-delà du changement dans l'industrie, la transition vers le numérique va avoir un impact non négligeable sur les comportements et la société. L'« Industrie 4.0 » n'est pas une simple évolution technologique, mais une **transformation en profondeur de l'ensemble de la société** (Schwab, 2016). Dans ce sens, l'article de Kohler & Weisz (2016) mentionne l'interconnexion entre les employés, les clients, les machines et les produits.

Les définitions, que donnent les gouvernements lors des lancements de projets numériques, sont orientées sur le fonctionnement de la transformation numérique. Au Québec, le Ministère de l'Économie et de l'Innovation Québec (2019) caractérise cette transformation comme « l'exploitation et la gestion massive des données, l'interconnexion des machines, la dématérialisation des canaux de communication et de distribution et la **restructuration de l'entreprise pour une production flexible et personnalisée** ».

Felch et al. (2019) indiquent qu'il n'existe pas une seule définition de l'expression « Industry 4.0 » sur laquelle s'accordent tous les experts du domaine. Ils proposent alors leur propre définition de l'« Industry 4.0 » en se basant sur l'article de Zhou, Liu, & Zhou (2015) : « the interplay of state-of-the-art technologies (e.g., IoT, CPS, big data) to increase the automation and digitization of the manufacturing processes, which facilitate a highly flexible production model of personalized and digital products and services, with real-time interactions between people, products and devices during the production process » (Felch et al., 2019, p. 5165).

Bédard-Maltais (2017) définit le concept « Industrie 4.0 » à l'aide de ces objectifs : « réagir plus rapidement aux changements du marché, offrir des produits plus personnalisés et accroître son efficacité opérationnelle ». Cette révolution promet donc une amélioration de la productivité des entreprises en s'adaptant à la demande des clients et en intégrant des solutions numériques.

1.2.1.2 Synthèse

Il est difficile de trouver une définition unique, car ce concept touche la société dans son intégralité. L'objectif de ce manuscrit est d'identifier les critères permettant l'évaluation de la maturité numérique d'une entreprise, donc il faut une définition du concept assez large, mais qui se focalise sur l'entreprise.

L'analyse de la littérature fait émerger la définition suivante. La **transformation numérique** correspond à l'adoption de nouvelles technologies, qualifiées de numériques, et permettant à une entreprise de réduire les coûts de production, d'améliorer sa **flexibilité** et ses **performances** et d'être à l'écoute des clients pour la personnalisation des produits (Kagermann et al., 2013 ; Bédard-Maltais, 2017). Cette révolution doit permettre une **interconnexion entre « tous les «objets» de l'usine** – employés, machines, produits, clients, fournisseurs, systèmes, etc. » (Beaudoin et al., 2016, p. 6). La transformation numérique correspond à « **l'intégration de tous les partenaires de la chaîne de valeur**, dans un unique écosystème numérique. L'Industrie 4.0 promet une augmentation de la productivité par **l'intégration de systèmes numériques** qui visent la production, l'analyse et la communication de l'ensemble des données à l'intérieur de cet écosystème » (reprise du rapport de Geissbauer et al. (2016) sur une page Web de PricewaterhouseCoopers (PwC) en français, 2016).

1.2.2 Les technologies associées à la transformation numérique

Les technologies qui forment la base de l'« Industrie 4.0 » permettent de modifier le fonctionnement des entreprises : elles passent alors d'un mode plus ou moins cloisonné

(l'entreprise est découpée en plusieurs départements qui communiquent peu entre eux) à un mode interconnecté (il n'y a plus de séparations). Certains auteurs s'attachent à associer ce concept à une seule technologie (tel que l'IoT ou les CPS), pendant que d'autres tentent de répertorier l'ensemble des technologies, qui peuvent être organisées en groupes technologiques.

1.2.2.1 Différentes approches

Il est difficile d'effectuer une étude comparative des différents groupes technologiques, car les auteurs ne les identifient pas de la même manière. Pour identifier ces composants de la transformation numérique, une comparaison entre plusieurs documents est proposée.

Ainsi, dans le rapport du Boston Consulting Group (BCG), Rüßmann et al. (2015) répertorient 9 composants pour supporter la transformation numérique. Dans le rapport pour le CEFRI, Danjou et al. (2017) s'inspirent du précédent rapport et identifient 10 groupes technologiques. Dans la littérature, les rapports du BCG (Rüßmann et al., 2015) et du CEFRI (Danjou et al., 2017) sont cités à de nombreuses reprises, c'est pourquoi ce mémoire s'appuie sur leurs conclusions. Une revue de littérature, effectuée par Oztemel & Gursev (2020), regroupe les 10 notions les plus utilisées autour du concept d'« Industrie 4.0 ». Enfin, Salkin, Oner, Ustundag, & Cevikcan (2018) identifient, dans leur cadre de travail conceptuel, 12 technologies pouvant supporter la transformation numérique.

La comparaison de ces 4 références permet de souligner l'apparition de 7 groupes technologiques qui sont : les CPS, l'IoT, la communication inter-machines (en anglais « Machine-to-Machine », M2M), la réalité augmentée (en anglais « Augmented Reality », AR), les mégadonnées (en anglais « Big data ») et leur analyse, la simulation et l'infonuagique (en anglais « Cloud »).

Ces documents présentent quelques différences. Premièrement, Danjou et al. (2017) introduisent l'IA comme un groupe technologique. Cependant, l'IA n'est pas mentionnée

dans le rapport de BCG. Dans l'article de Salkin et al. (2018), l'IA est définie comme une technologie supportant l'« Industrie 4.0 », mais liée à l'analyse des données.

De plus, l'IA combinée aux robots intelligents facilite la fabrication des produits. Dans ce mémoire, et bien que cela ne fasse pas l'unanimité dans la littérature, l'IA ne sera pas un groupe technologique à part entière, elle sera rapprochée des mégadonnées et de leur analyse comme dans l'article de Salkin et al. (2018).

L'utilisation des imprimantes 3D est différenciée des robots autonomes dans le rapport du BCG (Rüßmann et al., 2015). Dans la revue de littérature de Oztemel & Gursev (2020), la notion de robotique intelligente fait partie des notions importantes du concept « Industrie 4.0 ». Dans leur recherche, ils font aussi référence à des systèmes autonomes. L'ensemble de ces notions peut être placé dans un groupe technologique nommé « Machine autonome ». Dans le rapport de Beaudoin et al. (2016, p. 21), il est mentionné que les outils liés à la fabrication additive peuvent être considérés comme des machines autonomes, car ces outils sont considérés comme un « procédé de fabrication au même titre que les machines-outils ou les robots ».

Un dernier groupe technologique peut être repéré au travers de ces documents. Il s'agit de la « Cybersécurité ». Cette notion ne fait pas partie des 10 notions les plus importantes pour Oztemel & Gursev (2020), mais elle est mentionnée à plusieurs reprises dans leur revue de littérature comme nécessaire pour les autres technologies. Cette technologie contribue au bon développement de la transformation numérique des entreprises. En effet, la collecte, le partage et le stockage des données sont des questions fondamentales pour les entreprises (Salkin et al., 2018). Le rapport de Rüßmann et al. (2015) montrent que de nombreuses entreprises ne sont pas connectées et donc que leurs données sont internes à l'entreprise. Cependant, la transformation numérique impose aux entreprises de se connecter aux réseaux pour qu'elles puissent conserver et partager leur information, ainsi que pour contrôler à distance leurs activités.

1.2.2.2 Groupes technologiques supportant la transformation numérique des entreprises

La revue de littérature a permis d'identifier **9 groupes technologiques** :

- Internet des Objets (IoT),
- Systèmes Cyber-Physiques (CPS),
- Simulation,
- Mégadonnées, analyse et Intelligence Artificielle (IA),
- Cybersécurité,
- Réalité augmentée (AR),
- Machines autonomes,
- Infonuagique,
- Communication inter-machines (M2M).

Chacun de ces groupes technologiques fait l'objet d'une définition qui repose sur les articles de la littérature et qui se situe dans l'annexe II.

De plus, il existe dans la littérature des modèles sur la structuration de la transformation numérique des entreprises comme le modèle Reference Architectural Model Industrie 4.0 (RAMI 4.0). Ce modèle est composé de trois axes qui permettent de lier les normes et standards industriels avec les spécifications des technologies relatives à la transformation numérique (Hankel & Rexroth, 2015).

L'étude de la littérature a permis d'avoir une meilleure compréhension de la transformation numérique et des technologies qui la supportent. Elle est nécessaire pour savoir ce qui doit être évalué dans les entreprises par les modèles de maturité numérique.

1.3 Évaluation de la maturité numérique

L'arrivée de la quatrième révolution industrielle et la mise en place de nouvelles technologies bouleversent les industries. Les gouvernements cherchent à soutenir les entreprises pour

qu'elles réussissent leur transformation le plus rapidement possible. Cette transformation numérique engendre des investissements conséquents de la part des entreprises, mais un mauvais choix ou une mauvaise utilisation des technologies pourraient conduire à des pertes élevées (Taisch et al., 2018).

Les précédentes révolutions ont montré que les premières nations capables de transformer leur industrie possédaient un avantage sur les autres nations. En effet, le Royaume-Uni a dominé le monde suite à la première révolution industrielle. Il en est de même pour les Etats-Unis pour les seconde et troisième révolutions industrielles. Dans cette course vers la transformation numérique, **l'identification des indicateurs de maturité numériques et la mesure de leur impact sur les entreprises sont alors primordiales** (Schwer, Hitz, Wyss, Wirz, & Minonne, 2018).

À l'aube de la quatrième révolution industrielle, les gouvernements visent à évaluer la maturité numérique des entreprises par des questionnaires d'auto-évaluation ou des audits. Le but est de comparer les entreprises aux entreprises les plus performantes et de déterminer les meilleures pratiques pour prendre le virage numérique.

1.3.1 Définitions

Au-delà de la description de l'« Industrie 4.0 » et de toutes les technologies qu'elle apporte, il faut établir un moyen pour évaluer la maturité numérique des entreprises.

Cette section est l'occasion de définir des termes en lien avec la maturité numérique des entreprises et de cerner les nuances dans le vocabulaire employé. Une première étape consiste à définir le terme « maturité ».

Ainsi, la **maturité** fait référence à un état « complet, parfait ou prêt » (Simpson & Weiner, 1989). Elle désigne la capacité, pour quelqu'un ou quelque chose, d'atteindre le meilleur niveau possible.

Pour s'assurer de la mise en place des meilleures pratiques au sein des entreprises, des modèles d'évaluation de la maturité ont été développés pour mesurer les progrès dans leur transformation. Ces modèles de maturité fournissent une indication sur le niveau de maturité d'une entreprise en fonction d'un état cible considéré comme le plus mature (Schumacher, Erol, & Sihn, 2016). De plus, des projets opérationnels, des changements tactiques et stratégiques sont rendus possibles avec ces modèles de maturité (Felch et al., 2019).

L'implantation de nouvelles technologies dans les entreprises implique une évaluation de la maturité numérique des entreprises. Différentes études ont été menées (revue de littérature, consultation d'experts) pour créer des outils et mesurer la maturité numérique des entreprises.

Rossmann (2018) définit la **maturité numérique** d'une entreprise comme la capacité à acquérir et à utiliser des technologies dites numériques pour améliorer l'ensemble de son activité.

Cette revue de littérature montre une nuance entre deux types de modèles : les modèles de maturité et les modèles de « readiness assessment ».

« Maturity models are models that help an individual or entity to reach a more sophisticated maturity level following a step-by-step continuous improvement process » (Mittal et al., 2018b, p. 199). Ainsi, un modèle de maturité permet de déterminer le niveau actuel d'une entreprise et de lui indiquer les étapes pour progresser. Wendler (2012) ajoute qu'un modèle de maturité permet à une entreprise de prendre conscience des différents aspects d'une transformation et notamment sur la préparation et la complexité de cette dernière. Le modèle de maturité est le fil directeur des changements opérés par l'entreprise et permet de la guider efficacement dans sa transformation.

Les modèles de « readiness assessment » (évaluation de l'état de préparation) examinent la capacité d'une entreprise à engager une transformation de son organisation selon Sassanelli,

Rossi et Terzi (2019). Cette évaluation détermine un « level of preparedness » (un niveau de préparation) (d'après Benedict et al. (2017) cités par Mittal et al., 2018b) à partir des conditions et des ressources nécessaires pour atteindre un objectif. Dans leur rapport, Lichtblau et al. (2015, p. 8) considèrent que l'« Industrie 4.0 readiness is the willingness and the capacity of companies to implement the ideas behind Industrie 4.0 ».

Les modèles d'évaluation de la maturité et les modèles d'évaluation de l'état de préparation sont deux types de modèles proches, mais pas identiques. Ainsi, il s'agit de deux modèles d'évaluation permettant de décrire l'état d'une entreprise qui souhaite atteindre un ou des objectifs. Le résultat de ces deux types d'évaluations peut être considéré comme une « photo » de l'entreprise, c'est-à-dire que le résultat obtenu à partir de ces modèles décrit l'entreprise à un instant précis. La différence réside dans l'objectif fixé. D'un côté, l'évaluation de la maturité porte sur la capacité d'une entreprise à exploiter/utiliser quelque chose. D'un autre côté, l'évaluation de l'état de préparation porte sur la capacité d'une entreprise à planter/déployer quelque chose. Par la suite, seule l'expression de « **modèle de maturité** » sera conservée pour désigner ces deux types d'évaluation.

Un **modèle d'évaluation de la maturité numérique** est un outil qui identifie les meilleures pratiques et permet de déterminer le niveau de maturité numérique d'une entreprise (Schumacher et al., 2016). Dans une moindre mesure, il donne les bases pour guider la transformation de l'entreprise de l'état actuel vers l'objectif ciblé et ainsi accroître le niveau de maturité (Schumacher et al., 2016).

Ces modèles se présentent généralement sous la forme d'ensembles de questions et de réponses. Ces questions et réponses sont typiquement regroupées au sein de dimensions et sous-dimensions permettant de structurer les modèles autour de concepts centraux. Certains modèles identifient des « **items** » (Schumacher et al., 2016), « **factors** » (Samaranayake et al., 2017) ou des « **variables** » (Schwer et al., 2018) définissant la maturité numérique. Dans ce mémoire, ces notions sont assimilées à des **indicateurs clés de performance** (en anglais « Key Performance Indicators », KPI).

Ainsi, un **KPI** permet d'évaluer la situation d'une entreprise à un instant donné pour guider la prise de décision et atteindre un objectif. À partir de ces KPI, il est possible de formuler des questions et de définir les meilleures pratiques. Dans ce mémoire, l'expression « indicateur de maturité numérique » est considérée comme un synonyme de KPI.

Les modèles de maturité numérique ne sont pas tous identiques. Ils utilisent des structures semblables, mais se concentrent sur différents aspects de la transformation numérique. La sous-section suivante montre les similitudes et les différences sur des modèles identifiés pendant la revue de littérature.

1.3.2 Étude des modèles évaluant la maturité numérique

La revue de littérature a permis d'identifier différents modèles d'évaluation de la maturité numérique. Une comparaison de ces modèles est proposée pour comprendre le contenu et le fonctionnement de chacun d'entre eux. Certains modèles de maturité ne révèlent pas entièrement la motivation, le développement et le résultat de leur évaluation. En effet, certains travaux décrivent un modèle de maturité numérique, mais dont le contenu n'est pas dévoilé dans sa totalité (par exemple, Schumacher et al., 2016).

Dans cette sous-section, une comparaison de quelques modèles d'évaluation de la maturité numérique est proposée. Elle permet d'offrir un aperçu global sur la structure d'un modèle de maturité. Dans l'annexe III, le Tableau-A III-1 montre les nuances entre 19 modèles de maturité différents qui sont parfois des outils d'auto-évaluation en ligne, des travaux académiques ou des outils d'audit. Dans la littérature, il existe des articles qui comparent de manière rigoureuse les modèles de maturité numérique, comme ceux de Mittal et al. (2018b) et de Schwer et al. (2018). Dans leur article, Felch et al. (2019) présentent succinctement 20 modèles de maturité.

Le Tableau-A III-1 répertorie le nombre de dimensions, de sous-dimensions, de questions et de KPI pour chacun des modèles accessibles. Le type de réponses ainsi que les niveaux de maturité sont décrits pour chacun des 19 modèles.

1.3.2.1 Outils d'auto-évaluation ou d'audit et articles scientifiques

Il est possible d'organiser les modèles de maturité numérique en deux groupes qui sont les **outils d'auto-évaluation** et les **outils d'audit**. Avec les outils d'auto-évaluation (par exemple, PricewaterhouseCoopers, 2015), l'entreprise peut s'évaluer toute seule et obtenir une première idée de l'état de sa transformation vers le concept d'« Industrie 4.0 ». D'autres outils nécessitent l'implication d'experts pour mener un audit plus approfondie (par exemple, Audit Industrie 4.0 proposé par le Ministère de l'Économie et de l'Innovation Québec, 2018). À la suite de ces audits, un rapport détaillé est rédigé et propose des pistes d'investissements ou des modifications en lien avec l'activité de l'entreprise. Aujourd'hui, de multiples organismes, qu'ils soient publics ou privés, ont la capacité à mener un audit pour mesurer l'état de transformation d'une entreprise pour ensuite guider précisément ses investissements (Rossmann, 2018). Cependant, ces méthodes d'évaluation ne sont pas complètes, car la définition de la quatrième révolution industrielle n'est pas assez mature (Oztemel & Gursev, 2020).

Ces questionnaires peuvent être disponibles en ligne (organismes publics ou privés) ou encore dans la littérature scientifique (travaux universitaires). Comme il est montré dans l'article de Felch et al. (2019), les modèles de maturité proviennent généralement de deux sources. Ainsi, d'un côté, il est possible de retrouver les **modèles scientifiques** et, de l'autre, les **modèles de consultants** en lien avec la transformation numérique.

1.3.2.2 Structures des modèles de maturité

Dans le Tableau-A III-1 en annexe III, la comparaison montre que les modèles de maturité adoptent tous **une structure globale comprenant des dimensions, des sous-dimensions, des questions et parfois des KPI**. Cependant, le découpage du modèle en dimensions n'est

pas universel. Le nombre de dimensions peut varier entre 3 et 11 d'un modèle à l'autre. Il en est de même pour le nombre de sous-dimensions (quand il y en a) et le nombre de questions (de 18 à environ 200). Même si des rapprochements sont visibles, les modèles présentent différentes visions de la transformation numérique. Par exemple, les modèles de maturité de Lichtblau et al. (2015), nommé IMPULS, et de Geissbauer et al. (2016), du groupe PricewaterhouseCoopers (PwC), ont 6 (à gauche dans le Tableau 1.1) et 7 dimensions (à droite dans le Tableau 1.1). Ces deux modèles ont fait l'objet d'un outil d'auto-évaluation en ligne et d'un rapport (IMPULS (2015) et Lichtblau et al. (2015) ; PricewaterhouseCoopers (2015) et Geissbauer et al. (2016)). Ils sont respectivement désignés modèle IMPULS et modèle PwC dans la suite de ce mémoire.

Tableau 1.1 Listes des dimensions des modèles IMPULS et PwC, respectivement adapté de Lichtblau et al. (2015, p. 22) et de Geissbauer et al. (2016, p. 28)

Dimensions du modèle IMPULS	Dimensions du modèle PwC
Strategy and organization	Digital business models and customer access (Business Models, Product & Service Portfolio) ^a
Smart factory	Digitisation of product and service offerings (Market & Customer Access) ^a
Smart operation	Digitisation and integration of vertical and horizontal value chains (Value Chains & Processes) ^a
Data-driven services	Data & Analytics as core capability ^b
Smart products	Agile IT architecture (IT Architecture) ^a
Employees	Compliance, security, legal & tax (Compliance, Legal, Risk, Security & Tax) ^a Organisation, employees and digital culture (Organization & Culture) ^a

^a Le nom des dimensions n'est pas identique dans l'outil d'auto-évaluation en ligne de PwC (PricewaterhouseCoopers, 2015), mais une analogie est faite et montrée dans les parenthèses.

^b Cette dimension n'est pas présente dans l'outil d'auto-évaluation en ligne de PwC (PricewaterhouseCoopers, 2015).

Les noms des dimensions de la colonne de gauche sont différents de ceux de la colonne de droite. Les dimensions n'incluent pas les mêmes idées. Ainsi, s'il est parfois possible de faire le rapprochement entre certaines dimensions (par exemple, « Employees » et « Organisation, employees and digital culture »), la comparaison n'est pas évidente dans d'autres cas (par exemple, « Agile IT architecture »). Ainsi, le modèle IMPULS se concentre davantage sur l'évaluation de la technologie alors que le modèle PwC évalue les questions portant sur la stratégie d'entreprise, la vente et la technologie.

Le découpage en dimensions est différent pour chaque modèle de maturité, puisqu'il dépend de l'approche adoptée par leurs auteurs, mais aussi de la portée de l'évaluation et des entités ciblées par l'étude.

Néanmoins, il est possible d'identifier trois catégories qui reviennent régulièrement. Ainsi, ces modèles font souvent référence aux ressources humaines, aux technologies et à l'organisation de l'entreprise à tous les niveaux (Cognet et al., 2019).

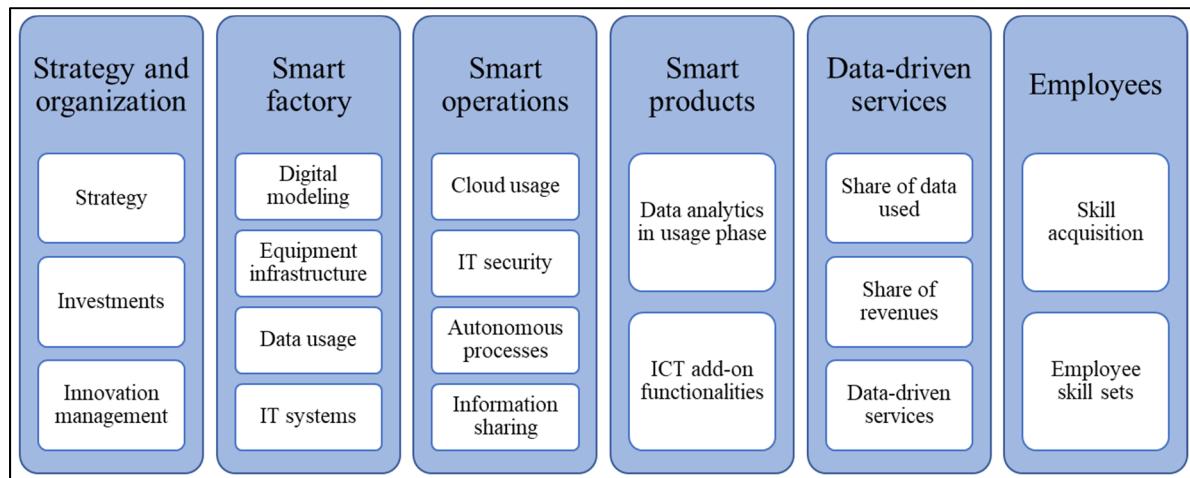


Figure 1.2 Exemple du modèle IMPULS avec des dimensions et des sous-dimensions, adaptée de Lichtblau et al. (2015, p. 22)

En plus de définir des dimensions, plusieurs modèles utilisent des sous-dimensions. Ces sous-dimensions contribuent à structurer l'évaluation. Le modèle IMPULS (Lichtblau et al., 2015) décline son modèle de cette manière (Figure 1.2). Par exemple, la dimension

« Strategy and organization » du modèle IMPULS regroupe 3 sous-dimensions : « Strategy », « Investments » et « Innovation management ».

Pendant cette revue de littérature, les difficultés rencontrées dans l'effort de comparaison des modèles conduisent à l'ajout d'une étape avant de synthétiser les questions et les réponses autour de la maturité numérique. En effet, une méthode doit être définie pour comparer de manière efficace les modèles de maturité numérique.

1.3.2.3 Questionnaires d'évaluation de la maturité numérique

Les modèles présentés dans le tableau en annexe III sont, pour la plupart, composés de questions avec des réponses. Par exemple, le modèle IMPULS possède différents types de réponses entre faire un choix unique parmi les éléments d'une liste, choisir parmi plusieurs options à sélectionner dans une liste, ou encore qualifier l'état de chacun des sous-systèmes.

Le choix des réponses pour chaque question fait aussi l'objet de différences entre les modèles de maturité numérique. Le modèle PwC demande de qualifier l'état actuel et l'objectif futur pour chacune des questions à l'aide de deux curseurs composés de 5 échelons. À côté des curseurs, des indications sont fournies pour les échelons 1 et 5 pour aider les entreprises à caractériser leur niveau de maturité à chacune des questions.

D'autres modèles, comme celui de l'University of Warwick (2017) ou celui de Rossi & Terzi (2016) préfèrent établir des questionnaires avec une seule réponse possible à chaque question (Tableau 1.2). Ainsi, il est possible d'observer une évolution dans les réponses qui correspondent à des niveaux de maturité (décris par la suite).

Tableau 1.2 Analogie entre les réponses et les niveaux de maturité
 du modèle de l'University of Warwick (2017),
 adapté de l'outil d'auto-évaluation de l'University of Warwick (2017) et
 du rapport de Agca, Gibson, Godsell, Ignatius, & Wyn Davies (2017, p. 8)

Question	To what extent are machines and operational systems integrated (M2M)?	Identification des niveaux de maturité
Réponses	Machines and systems have no machine-to-machine capability	Beginner
	Machines and systems are to some extent able to exchange information between themselves	Intermediate
	Machines and systems are partially integrated	Experienced
	Machines and systems are fully integrated	Expert
	Subject not relevant	
	Don't know	

L'analogie faite dans le Tableau 1.2 entre les réponses et les niveaux de maturité est effectuée à l'aide du rapport de Agca et al. (2017) et du modèle de l'University of Warwick (2017). En effet, chacune des questions de ce modèle correspond à une sous-dimension et les réponses sont identiques aux définitions des niveaux de maturité, à l'exception des réponses « Subject not relevant » et « Don't know ».

La plupart du temps, **l'analyse des réponses** possibles permet à l'entreprise de comprendre ce qu'il faudrait mettre en œuvre **pour améliorer sa maturité numérique**.

Parmi les 19 modèles comparés, certains modèles présentent les indicateurs de maturité numérique qui leur ont permis d'aboutir à un questionnaire. Par exemple, dans la publication de Rossi & Terzi (2016), une liste de 107 « meilleures pratiques » est présentée et chacune de ces pratiques est évaluée par une question. Cependant, seul un exemple de question est montré dans la publication. Il en est de même pour le modèle de maturité présenté dans la publication de Schumacher et al. (2016).

L'étude des questions et des indicateurs de maturité numérique montre que les modèles se rejoignent sur certains points. Il est tout de même possible d'observer des spécificités dans chacun d'entre eux. Ainsi, Schwer et al. (2018) observent que certains modèles contiennent des KPI s'appuyant sur des connaissances scientifiques, alors que pour d'autres il est difficile de comprendre l'importance de certains KPI au sujet de la transformation numérique.

1.3.2.4 Définition et attribution de niveaux de maturité

Après avoir noté que la structure et le type de questions et réponses différaient d'un modèle à un autre, il est possible d'observer que chacun des modèles de maturité numérique définit ses propres niveaux de maturité. Un **niveau de maturité** correspond à l'état d'avancement de la transformation d'une entreprise et est attribué en fonction de la note obtenue lors de son évaluation.

Ainsi, pour chacune des dimensions ou sous-dimensions, des niveaux de maturité sont associés. Le nombre de niveaux de maturité varie en fonction des modèles. Scrémin, Armellini, Brun, Solar-Pelletier, & Beaudry (2018) ont défini cinq niveaux de maturité (de 0 à 4) pour chacune des dimensions. L'Initiative MACH, développée par Aéro Montréal (2011), possède une échelle allant du niveau de maturité MACH 1 (« Understand excellence ») à MACH 5 (« Impose excellence ») pour chacune des questions du modèle, tout comme le modèle de l'University of Warwick (2017) (Tableau 1.2).

Le modèle IMPULS possède six niveaux de maturité alors que le modèle PwC en a quatre. Ces niveaux ont été définis pour chacune des dimensions et montrent la voie à suivre pour s'améliorer et atteindre le niveau d'excellence. Sur la Figure 1.3 et la Figure 1.4, des exemples des niveaux de maturité des modèles IMPULS et PwC sont proposés.

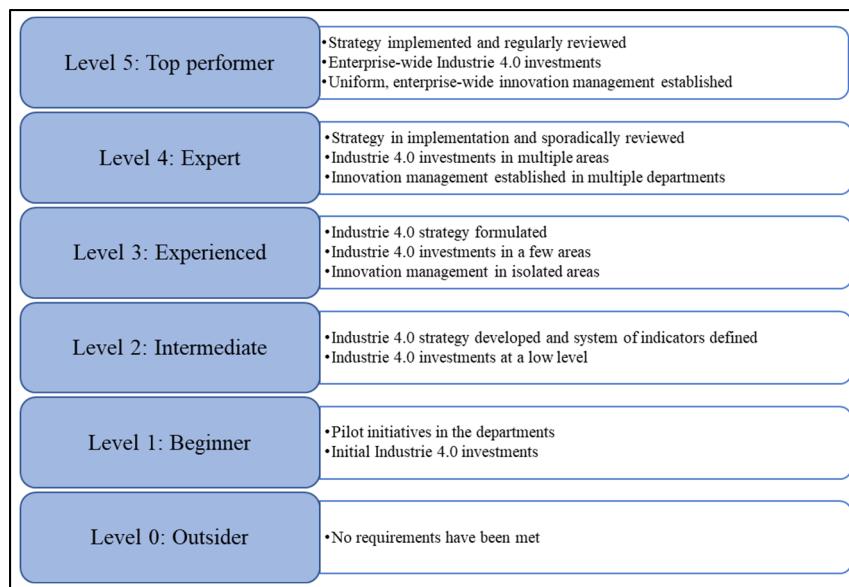


Figure 1.3 Définitions des niveaux de maturité pour la dimension « Strategy and Organization » du modèle IMPULS, adaptée de Lichtblau et al. (2015, p. 30)

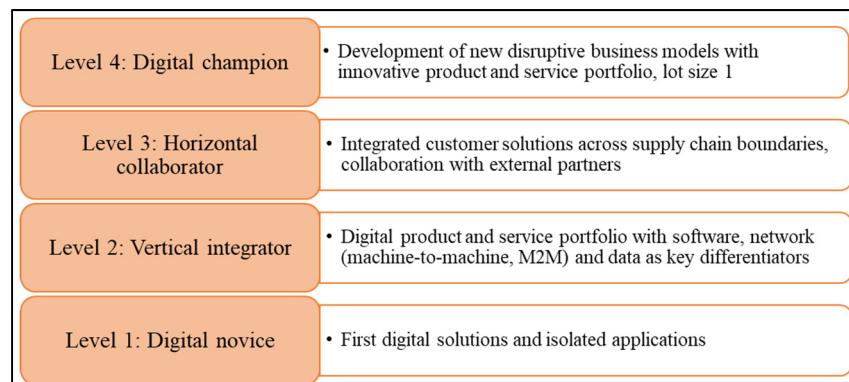


Figure 1.4 Définitions des niveaux de maturité pour la dimension « Digital business models and customer access » du modèle PwC, adaptée de Geissbauer et al. (2016, p. 28)

En plus de définir des dimensions et des niveaux de maturité, le modèle proposé par Mittal, Romero, & Wuest (2018a) introduit la notion de « Toolkit » (boîte à outils). Dans leur modèle, ils ont défini 7 boîtes à outils : « manufacturing/fabrication toolbox », « design and simulation toolbox », « robotics and automation », « sensors and connectivity toolbox », « cloud/storage toolbox », « data analytics toolbox » et « business management toolbox ».

Chacune d'entre elles identifie les pratiques et les outils à mettre en place pour guider la transformation d'une entreprise reliant les dimensions aux différents niveaux de maturité (Tableau 1.3).

Tableau 1.3 Définition d'une boîte à outils (« cloud/storage ») du modèle SM³E,
adapté de Mittal et al. (2018a, p. 161)

Dimension	Maturity levels				
	Novice	Beginner	Learner	Intermediate	Expert
Finance	Store financial data using spreadsheets	Store financial data using hard drives	Store financial data using shared hard drives	Store financial data using cloud	Store financial data using fog
People	Store people's data using spreadsheets	Store people's data using hard drives	Store people's data using shared hard drives	Store people's data using cloud	Store people's data using fog
Strategy	-	-	-	-	-
Process	Store process data using spreadsheets	Store process data using hard drives	Store process data using shared hard drives	Store process data using cloud	Store process data using fog
Product	Store product data using spreadsheets	Store product data using hard drives	Store product data using shared hard drives	Store product data using cloud	Store product data using fog

Ainsi, chaque entreprise obtient une **note globale à la fin de chaque évaluation**. Il s'agit de la combinaison des notes obtenues pour chaque dimension du modèle de maturité. Ainsi, les entreprises connaissent leurs points forts et leurs points faibles pour chacune des dimensions.

Le système de notation n'est pas le même pour tous les modèles. Schumacher et al. (2016) utilisent une formule basée sur les réponses des entreprises et des poids prédéfinis par des experts pour chaque KPI. Pour certains modèles, il s'agit simplement de la moyenne ou d'une somme des résultats (Gill & VanBoskirk, 2016). Enfin, le modèle IMPULS présente un système de notation plus complexe. En effet, les réponses aux questions ne correspondant pas à un niveau de maturité, il n'est pas possible de connaître la méthode employée pour donner la note à la fin de l'évaluation.

Les résultats sont généralement présentés sous la forme d'un diagramme radar pour les modèles de maturité numérique possédant un outil d'auto-évaluation (Figure 1.5). La note attribuée pour chacune des dimensions est parfois accompagnée d'un commentaire générique (modèle de PricewaterhouseCoopers, 2015, par exemple).

L'objectif que se fixe une entreprise est, en général, supérieur à son état actuel. Dans le modèle de PwC, chacune des dimensions est accompagnée d'une note qualifiant la maturité actuelle et l'objectif visé. Pour les autres modèles, il suffit de lire la description du niveau de maturité supérieur de chacune des dimensions pour poursuivre sa transformation et atteindre le niveau de maturité visé. Certains organismes calculent une note globale reflétant le niveau de maturité de l'entreprise. Les résultats des participants sont enregistrés pour pouvoir positionner les entreprises qui répondent aux questionnaires a posteriori par rapport à celles qui l'ont déjà fait.

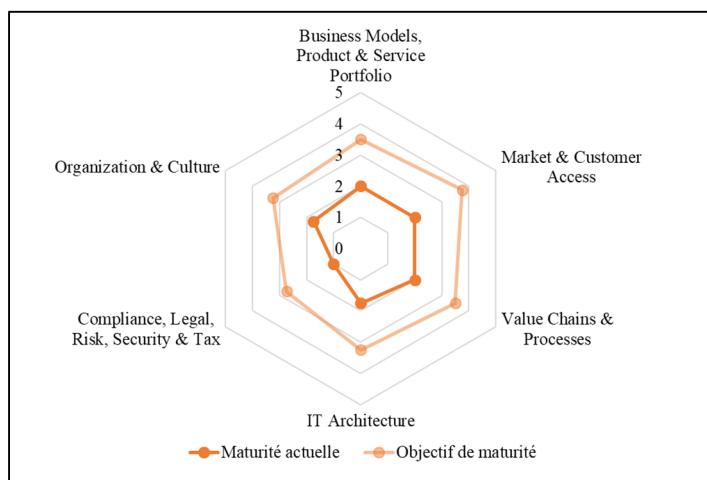


Figure 1.5 Exemple de résultats à la fin du questionnaire de PwC, adaptée de l'outil d'auto-évaluation en ligne PricewaterhouseCoopers (2015)

De plus, certains modèles de maturité numérique se livrent à un commentaire global pour donner suite à l'évaluation de la maturité numérique d'une entreprise. Il correspond à la moyenne des notes ou à la plus petite note obtenue dans une dimension. Ainsi, dans

l'exemple proposé sur la Figure 1.5, l'entreprise est considérée globalement « Digital novice », c'est-à-dire comme une entreprise qui débute sa transformation numérique.

L'objectif de l'évaluation de la maturité numérique des entreprises est de les aider dans leur transformation numérique. Westerman, Bonnet, & McAfee (2014) indiquent que pour devenir un « Digital Master », les entreprises doivent se distinguer sur leur capacité à investir dans de nouvelles technologies, mais également sur leur capacité à gérer la transformation de leur entreprise. Westerman et al. (2014) montrent que les entreprises, qui maîtrisent les deux **capacités d'investissement** (« digital capabilities ») et **de gestion** (« leadership capabilities »), ont généralement des profits plus élevés que leurs concurrents. Cependant, **tous les modèles ne sont pas adaptés pour mener une évaluation complète** de la maturité numérique (Schwer et al., 2018). Dans leur analyse, Schwer et al. (2018) ont identifié 147 KPI dont une grande majorité se concentrait sur les aspects stratégiques de l'entreprise plutôt que sur les technologies.

1.4 Méthodologies permettant la création d'un modèle de maturité

Dans l'objectif de créer une liste de KPI évaluant la maturité numérique d'une entreprise, une revue de littérature de quelques méthodes permettant l'élaboration d'un modèle de maturité est proposée dans cette section.

Tous les modèles de maturité publiés dans les articles scientifiques ne montrent pas leur méthodologie. Cependant, il est possible d'identifier des approches qui nécessitent une revue de littérature, des comparaisons, la consultation d'experts et des prises de décisions.

1.4.1 Développement des modèles de maturité

Plusieurs auteurs proposent dans la littérature une méthodologie à suivre pour concevoir un modèle de maturité.

Ainsi, dans l'article de Becker, Knackstedt, & Pöppelbuß (2009), une méthodologie, basée sur 8 règles (présentées ci-dessous) et divisée en plusieurs étapes, permet la réalisation d'un modèle de maturité. Les auteurs se sont inspirés du travail de Hevner, March, Park, & Ram (2004).

Les règles énoncées dans l'article de Becker et al. (2009) sont les suivantes :

- Règle 1 → « Comparison with existing maturity models »,
- Règle 2 → « Iterative Procedure »,
- Règle 3 → « Evaluation »,
- Règle 4 → « Multi-methodological Procedure »,
- Règle 5 → « Identification of Problem Relevance »,
- Règle 6 → « Problem Definition »,
- Règle 7 → « Targeted Presentation of Results »,
- Règle 8 → « Scientific Documentation ».

Ensuite, Becker et al. (2009) proposent une méthodologie à suivre pour développer un modèle de maturité et valider le résultat, qui prend en compte leur règle. L'objectif est de s'assurer que le modèle est utile et adapté au public visé par l'étude. Becker et al. (2009) détaillent chacune des étapes de la revue de littérature à la publication du modèle de maturité, incluant également la justification de la création d'un nouveau modèle, la comparaison des modèles existants et les étapes pour développer, évaluer et divulguer le nouveau modèle de maturité. En fonction de l'utilité et de la pertinence du modèle, les auteurs peuvent, à la fin, décider de développer un nouveau modèle, revoir la définition du public visé ou la méthode d'évaluation des résultats, ou encore de mettre fin au projet.

D'ailleurs, deux modèles de maturité numérique, celui de Schumacher et al. (2016) et de Scrémin et al. (2018), font référence à cet article et utilisent cette méthodologie pour construire leur modèle de maturité. Wendler (2012) identifie également cette méthodologie et attache une importance particulière à 2 règles. Premièrement, après avoir développé un modèle de maturité, il faut prévoir une étape de mise en pratique du modèle. L'objectif de

cette étape est d'évaluer son utilité et son efficacité. Deuxièmement, une méthode de recherche doit être mise en place pour évaluer l'utilité du modèle de maturité. Il s'agit des règles 3 « Evaluation » et 4 « Multi-methodological Procedure » de Becker et al. (2009).

Un autre article conceptualise le développement d'un modèle de maturité de manière empirique. En effet, Rossmann (2018) construit un modèle de maturité à la suite de plusieurs études et sondages. Ce cadre de travail lui a permis de caractériser la maturité numérique en 8 dimensions.

La méthodologie de Rossmann (2018) est constituée d'une étape qualitative et d'une étape quantitative. Ces deux étapes regroupent six études qui sont détaillées par la suite.

Ainsi, Rossmann (2018) commence par étudier qualitativement les données disponibles dans les publications, les rapports et les sites web pour identifier des KPI autour de la maturité numérique (étude 1). Ensuite, par le biais d'interviews, il analyse les perceptions des dirigeants sur la maturité numérique, ce qui lui fournit de nouveaux KPI (étude 2). A cette liste de KPI, il ajoute les résultats d'un sondage qui implique un plus grand nombre de professionnels que l'étude 2 (étude 3). L'étude 4 consiste à réduire la liste de KPI. Pour cela, différents groupes d'experts ont pour but d'analyser l'utilisation des mots, en lien avec la maturité numérique, dans le langage courant, pour décrire l'entreprise et pour mesurer la maturité numérique d'une entreprise. Enfin, au travers de deux études quantitatives, Rossmann (2018) identifie les dimensions qui constituent la structure de son modèle et un système pour mesurer la maturité numérique des entreprises.

Ces deux méthodologies permettent de **développer un modèle de maturité**. Elles reposent toutes les deux sur une analyse de la littérature et notamment la **comparaison des modèles de maturité numérique existants**. De plus, la **présence d'experts et la consultation de professionnels extérieurs** semblent être une obligation pour obtenir un modèle évaluant correctement la maturité d'une entreprise.

Dans leur méthodologie, Becker et al. (2009) montrent les étapes à suivre pour développer un modèle de maturité, mais plusieurs méthodes peuvent être mises en place pour atteindre son objectif. La méthodologie de Rossmann (2018) nécessite de contacter de nombreux experts de la transformation numérique. De plus, l'objectif de ce mémoire est de créer une liste d'indicateurs et non un modèle de maturité complet. Une consultation d'industriels et de consultants est prévue dans les étapes suivantes du projet DIMLA. La méthodologie employée dans ce mémoire s'inspire donc des premières étapes de chacune de ces deux méthodologies, c'est-à-dire une revue de littérature permettant **d'identifier le besoin** (un modèle de maturité englobant tous les aspects de la maturité numérique) **et les indicateurs de maturité numérique** dans les modèles existants.

1.4.2 Méthodes de comparaison des modèles de maturité

Akdil, Ustundag, & Cevikcan (2018) présentent dans leur publication quatre modèles de maturité et les comparent selon les critères suivants : les niveaux de maturité, les dimensions, la portée de l'étude et le type d'évaluation proposé. Ces résultats sont synthétisés dans un tableau et leur permettent de créer leur propre modèle de maturité.

Une comparaison de 15 modèles de maturité est proposée dans l'article de Mittal et al. (2018b). Les auteurs ont mis en place une méthodologie pour comparer les modèles de maturité numérique et identifier leurs lacunes par rapport aux besoins des PME en vue de leur transformation numérique. Une méthodologie en 5 étapes est suivie. Une première étude permet de caractériser les PME manufacturières dans différents pays. Ensuite, une revue de littérature identifie les modèles de maturité existants en utilisant les termes « Smart Manufacturing » et « Roadmap ». Dans les troisième et quatrième étapes, des discussions permettent de comparer et d'évaluer les lacunes des modèles de maturité numérique avec les exigences liées aux PME. Il s'en suit alors une étape de discussion pour définir des ajustements nécessaires qui pourraient aider les PME manufacturières dans leur transformation numérique à partir des manquements dans les modèles de maturité existants.

Certaines approches utilisent un cadre de travail déjà existant pour comparer les modèles de maturité numérique. En effet, Schwer et al. (2018) utilisent l'outil « Archimate 3.0 » développé par The Open Group (2016). Ce cadre de travail est constitué de 6 dimensions (« Strategy layer », « Business layer », « Application layer », « Technology layer », « Physical layer » et « Implementation and Migration layer »).

Schwer et al. (2018) reprennent la méthode de Fink (2004) qui est constituée de 7 étapes pour comparer les modèles de maturité numérique issus de la littérature. Ainsi, Schwer et al. (2018) commencent par définir des questions de recherche. Ensuite, ils sélectionnent des bases de données, comme Scopus, et déterminent les termes utilisés dans les requêtes. Dans ce cas, il faut trouver des mots en lien avec la maturité numérique. Une première sélection d'articles est effectuée à partir des titres et des résumés. Une deuxième étape de sélection leur permet d'éliminer les articles qui ne détaillent pas les KPI pour la transformation numérique. Avec les articles restants, Schwer et al. (2018) identifient les KPI en lien avec la maturité numérique. Enfin, la dernière étape consiste à synthétiser les résultats obtenus pendant la recherche. Schwer et al. (2018) classent ainsi tous les indicateurs de maturité numérique dans l'outil « Archimate 3.0 ». Il est alors possible de connaître les différentes portées des modèles de maturité retenus en observant la couverture des dimensions de l'outil « Archimate 3.0 ».

Pour atteindre l'objectif de ce mémoire, une **démarche** doit être mise en place **pour identifier et comparer les KPI** communs entre les modèles de maturité existants, et non pas une comparaison à un niveau plus élevé. En effet, Akdil et al. (2018) et Mittal et al. (2018b) comparent la forme des modèles (comme il a été fait à la sous-section 1.3.2) et le contenu global de chacun des modèles.

L'utilisation d'une structure prédéfinie pour classer les KPI, comme l'ont fait Schwer et al. (2018), peut être une faiblesse, car certains concepts pourraient dépasser le cadre de la structure choisie. La **définition d'une structure flexible**, s'appuyant sur les questions et les réponses de chacun des modèles, permettrait de comparer les concepts relevant de la maturité numérique et d'ajouter facilement de nouveaux concepts provenant d'autres modèles.

1.4.3 Méthodes de prise de décision

Cette sous-section se concentre sur les méthodes disponibles pour tenir compte de l'avis de tous les membres d'un groupe d'experts. Développer un modèle de maturité requiert l'intervention d'experts pour effectuer des choix et établir une liste d'indicateurs de maturité numérique.

1.4.3.1 Définition de poids

Pour le développement de leur modèle de maturité, Samaranayake et al. (2017) utilisent une procédure hiérarchique d'analyse (en anglais « Analytic Hierarchy Process », AHP). Elle permet de quantifier l'importance de chaque dimension en fonction de 4 critères de performance issus de la littérature et de l'opinion des experts (réduction des coûts, flexibilité de la production et des services, stabilité des processus et réduction de la pollution).

La méthode AHP a alors pour but de comparer et de pondérer l'ensemble des dimensions identifiées à l'aide d'experts. Elle montre ainsi que la flexibilité de la production et des services est le critère le plus important.

1.4.3.2 Aide à la décision

Dans sa thèse, Moeuf (2018) met en place la méthode Delphi en utilisant les abaques de Régnier, pour identifier les risques et les opportunités liés à la transformation numérique des PME. Cette méthode repose sur l'identification d'un groupe d'experts représentatif et d'un questionnaire.

La méthode Delphi permet de consulter différents experts simultanément sans qu'il y ait de communication entre eux. Le but est de montrer le consensus entre les experts en évitant qu'un expert, de par son importance, influence la décision des autres. Suite aux premières réponses, le questionnaire évolue pour que les experts puissent nuancer leur réponse (Moeuf, 2018).

Moeuf (2018) complète sa méthode avec les abques de Régnier, car son étude est qualitative et ne permet pas un traitement statistique des réponses. Il s'agit d'une échelle de couleurs pour collecter l'avis des experts sur les affirmations proposées. Cette solution donne un aperçu sur l'ensemble des réponses.

La méthode Delphi-Régnier, comme la méthode AHP, dépend du **groupe d'experts** sélectionné. En effet, il faut faire en sorte que ce groupe soit **le plus représentatif** possible en intégrant des personnes de l'industrie, des universités et également des experts du domaine. De plus, la création de la liste de KPI ne repose pas sur le choix d'un KPI plutôt qu'un autre, mais sur la **synthèse de l'ensemble des KPI** indépendamment de leur importance.

Une autre méthode d'aide à la décision consiste à créer un questionnaire en ligne et à l'adresser aux groupes de personnes concernées. Dans leur étude empirique, Felch et al. (2019) proposent 13 questions dans l'objectif d'évaluer l'utilisation des modèles de maturité par les entreprises. Les réponses correspondent à des niveaux et différentes notes sont calculées pour analyser les réponses des participants. Les auteurs ont alors les connaissances nécessaires pour juger la pertinence d'un modèle et le degré de satisfaction des utilisateurs.

Felch et al. (2019) rapportent que le nombre de personnes ayant répondu à leur questionnaire est trop faible pour tirer des conclusions générales sur les modèles de maturité existants. Ainsi, cette méthode permet d'aider les experts, mais il faut trouver une solution pour valider les résultats lorsque les participants sont peu nombreux ou non représentatifs.

1.5 Synthèse

Les différentes **révolutions industrielles** comportent des similitudes. Elles ont toutes été impulsées par un pays qui possédait une excellente santé économique et dominait le monde. Ces révolutions s'appuient sur la mise en œuvre de **nouvelles technologies**, au sein de l'industrie, qui sont ensuite utilisées dans la société à différentes fins (transport, vie

quotidienne). L'Allemagne, au travers de l'« Industrie 4.0 », souhaite transformer son industrie, en **améliorant sa productivité** par le biais des **technologies numériques**, et maintenir sa position de leader mondial sur les marchés (Kohler & Weisz, 2013).

Il est important pour tous les pays de ne pas prendre de retard dans la mise en œuvre de cette quatrième révolution industrielle, car elle leur permettra de demeurer ou de devenir un acteur majeur à l'échelle internationale. Cette revue de littérature montre que le monde entier se sent concerné par cette transformation numérique du tissu industriel.

L'étude du concept « Industrie 4.0 » a permis de définir les contours de la quatrième révolution industrielle. La **définition de la transformation numérique** et l'**identification des 9 groupes technologiques** permettent de mieux comprendre les aspects possiblement considérés lors de l'évaluation de la maturité numérique des entreprises.

Pour évaluer l'état actuel des entreprises dans leur transformation numérique, des **modèles de maturité** sont développés. Une utilisation répétée de ces modèles montre la **progression de l'entreprise dans cette transformation**. Ces modèles de maturité sont un groupement de questions et de réponses qui évaluent les capacités de l'entreprise et permettent aux auditeurs ou aux entreprises de connaître leur niveau de maturité.

Au travers de ces questionnaires, il est possible d'identifier des indicateurs de maturité numérique, également appelés KPI. Ces derniers ont pour principal objectif de caractériser les processus, les technologies et l'organisation d'une entreprise. Il s'agit d'une étape fondamentale dans l'élaboration d'un modèle de maturité.

L'analyse des modèles d'évaluation de la maturité numérique disponibles dans la littérature, ou obtenus par le biais d'organismes menant des audits, montre qu'ils n'évaluent pas tous les mêmes aspects de l'entreprise. **Ces modèles se concentrent sur une partie des modifications induites par cette volonté de transformation numérique.** L'évaluation peut se focaliser sur l'aspect humain de la quatrième révolution, alors que d'autres ont une

dimension plus technique avec l'évaluation des technologies installées. Toutefois, l'**agrégation de tous ces modèles** de maturité numérique devrait permettre une **évaluation plus complète de la maturité numérique** d'une entreprise.

De surcroît, chaque modèle propose son propre découpage en dimensions et sous-dimensions. Les questions des différents modèles se recouvrent partiellement. Ainsi, pour établir une liste d'indicateurs de la maturité numérique, il faut avant tout **identifier les points communs entre les différentes questions** plutôt que chercher à conserver tel ou tel énoncé des modèles de maturité existants.

Le **développement d'un modèle de maturité** nécessite de suivre une méthodologie. L'étude de la littérature montre qu'il peut s'agir d'un **processus long** et suggère qu'il faille justifier les choix effectués à chaque étape. Dans les méthodologies étudiées, plusieurs étapes semblent obligatoires pour créer un modèle de maturité.

Premièrement, une **revue de la littérature** permet d'identifier les modèles de maturité existants. Deuxièmement, une **comparaison des modèles retenus** doit servir de base au nouveau modèle.

Enfin, le développement d'un modèle de maturité requiert l'**avis de différents experts** et doit être testé pour assurer sa validité. L'établissement d'une méthodologie et une application rigoureuse sont nécessaires pour montrer la validité du résultat obtenu.

Ainsi, une **comparaison des modèles au niveau des KPI** doit être effectuée et permettre l'émergence d'une structure regroupant tous les concepts observés. Cette démarche se distingue de celle qui utilise une structure existante pour classer les KPI identifiés dans la littérature. Cette démarche de comparaison doit également permettre **une intégration facile de nouveaux modèles et une large couverture de la littérature**. Pour considérer tous les concepts observés et créer une liste synthétique de KPI, une discussion entre experts semble inévitable pour prendre en compte les spécificités de chacun des modèles retenus.

Cette revue de littérature a permis d'étudier la transformation numérique en cours dans les entreprises et les modèles d'évaluation actuellement disponibles. Le chapitre 2 présente la méthodologie, prenant en compte les règles de Becker et al. (2009) et la méthode suivie par Schwer et al. (2018), créée et mise en place pour répondre à l'objectif principal : créer un ensemble d'indicateurs de maturité numérique des entreprises à partir des modèles d'évaluation de la maturité numérique libres d'accès dans la littérature et les outils d'audit fournit par divers organismes.

CHAPITRE 2

PRÉSENTATION GÉNÉRALE DE LA MÉTHODOLOGIE DE RECHERCHE

La méthodologie de recherche initialement envisagée prévoyait de rassembler, dans un premier temps, les KPI de la littérature en lien avec l'évaluation de la maturité numérique. Ensuite, il restait à constituer une liste de KPI à partir des modèles d'évaluation de la maturité numérique, en choisissant les KPI les plus pertinents, c'est-à-dire ceux qui se concentrent sur la maturité numérique.

Dans le chapitre de revue de littérature (chapitre 1), plusieurs modèles de maturité ont été identifiés (annexe III). La méthodologie envisagée a alors évolué et la tâche s'est avérée plus complexe qu'une simple collection de KPI. En effet, la revue de littérature a révélé que la plupart des modèles de maturité proposent des jeux de questions et de réponses, mais peu de KPI. De surcroît, les questions de chaque modèle ne se recouvrent pas parfaitement. En effet, chaque modèle possède une approche différente et la portée des évaluations diffère.

Ainsi, le travail ne se limite pas au choix de plusieurs KPI parmi les modèles de maturité identifiés. Pour atteindre l'objectif principal et les objectifs spécifiques, une méthodologie de recherche a été adoptée et une présentation générale est proposée dans ce chapitre. Le chapitre 3 présentera les détails de la démarche adoptée.

2.1 Choix relatifs à la méthodologie

Ce chapitre définit d'abord un cadre de travail pour comparer les modèles de maturité numérique présentés dans la revue de littérature. Cette méthodologie doit mener les experts à rédiger des KPI à partir des modèles retenus et à identifier les KPI similaires entre les modèles qui évaluent l'avancement d'une entreprise dans sa transformation numérique. Les KPI issus de ces modèles de maturité existants seront repérés par l'expression « **KPI de la littérature** », bien que ces modèles proviennent de différentes sources : de la littérature

scientifique, en ligne ou encore des organismes réalisant des audits. Dans la plupart des cas, ces KPI n'étaient pas formalisés, et une étape d'explicitation a donc été nécessaire.

Par la suite, une démarche de synthèse permet de regrouper les KPI de la littérature autour de concepts qui auront été distingués au travers des modèles de maturité pendant l'étape de comparaison. Chacun de ces groupes de KPI de la littérature fait l'objet d'une synthèse qui aboutit à la rédaction d'un ou plusieurs nouveaux KPI. Pour les distinguer des « KPI de la littérature », ces nouveaux KPI seront notés **KPI CAN**.

L'ensemble des étapes de comparaison et de synthèse des KPI de la littérature permet d'atteindre l'objectif principal de cette recherche.

Cette comparaison et cette synthèse sont effectuées au niveau des KPI. Dans ce mémoire, les KPI sont considérés comme le plus petit dénominateur commun permettant la comparaison des modèles de maturité. Il s'agit du niveau de comparaison le plus abordable pour limiter le biais subjectif pendant l'étude des modèles de maturité numérique, la plupart des questions pouvant être assimilées à des KPI. En effet, une comparaison au niveau des dimensions ou des sous-dimensions paraît très difficile, le contenu de chaque modèle étant très différent (observation résultant de la revue de littérature). De plus, cette étude serait de trop haut niveau pour identifier les concepts similaires entre chaque modèle. Une analyse au niveau des questions et des réponses ne semble pas pertinente, car le degré de finesse entre chaque modèle n'est pas le même.

2.2 Démarche méthodologique

La méthodologie de recherche suivie dans ce mémoire est représentée en Figure 2.1. Le début de cette méthodologie consiste à identifier les modèles de maturité numérique disponibles, par une revue de littérature. Ensuite, la méthodologie se compose de 3 étapes : la sélection des modèles de maturité pour l'étude, la comparaison de ces modèles et la synthèse des KPI de la littérature évaluant la maturité numérique. La fin de cette méthodologie est

marquée par la création de la liste de KPI CAN, reprenant tous les concepts identifiés dans les modèles de maturité numérique retenus pour l'étude.

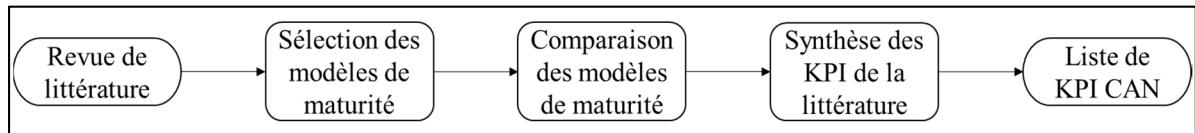


Figure 2.1 Principales étapes de la méthodologie de recherche proposée

2.2.1 Sélection des modèles de maturité numérique

La revue de littérature a permis d'identifier de nombreux modèles évaluant la maturité numérique (annexe III). Une première étape de la méthodologie de recherche consiste à décider lesquels de ces modèles sont les plus pertinents pour atteindre l'objectif de la recherche et doivent être retenus.

En effet, certains de ces modèles de maturité ne sont pas présentés dans leur intégralité par leurs auteurs. Certaines publications se concentrent sur la présentation de la méthode employée pour le développement d'un modèle et la définition de sa structure. Dans plusieurs cas, les auteurs des modèles de maturité numérique ne partagent pas la liste des KPI qui leur a permis d'élaborer la structure, ni les questions et les réponses du modèle. En ce sens, si l'accès aux KPI, ou aux questions et aux réponses permettant d'extraire les KPI d'un modèle n'est pas disponible, il sera alors impossible d'exploiter ces modèles.

Ainsi, pour qu'un modèle de maturité numérique soit retenu, il faut que la liste des questions et les réponses soient accessibles.

2.2.2 Comparaison des modèles de maturité numérique

Dans un premier temps, les experts doivent dresser la liste des questions et des réponses pour chaque modèle de maturité retenu précédemment. Ces ensembles de questions et réponses sont transformés en KPI. Cette étape peut s'apparenter à un processus de rétro-ingénierie,

puisque il s'agit de retrouver les KPI qui sous-tendent les questions et les réponses analysées. Ensuite, les KPI sont comparés deux à deux pour établir des correspondances.

Cette comparaison a nécessité le **développement de deux méthodes**. La première est une méthode dite « **manuelle** » qui implique la présence d'experts pour lire et comparer les KPI de la littérature. La deuxième est une méthode dite « **semi-automatique** » qui requiert la définition de mots-clés représentant les concepts manipulés par chaque KPI de la littérature, pour permettre une comparaison automatique.

Ces deux méthodes de comparaison sont, tout d'abord, testées avec deux modèles. Une étape de comparaison et d'ajustement des résultats, obtenus à partir des deux méthodes, permet ensuite de valider et **généraliser la méthode semi-automatique** à l'ensemble des modèles retenus pour l'étude.

2.2.3 Synthèse des KPI de la littérature

La comparaison des modèles avec les deux méthodes, manuelle ou semi-automatique, conduit à l'identification des similarités et des différences entre les modèles de maturité. Des indicateurs statistiques sont définis pour déterminer les contributions de chaque modèle, analyser les correspondances et faciliter la synthèse des KPI de la littérature. À l'aide des mots-clés utilisés avec la méthode semi-automatique, les experts peuvent regrouper les KPI de la littérature qui s'intéressent aux mêmes concepts. Ces concepts sont regroupés en dimensions et sous-dimensions découlant de l'étude des modèles de maturité numérique.

La synthèse de l'ensemble des sous-dimensions, permettant de créer des groupes de KPI de la littérature, aboutit à la **rédaction des KPI CAN** pour chacune des sous-dimensions. Ces nouveaux KPI doivent contenir les informations pertinentes extraites des modèles de maturité retenus. L'analyse et la synthèse de l'ensemble des sous-dimensions mènent à l'obtention de la liste de KPI CAN désirée.

2.2.4 Validation

Lors de la comparaison des modèles, une étape d'ajustement de la méthode semi-automatique permet de la valider à partir du résultat de la comparaison manuelle qui s'appuie sur le travail d'experts. Un **suivi régulier** des actions menées par les experts, au travers d'**indicateurs statistiques**, a été mis en place pour s'assurer que tous les concepts associés à la maturité numérique sont considérés dans la liste de KPI CAN finale. De plus, une comparaison avec la liste de KPI établie par l'équipe allemande du projet DIMLA permet de montrer les similarités entre les deux listes de KPI, bien que les méthodes employées soient différentes, et donc de valider le résultat obtenu et présenté dans ce mémoire.

Cependant, la validation de la liste de KPI auprès des entreprises ne fait pas partie de ce projet. En effet, ce projet est une partie du projet international DIMLA. Ainsi, l'objectif des partenaires universitaires est de fournir une liste de KPI évaluant la maturité numérique des entreprises (Figure 0.1). Cette liste sera utilisée par la suite pour rédiger des questions et des réponses du modèle de maturité souhaité par des consultants et d'autres experts provenant des PME supportant le projet DIMLA.

Le modèle de maturité numérique résultant sera éventuellement testé dans quelques PME allemandes et québécoises pour corriger et valider les différents KPI et niveaux de maturité.

2.2.5 Ressources de l'étude

Cette méthode requiert l'utilisation d'un logiciel pour enregistrer les KPI de la littérature, les mots-clés et les résultats de la comparaison des modèles de maturité retenus, le traitement effectué par les experts et automatiser la comparaison des KPI. Le logiciel Microsoft Excel a été retenu pour sa facilité d'utilisation et son module Visual Basic for Applications (VBA) pour le développement des codes et des interfaces en lien avec la méthodologie.

De plus, cette méthodologie nécessite l'**implication de plusieurs experts** pour obtenir différents points de vue et les confronter. Pour assurer la validité de la liste de KPI CAN,

toutes les étapes de la méthodologie doivent être réalisées et validées par au moins trois experts du domaine de la transformation numérique et/ou de l'évaluation de la maturité.

Les chapitres suivants détaillent les grandes étapes de cette méthodologie, en commençant par l'étape de comparaison.

CHAPITRE 3

DÉMARCHE DE COMPARAISON DES MODÈLES DE MATURITÉ ET DE SYNTHÈSE DES INDICATEURS DE MATURITÉ NUMÉRIQUE DE LA LITTÉRATURE

Le chapitre 2 présentait l'ensemble de la méthodologie. À présent, ce chapitre se concentre sur les étapes de comparaison et de synthèse des données collectées dans les modèles de maturité numérique et les méthodes permettant d'y parvenir.

La première section de ce chapitre s'attache à présenter les notations utilisées par la suite. Ensuite, une première méthode de comparaison, dite « manuelle », est décrite. La mise en œuvre de cette méthode et le temps nécessaire pour comparer deux modèles de maturité ont mené à la définition d'une deuxième méthode de comparaison, dite « semi-automatique », présentée ensuite. Pour valider le résultat de cette nouvelle méthode, une étape d'ajustement de la méthode semi-automatique avec la méthode manuelle permet de généraliser son usage à l'ensemble des modèles de maturité retenus. Enfin, une description de la démarche de synthèse des KPI de la littérature, avec les mots-clés et les indicateurs statistiques, montre les étapes pour obtenir la liste d'indicateurs de maturité numérique souhaitée.

3.1 Notations

Pour présenter les méthodes de comparaison et de synthèse, plusieurs notations sont introduites. Cette méthodologie permet de comparer $N_{\mathcal{M}}$ modèles de maturité numérique qui sont notés \mathcal{M}^i (avec $i \in [1..N_{\mathcal{M}}]$). Pour chaque modèle de maturité \mathcal{M}^i , le nombre n_j^i de KPI de la littérature, notés \mathcal{I}_j^i (avec $j \in [1..n_j^i]$), correspond au nombre de KPI rédigés. Ces KPI de la littérature constituent des listes pour chacun des modèles étudiés :

$$\mathcal{L}^i = [\mathcal{I}_1^i \dots \mathcal{I}_{n_j^i}^i], \quad (3.1)$$

avec $n_j^i \geq 1$.

L'ensemble des KPI repérés dans tous les modèles de maturité retenus est alors noté N_J . Enfin, les résultats obtenus à la suite des échanges entre les experts sont placés dans une matrice de comparaison. Ces matrices sont notées $MMmat^{i_1, i_2}$, lorsque la méthode manuelle est employée, et $MSAmat^{i_1, i_2}$, lorsque la méthode semi-automatique est utilisée (pour la comparaison des modèles de maturité \mathcal{M}^{i_1} et \mathcal{M}^{i_2} , avec $(i_1, i_2) \in [1..N_{\mathcal{M}}]^2$).

Pour analyser le résultat issu de la comparaison des modèles de maturité numérique, des indicateurs statistiques sont introduits dans ce chapitre et sont repérés à l'aide de la notation suivante $\mathcal{X}_{indice}^{exposant}$ avec en indice le nom de l'indicateur statistique et en exposant les modèles qui sont visés.

3.2 Première méthode de comparaison des KPI de la littérature (méthode « manuelle »)

Dans un premier temps, une méthode dite « manuelle » a été développée. Ainsi, les experts comparent chaque KPI de la littérature deux à deux à partir de deux modèles de maturité, \mathcal{M}^1 et \mathcal{M}^2 . Cette méthode se compose de trois étapes comme il est illustré sur la Figure 3.1.

Cette méthode de comparaison manuelle a été l'objet d'un article de conférence internationale. Il présente la première méthode qui a été conçue pour comparer les modèles de maturité IMPULS et PwC (Cognet et al., 2019). Ainsi, cette section reprend la méthode présentée dans cet article.

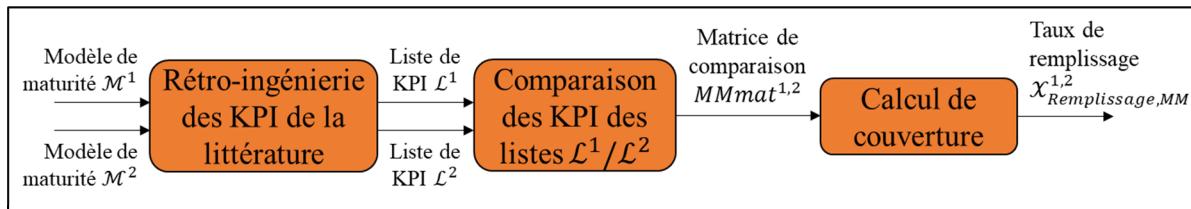


Figure 3.1 Méthode de comparaison manuelle pour deux modèles de maturité \mathcal{M}^1 et \mathcal{M}^2

La première étape consiste à identifier et à rédiger des KPI à l'aide des questions et réponses évaluant la maturité. Cette étape se résume à une rétro-ingénierie des questionnaires pour obtenir 2 listes de KPI de maturité numérique \mathcal{L}^1 et \mathcal{L}^2 . Ensuite, l'étape de comparaison permet d'identifier les correspondances entre ces deux listes. Les résultats sont placés dans une matrice de comparaison, $MMmat^{1,2}$. Une troisième étape est une analyse de cette matrice au travers de l'indicateur statistique, $\chi_{Remplissage,MM}^{1,2}$, qui correspond au comptage des éléments non nuls de la matrice de comparaison. Ainsi, il est possible de quantifier la couverture d'un modèle sur un autre, c'est-à-dire d'observer le nombre de concepts que deux modèles de maturité numérique ont en commun.

3.2.1 Rédaction des KPI de la littérature

L'étape de rétro-ingénierie permet de rédiger les KPI employés par les modèles de maturité retenus. Elle est nécessaire, car, pour la plupart des modèles, les indicateurs de maturité numérique sont exprimés sous forme de questions et réponses pour évaluer directement la maturité des entreprises. Il est donc indispensable de **transformer ces questions et réponses en KPI de la littérature**.

Cette étape vise à extraire et expliciter les KPI qui ont permis l'élaboration d'un modèle de maturité. Cette identification s'appuie sur toutes les données disponibles pour le modèle de maturité. Il est possible de trouver des articles de journaux, des rapports, des questionnaires ou encore des outils d'auto-évaluation. Les KPI rédigés sont le résultat d'échanges entre les experts qui s'accordent sur la signification de chaque question du modèle de maturité étudiée. Au cours de ce travail, il est demandé aux experts de se concentrer uniquement sur les données explicites et d'éviter les interprétations possibles. L'objectif est de réduire le biais subjectif dû aux interprétations qui éloignerait le sens du KPI de celui de la question d'origine.

Pendant cette étape, les experts doivent veiller à ce que les **KPI de la littérature soient « autonomes »** et incluent tous les concepts nécessaires à leur compréhension sans avoir à se

référer au contexte où apparaît la question posée (la dimension et la sous-dimension du modèle de maturité). En effet, dans l'objectif d'un gain de temps, il est nécessaire que les KPI concentrent toutes les informations utiles pour que les experts n'aient pas à revoir la source originelle.

Ainsi, lors de la comparaison de deux modèles de maturité \mathcal{M}^1 et \mathcal{M}^2 , deux listes de KPI de la littérature, \mathcal{L}^1 et \mathcal{L}^2 contenant respectivement n_j^1 et n_j^2 KPI, sont employées.

3.2.2 Méthode de comparaison manuelle des KPI de la littérature

Après avoir converti l'ensemble des questions et des réponses disponibles, dans les deux modèles de maturité retenus, en KPI, les experts doivent **comparer les KPI de la littérature**, deux à deux, et **identifier les similarités**. Ainsi, pour caractériser la correspondance entre deux KPI de la littérature, une échelle à trois niveaux a été définie :

- correspondance forte,
- correspondance partielle,
- pas de correspondance.

Une correspondance forte est attribuée entre deux KPI de la littérature lorsque les experts considèrent que les concepts exposés dans les KPI sont similaires, c'est-à-dire que les deux KPI évaluent globalement le même concept. À l'inverse, certains couples de KPI de la littérature ne présentent aucune similarité, les experts considèrent alors qu'il n'y a pas de correspondance. Entre ces deux niveaux, les experts peuvent définir une correspondance partielle pour un couple de KPI de la littérature. En effet, dans certains cas, les KPI présentent des similarités, mais aussi des différences.

Pour être rigoureux, les experts doivent, tout d'abord, prendre tous les KPI d'un premier modèle un à un et les comparer avec toute la liste du deuxième modèle. Une fois cette étape terminée, il faut s'assurer qu'en réalisant le processus inverse le même résultat est obtenu pour s'affranchir d'un biais induit par une liste de KPI de la littérature. Enfin, les résultats

sont placés dans la matrice de comparaison $MMmat^{1,2}$, correspondant à la comparaison du modèle \mathcal{M}^1 avec le modèle \mathcal{M}^2 , avec un code couleur. Ainsi, chaque élément de la matrice permet de caractériser le niveau de correspondance de deux KPI $\mathcal{I}_{j_1}^1$ et $\mathcal{I}_{j_2}^2$, et répond à la fonction $\mathcal{F}_{MM}(\mathcal{I}_{j_1}^1, \mathcal{I}_{j_2}^2)$ suivante :

$$\mathcal{F}_{MM}(\mathcal{I}_{j_1}^1, \mathcal{I}_{j_2}^2) = \begin{cases} \text{vert si } \mathcal{I}_{j_1}^1 \text{ et } \mathcal{I}_{j_2}^2 \text{ ont une correspondance forte} \\ \text{jaune si } \mathcal{I}_{j_1}^1 \text{ et } \mathcal{I}_{j_2}^2 \text{ ont une correspondance partielle,} \\ \text{blanc s'il n'y a pas de correspondance} \end{cases} \quad (3.2)$$

avec $j_1 \in [1..n_J^1]$ et $j_2 \in [1..n_J^2]$.

Pour l'attribution de l'un des trois niveaux de l'échelle de correspondance, les experts fonctionnent de la manière suivante. Premièrement, chaque expert lit individuellement les KPI d'un modèle et identifie des correspondances potentielles avec les KPI appartenant au deuxième modèle. Dans une seconde phase, les experts proposent les correspondances auxquelles ils ont abouti et échangent leur avis, lorsqu'il y a des divergences. Les experts s'accordent afin d'obtenir un consensus qui peut être basé sur la majorité.

3.2.3 Taux de remplissage : premier indicateur statistique pour analyser le résultat de la comparaison

Les discussions entre les experts permettent d'obtenir la matrice de comparaison $MMmat^{1,2}$. Pour caractériser cette matrice, un taux de remplissage $\mathcal{X}_{Remplissage,MM}^{1,2}$ est calculé. Il permet de compter le nombre de couples de KPI pour lesquels les experts ont identifié une correspondance forte ou partielle.

Ainsi, l'indicateur statistique $\mathcal{X}_{Remplissage,MM}^{1,2}$ mesure le remplissage de la matrice $MMmat^{1,2}$ qui contient les résultats de la comparaison des modèles \mathcal{M}^1 et \mathcal{M}^2 . De plus, cet indicateur statistique est exprimé en pourcentage et est symétrique. En effet, les taux de remplissage $\mathcal{X}_{Remplissage,MM}^{1,2}$ et $\mathcal{X}_{Remplissage,MM}^{2,1}$ sont égaux.

Pour le calculer, il faut compter le nombre d'éléments colorés dans la matrice et le diviser par le nombre total d'éléments dans la matrice :

$$\chi_{\text{Remplissage,MM}}^{1,2} = \frac{\sum_{j_1=1}^{n_j^1} \sum_{j_2=1}^{n_j^2} 1 \text{ si } MMmat^{1,2}(j_1^1, j_2^2) \neq \text{blanc}}{n_j^1 * n_j^2} \quad (3.3)$$

3.2.4 Bilan

Cette méthode de comparaison nécessite de **mobiliser des ressources multiples**. En effet, dans l'objectif d'obtenir un résultat valide, il faut réunir plusieurs experts dans le domaine de l'évaluation de la maturité ainsi que sur la transformation numérique. De plus, le fait d'évaluer chaque couple de KPI de la littérature manuellement prend beaucoup de temps. La comparaison de deux modèles de maturité numérique, IMPULS et PwC, mène à l'obtention d'une matrice $MMmat^{IMP,PWC}$ qui a un taux de remplissage $\chi_{\text{Remplissage,MM}}^{IMP,PWC}$ de 6 %. Ainsi, le **nombre de correspondances est relativement faible** entre ces deux modèles de maturité et une élimination automatique des couples de KPI de la littérature sans correspondances permettrait de sauver du temps lors de la comparaison des KPI de la littérature.

Dans l'objectif de **réduire le travail manuel** de comparaison des modèles et de limiter le biais subjectif engendré par les décisions des experts, une **méthode semi-automatique** est mise en place pour comparer les modèles de maturité \mathcal{M}^1 et \mathcal{M}^2 .

Cette méthode semi-automatique doit permettre aux experts d'étudier et de comparer deux modèles. Le résultat de la comparaison manuelle ($MMmat^{1,2}$) servira de référence pour ajuster la méthode de comparaison semi-automatique.

3.3 Deuxième méthode de comparaison des KPI de la littérature (méthode « semi-automatique »)

Cette deuxième méthode de comparaison, dite « semi-automatique », permet d'identifier semi-automatiquement les KPI de la littérature qui traitent d'un même concept. Cette méthode est plus rapide (introduction d'une comparaison automatique) et permet de combiner tous les modèles de maturité à la fois.

Lors du premier essai de la méthode manuelle, les experts se concentraient, en général, sur les mots les plus importants de chaque KPI pour les comparer. Pour donner suite à cette observation, une méthode semi-automatique a été mise en place. La Figure 3.2 donne un aperçu de cette seconde méthode pour les modèles \mathcal{M}^1 et \mathcal{M}^2 .

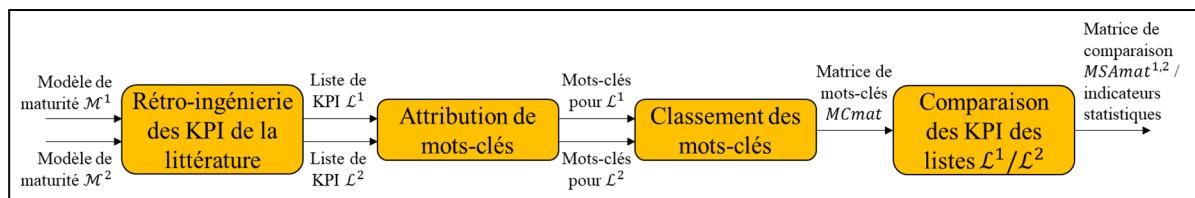


Figure 3.2 Méthode de comparaison semi-automatique pour deux modèles de maturité \mathcal{M}^1 et \mathcal{M}^2

Cette méthode reprend la première étape de rétro-ingénierie de la méthode de comparaison manuelle. Ensuite, elle repose sur une définition de mots-clés pour chaque KPI des listes \mathcal{L}^1 et \mathcal{L}^2 . Ces mots-clés sont, dans un troisième temps, placés dans une matrice, notée $MCmat$. Une comparaison des listes de KPI \mathcal{L}^1 et \mathcal{L}^2 , à l'aide d'un outil informatique, génère une matrice de comparaison, $MSAmat^{1,2}$, pour les modèles de maturité \mathcal{M}^1 et \mathcal{M}^2 , en s'appuyant sur les mots-clés définis précédemment. De plus, des indicateurs statistiques permettent d'analyser les correspondances entre les KPI de la littérature.

Ainsi, cette étape de comparaison des modèles de maturité ne s'appuie plus directement sur les KPI de la littérature, mais sur des mots-clés qui en expriment les concepts dominants. Ce sont les experts qui choisissent les mots-clés représentant chaque KPI de la littérature.

3.3.1 Attribution des mots-clés

Cette étape intervient pendant que les experts définissent la liste de KPI \mathcal{L}^i pour un modèle de maturité \mathcal{M}^i . Pour chaque KPI \mathcal{J}_j^i , les experts identifient les mots-clés les plus importants, notés $\mathcal{MC}_m^{i,j}$. Cette notation représente le mot-clé m du KPI j appartenant au modèle de maturité i (avec $m \in [1..n_{\mathcal{MC}}^{i,j}]$ et avec $i \in [1,2]$ dans cette section). Le nombre $n_{\mathcal{MC}}^{i,j}$ correspond au nombre de mots-clés pour chaque KPI \mathcal{J}_j^i .

Les experts doivent accorder une grande importance à l'attribution de ces mots-clés, puisque **la comparaison des KPI de la littérature s'appuie sur eux**. Par la suite, les mots-clés permettent de regrouper les KPI de la littérature relatifs à un même concept. Lors de l'attribution des mots-clés, les experts ont le choix entre deux possibilités. La première consiste à reprendre un mot-clé utilisé précédemment pour caractériser un autre KPI de la littérature. La deuxième possibilité est de créer un nouveau mot-clé si aucun des mots-clés utilisés précédemment ne convient.

Lors de cette étape, les experts ne doivent pas introduire une idée qui n'est pas explicite dans l'énoncé du KPI. Pour éviter cette erreur, les experts peuvent s'attacher à reprendre directement comme mots-clés les mots importants de chacune des questions et de ses choix de réponses. Afin de rester fidèles à la formulation du KPI, les experts peuvent utiliser des **mots-clés synonymes**.

3.3.2 Crédation d'une matrice basée sur les mots-clés

Cette étape consiste à regrouper tous les mots-clés $\mathcal{MC}_m^{i,j}$ utilisés pour caractériser l'ensemble des KPI de la littérature. Ces mots-clés sont donc réunis dans la matrice $MCmat$. La suite de l'étude reposera sur cette matrice de mots-clés.

La matrice $MCmat$ est construite de manière simple afin de pouvoir rapprocher les KPI de la littérature ayant une correspondance. Ainsi, chaque ligne de cette matrice contient des mots-

clés appartenant à un même concept. Tous les mots-clés d'une même ligne de la matrice portent donc des significations proches ou similaires.

Pour chaque nouveau mot-clé attribué à un KPI de la littérature, les experts ont le choix entre deux possibilités. Premièrement, les experts peuvent le placer sur une ligne existante, ce mot-clé exprimant une variante d'un concept déjà identifié. Une deuxième possibilité est d'insérer une nouvelle ligne dans la matrice *MCmat*, ce mot-clé traduisant un concept non identifié parmi les KPI de la littérature étudiés précédemment.

Dans la matrice *MCmat*, les mots-clés n'apparaissent qu'une seule fois. En effet, un mot-clé a une seule signification, c'est-à-dire qu'il représente un seul concept, et ne peut, par conséquent, appartenir qu'à une seule ligne. Il s'agit d'une contrainte imposée lors du classement des mots-clés. Ainsi, si un mot-clé devait représenter plus qu'un concept, celui-ci devrait être décomposé en concepts plus élémentaires. Il faut alors éviter de définir des mots-clés au sens trop large, car lors d'une réutilisation ultérieure, ce mot-clé peut désigner un autre concept.

Lors de l'intégration d'un nouveau modèle de maturité ou lors de la relecture de cette matrice avant la synthèse, les experts peuvent être amenés à modifier la place d'un mot-clé dans cette matrice, ou modifier sa formulation. Lorsque cette situation se présente, les experts doivent s'assurer que la nouvelle position du mot-clé dans la matrice *MCmat* corresponde toujours avec son utilisation dans les différents KPI de la littérature auquel ce mot-clé a préalablement été associé. L'objectif est de vérifier que le mot-clé caractérise correctement tous les KPI de la littérature auxquels il est associé.

Lors de la revue de littérature, chaque modèle étudié possédait une structure avec des dimensions et parfois des sous-dimensions. Ainsi, une fois que tous les mots-clés sont placés dans la matrice *MCmat*, les experts donnent un nom à chaque ligne. En effet, **chaque ligne exprime un concept, donc une sous-dimension**. Alors que chaque sous-dimension correspond à un concept, les experts réorganisent ensuite les lignes pour constituer des

groupes contenant plusieurs concepts voisins. **Ces groupes de lignes correspondent alors à des dimensions.** Ainsi, une dimension contient plusieurs sous-dimensions. Ce découpage en dimensions et en sous-dimensions constituera la **structure de la liste d'indicateurs de la maturité numérique** dont la rédaction constitue l'objectif de ce mémoire. En effet, chaque sous-dimension regroupe plusieurs KPI de la littérature, liés à cette sous-dimension par un mot-clé. Lors de la synthèse des KPI de la littérature, les experts auront une liste de KPI de la littérature pour chaque sous-dimension et rédigeront de nouveaux KPI, notés KPI CAN, à partir de ceux identifiés dans les modèles de maturité retenus.

À la fin, la matrice de mots-clés $MCmat$ contient un nombre de mots-clés noté N_{MC} . Par la suite, les dimensions de cette nouvelle structure seront notées \mathcal{D}_k (avec $k \in [1..N_D]$ et N_D le nombre de dimensions). Il en est de même pour les nouvelles sous-dimensions \mathcal{SD}_l^k (avec $l \in [1..n_{\mathcal{SD}}^k]$ et $n_{\mathcal{SD}}^k$ le nombre de sous-dimensions de la dimension k). La matrice $MCmat$ résultante de la comparaison des modèles de maturité est présentée dans l'annexe IV.

3.3.3 Calcul des correspondances des KPI de la littérature

Chaque KPI de la littérature est caractérisé par des mots-clés et ces derniers sont classés dans la matrice $MCmat$. Ainsi, un outil informatique permet de comparer automatiquement les mots-clés de chacun de ces KPI et d'identifier les correspondances entre les KPI de l'ensemble des modèles de maturité retenus. De plus, l'outil donne des groupes de KPI qui possèdent un concept en commun. Cet outil informatique a été développé à l'aide du module VBA disponible avec le logiciel Microsoft Excel.

Pour deux KPI $J_{j_1}^1$ et $J_{j_2}^2$, chaque mot-clé du premier KPI est comparé avec les mots-clés du second KPI, puis l'opération inverse est répétée. Ainsi, pour un mot-clé m_1 du KPI $J_{j_1}^1$, la fonction (3.4) est appliquée :

$$\mathcal{F}_{MC}(\mathcal{MC}_{m_1}^{j_1, j_2}) = \begin{cases} 0 & \text{si le mot-clé est sur la même ligne qu'un autre mot-clé déjà analysé du même KPI } j_1 \\ & 1 & \text{si le même mot-clé est utilisé dans le KPI } j_2 \\ & 1 & \text{si le mot-clé est sur la même ligne qu'un des mots-clés du KPI } j_2 \\ & 0 & \text{si aucune équivalence n'est possible} \end{cases}, \quad (3.4)$$

avec $j_1 \in [1..n_j^1]$, $j_2 \in [1..n_j^2]$.

La fonction $\mathcal{F}_{MC}(\mathcal{MC}_{m_1}^{j_1, j_2})$ est répétée pour chacun des mots-clés des deux KPI. Ensuite, il faut compter le nombre de mots-clés distincts de chaque KPI, noté $n_{MC, distinct}^{i,j}$, c'est-à-dire que si un KPI \mathcal{I}_j^i possède deux mots-clés qui sont sur la même ligne de $MCmat$, alors $n_{MC, distinct}^{i,j} = 1$. Enfin, il faut sommer le résultat obtenu pour chaque mot-clé des deux KPI et diviser par la somme des nombres de mots-clés distincts des KPI.

Pour deux KPI $\mathcal{I}_{j_1}^1$ et $\mathcal{I}_{j_2}^2$, permettant de comparer les KPI du modèle \mathcal{M}^1 avec ceux du modèle \mathcal{M}^2 (Figure 3.2), chaque élément de la matrice $MSAmat$ répond à la fonction suivante :

$$\mathcal{F}_{MSA}(\mathcal{I}_{j_1}^1, \mathcal{I}_{j_2}^2) = \frac{\sum_{m_1=1}^{n_{MC}^{1,j_1}} \mathcal{F}_{MC}(\mathcal{MC}_{m_1}^{j_1, j_2}) + \sum_{m_2=1}^{n_{MC}^{2,j_2}} \mathcal{F}_{MC}(\mathcal{MC}_{m_2}^{j_2, j_1})}{n_{MC, distinct}^{1,j_1} + n_{MC, distinct}^{2,j_2}} * 10, \quad (3.5)$$

avec $j_1 \in [1..n_j^1]$ et $j_2 \in [1..n_j^2]$.

La fonction (3.5) permet d'obtenir un score entre 0 et 10 pour chaque couple de KPI. Les résultats sont arrondis à l'unité. Ainsi, dès que ce score est différent de 0, cela signifie que les deux KPI ont une part de concept en commun. Un exemple de la méthode de calcul de la fonction (3.5) est présenté dans l'annexe V. Pour avoir un aperçu visuel, une échelle de couleur à trois niveaux est appliquée à la matrice de comparaison $MSAmat^{1,2}$:

- blanc lorsque le score est 0 ;
- jaune lorsque le score est compris entre 1 et 9 ;
- vert lorsque le score est de 10.

Cette méthode de comparaison est symétrique. En effet, la matrice de comparaison du modèle \mathcal{M}^2 avec le modèle \mathcal{M}^1 , notée $MSAmat^{2,1}$, correspond à la transposée de $MSAmat^{1,2}$.

La méthode semi-automatique permet alors d'identifier les couples de KPI qui portent sur des concepts communs. Ainsi, les experts se concentrent sur le fait qu'il existe un mot-clé identique ou similaire entre deux KPI de la littérature pour évaluer leur correspondance. Par la suite, l'ensemble des correspondances permettra de regrouper les KPI de la littérature relevant du même concept pour finalement les synthétiser dans un KPI CAN les englobant.

3.3.4 Introduction de nouveaux indicateurs statistiques

L'indicateur statistique montrant le taux de remplissage d'une matrice présenté plus haut pour la méthode de comparaison manuelle est noté $\chi_{Remplissage,MSA}^{1,2}$ pour la méthode semi-automatique. En plus de fournir aux experts le pourcentage de couples de KPI de la littérature qui ont une correspondance, il permet de connaître le pourcentage de couples de KPI de la littérature sans correspondances, et qui ne nécessitent pas d'être analysés par les experts :

$$\chi_{Remplissage,MSA}^{1,2} = \frac{\sum_{j_1=1}^{n_j^1} \sum_{j_2=1}^{n_j^2} 1 \text{ si } MSAmat^{1,2}(J_{j_1}^1, J_{j_2}^2) \neq 0}{n_j^1 * n_j^2} \quad (3.6)$$

Cette méthode semi-automatique a permis d'obtenir une matrice de mot-clé $MCmat$ ainsi qu'un score de correspondance pour chaque couple de KPI de la littérature. Cette matrice permet de structurer le travail en dimensions et en sous-dimensions, qui seront utilisées lors de la synthèse des KPI de la littérature. Ainsi, de nouveaux indicateurs statistiques permettent d'analyser les résultats de la comparaison des modèles de maturité. Il s'agit des indicateurs statistiques suivants :

- la couverture de chaque dimension, $\chi_{Couverture,\mathcal{D}}^{i,k}$ par les modèles de maturité,
- l'appui de chaque sous-dimension, $\chi_{Appui,\mathcal{SD}}^{k,l}$, sur les modèles de maturité.

Ces indicateurs statistiques sont calculés à l'aide des équations présentées ci-dessous et sont intégrés dans un outil VBA qui les calcule automatiquement.

3.3.4.1 Couverture des dimensions par les modèles de maturité

La comparaison des KPI en provenance des modèles de maturité permet de comparer les concepts qui sont abordés par chacun d'entre eux. L'introduction de l'indicateur de couverture $\mathcal{X}_{\text{Couverture}, \mathcal{D}}^{i,k}$ donne le pourcentage de couverture d'un modèle des dimensions définies par les experts. Dans ce mémoire, le terme « **couverture** » représente le nombre de concepts qui peuvent être identifiés dans un modèle.

Dans cette partie, il s'agit d'observer la couverture des modèles retenus en prenant comme base de travail les dimensions \mathcal{D}_k (avec $k \in [1..N_{\mathcal{D}}]$ et $N_{\mathcal{D}}$ le nombre de dimensions) définies par les experts à partir de la matrice $MCmat$ et qui sont le regroupement de plusieurs sous-dimensions. Cet indicateur statistique permet de caractériser les forces et les faiblesses des différents modèles de maturité retenus en montrant les concepts évalués, ou non, par chacun d'eux. Il permet également de comparer les modèles lorsqu'une seule dimension à la fois est considérée.

Ainsi, pour une dimension \mathcal{D}_k et un modèle de maturité \mathcal{M}^i , il faut compter le nombre de sous-dimensions que couvre le modèle \mathcal{M}^i , en observant si un mot-clé de la sous-dimension est utilisé par un KPI \mathcal{I}_j^i de \mathcal{M}^i , et le diviser par le nombre $n_{\mathcal{SD}}^k$ de sous-dimensions dans \mathcal{D}_k :

$$\mathcal{X}_{\text{Couverture}, \mathcal{D}}^{i,k} = \frac{\sum_{l=1}^{n_{\mathcal{SD}}^k} 1 \text{ si } \exists \mathcal{I}_j^i \in \mathcal{M}^i / \exists \mathcal{MC}_m^{i,j} \in \mathcal{SD}_l^k}{n_{\mathcal{SD}}^k}, \quad (3.7)$$

avec $j \in [1..n_j^i]$ et $m \in [1..n_{\mathcal{MC}}^{i,j}]$.

Ce calcul est répété pour chaque dimension et chaque modèle de maturité retenu. L'ensemble des indicateurs statistiques de couverture des dimensions pour un modèle de maturité peut être placé dans un graphique de type « radar ». Ce graphique permet alors d'observer la

couverture des nouvelles dimensions par les modèles de maturité retenus. Les experts peuvent connaître le modèle prépondérant pour chacune des nouvelles dimensions.

3.3.4.2 Appui des sous-dimensions sur les modèles de maturité

Cette partie présente l'indicateur statistique $\mathcal{X}_{Appui,SD}^{k,l}$ montrant l'**appui de chaque sous-dimension** sur les modèles de maturité retenus. Cet indicateur statistique caractérise l'**importance relative d'une sous-dimension par rapport aux autres**, ou d'un concept identifié par les experts, en fonction des modèles de maturité retenus. Il montre alors le nombre de modèles traitant de ce concept. Le résultat de ce calcul est exprimé en pourcentage. Il sera utilisé pour classer les sous-dimensions par ordre d'importance lors de la synthèse des KPI de la littérature (section 3.5).

Pour rappel, une sous-dimension correspond à une ligne de la matrice de mots-clés $MCmat$. Une sous-dimension est notée SD_l^k (avec $l \in [1..n_{SD}^k]$ et n_{SD}^k le nombre de sous-dimensions de la dimension k). Dans un premier temps, il faut identifier tous les modèles de maturité qui possèdent au moins un KPI avec un mot-clé lié à la sous-dimension SD_l^k . Ensuite, il faut diviser ce nombre de modèles par le nombre total de modèles de maturité retenus $N_{\mathcal{M}}$:

$$\mathcal{X}_{Appui,SD}^{k,l} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{\mathcal{M}}} 1 \text{ si } \exists J_j^i \in \mathcal{M}^i / \exists \mathcal{MC}_m^{i,j} \in SD_l^k}{N_{\mathcal{M}}}, \quad (3.8)$$

avec $j \in [1..n_{\mathcal{MC}}^i]$ et $m \in [1..n_{\mathcal{MC}}^{i,j}]$.

Ce calcul est répété pour chacune des sous-dimensions définies par les experts dans la matrice de mots-clés $MCmat$.

3.4 Ajustement et généralisation de la méthode semi-automatique

Pour s'assurer que la méthode de comparaison semi-automatique donne des matrices de comparaison exploitables, une étape d'ajustement de cette méthode s'impose. Ainsi, il faut

que le **résultat final** de la comparaison semi-automatique contienne **au moins toutes les comparaisons obtenues avec la méthode « manuelle »**.

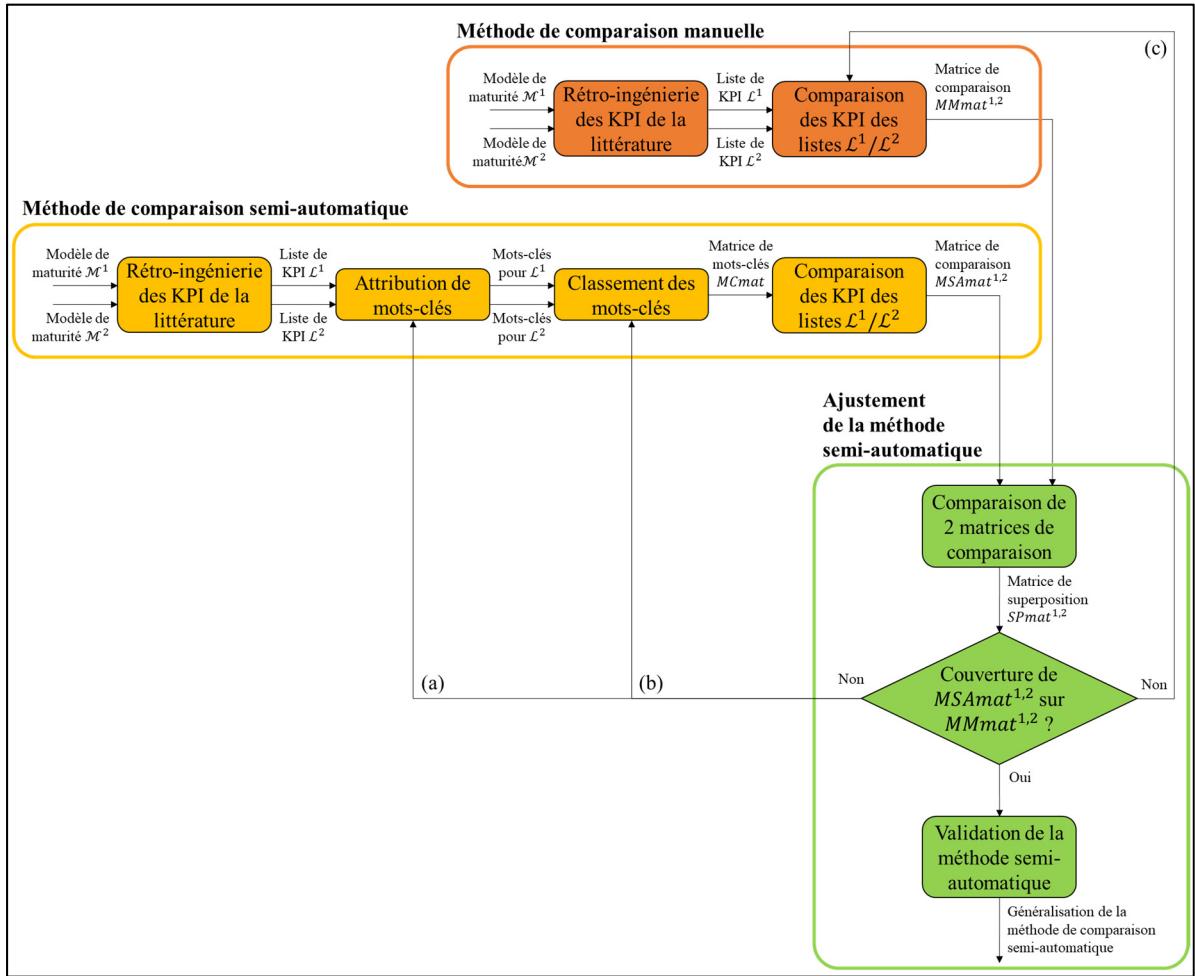


Figure 3.3 Ajustement itératif de la méthode de comparaison semi-automatique

En effet, le rôle de cette étape semi-automatique est d'identifier les KPI de la littérature partageant des concepts communs au travers des mots-clés. Ces correspondances, entre les KPI de la littérature, seront ensuite examinées par les experts lors de la synthèse. Dit autrement, cette étape semi-automatique doit permettre d'éliminer de la comparaison manuelle toutes les paires de KPI de la littérature ne partageant aucun mot-clé. Dans cette optique, une comparaison des deux premières matrices de comparaison, $MMmat^{1,2}$ et $MSAmat^{1,2}$, est proposée.

Cette étape d'ajustement de la méthode semi-automatique repose sur une boucle itérative telle que montrée sur la Figure 3.3.

Lors de cette phase d'ajustement, différentes modifications (attribution des mots-clés pour chacun des KPI, classement des mots-clés dans $MCmat$, vérification des correspondances « manuelles » entre les KPI des listes \mathcal{L}^1 et \mathcal{L}^2 , respectivement (a), (b) et (c) sur la Figure 3.3) permettent de corriger l'écart entre les deux matrices de comparaison analysées. Ces changements sont également l'occasion **d'apprendre à attribuer suffisamment de mots-clés sur chaque KPI de la littérature** et de bien les classer dans l'objectif de capter au moins toutes les correspondances identifiées avec la méthode de comparaison manuelle.

3.4.1 Superposition des matrices de comparaison obtenues avec les deux méthodes

Pour ajuster la méthode semi-automatique, la matrice de comparaison $MMmat^{1,2}$ sert de référence pour valider les résultats contenus dans la matrice de comparaison $MSAmat^{1,2}$. Elle a été obtenue manuellement par les experts qui peuvent donc s'appuyer sur ce résultat. L'objectif de cette étape est de vérifier que **toutes les correspondances identifiées manuellement, $MMmat^{1,2}$, sont également repérées par la méthode semi-automatique, $MSAmat^{1,2}$** . Dans le cas où $MSAmat^{1,2}$ révèlerait des correspondances qui ne sont pas dans $MMmat^{1,2}$, ces résultats seront considérés comme des « faux positifs ». En effet, la méthode semi-automatique fait apparaître de fausses correspondances. Ce nombre de cas doit être minimisé pour réduire le nombre de KPI à considérer lors de la synthèse des KPI de la littérature.

Cette étape consiste à superposer les matrices $MMmat^{1,2}$ et $MSAmat^{1,2}$ pour comparer les résultats des méthodes associées. Cette comparaison permet d'obtenir une matrice de superposition $SPmat^{1,2}$ qui a la même taille que les matrices $MMmat^{1,2}$ et $MSAmat^{1,2}$. Elle contient les différences entre les matrices de comparaison, et chaque élément de cette nouvelle matrice est obtenu par la fonction suivante :

$$\mathcal{F}_{SP}(J_{j_1}^1, J_{j_2}^2) = \begin{cases} 0 & \text{si } MMmat^{1,2}(J_{j_1}^1, J_{j_2}^2) = MSAmat^{1,2}(J_{j_1}^1, J_{j_2}^2) = 0 \\ -1 & \text{si } (MMmat^{1,2}(J_{j_1}^1, J_{j_2}^2) \neq 0 \text{ AND } MSAmat^{1,2}(J_{j_1}^1, J_{j_2}^2) = 0) \\ -2 & \text{si } (MMmat^{1,2}(J_{j_1}^1, J_{j_2}^2) = 0 \text{ AND } MSAmat^{1,2}(J_{j_1}^1, J_{j_2}^2) > 0) \\ 1 & \text{si } (MMmat^{1,2}(J_{j_1}^1, J_{j_2}^2) \neq 0 \text{ AND } MSAmat^{1,2}(J_{j_1}^1, J_{j_2}^2) > 0) \end{cases} \quad (3.9)$$

avec $j_1 \in [1..n_j^1]$, $j_2 \in [1..n_j^2]$.

Dans l'équation (3.9), les termes $MMmat^{1,2}(J_{j_1}^1, J_{j_2}^2) = 0$ représentent les couples de KPI pour lesquels les experts n'ont pas identifié une correspondance, et les termes $MMmat^{1,2}(J_{j_1}^1, J_{j_2}^2) \neq 0$ représentent les correspondances fortes et partielles.

Cette démarche permet de vérifier que toutes les correspondances de la matrice $MMmat^{1,2}$ se retrouvent dans la matrice $MSAmat^{1,2}$. Ainsi, lorsqu'un 0 apparaît dans $SPmat^{1,2}$, cela signifie que les deux méthodes n'identifient pas une correspondance pour le couple de KPI. À l'inverse, l'apparition d'un 1 montre aussi que les méthodes convergent sur une correspondance. Dans certains cas, la méthode semi-automatique fait apparaître des correspondances non identifiées manuellement ($\mathcal{F}_{SP}(J_{j_1}^1, J_{j_2}^2) = -2$) et qui correspondent à de « faux positifs ». Enfin, le dernier résultat possible est -1. Il s'agit des correspondances fortes ou partielles que les experts ont considérées, mais qui ne sont pas apparues avec la méthode semi-automatique. Ce résultat doit alors être corrigé et la sous-section suivante propose plusieurs possibilités.

De plus, pour faciliter l'étape de validation, un code couleur est appliqué à la matrice $SPmat^{1,2}$:

- blanc pour les éléments valant 0,
- rouge pour les éléments valant -1,
- violet pour les éléments valant -2,
- jaune pour les éléments valant 1.

La matrice $SPmat^{1,2}$ montre les similarités entre les deux méthodes (couleur jaune) et les différences (couleur violette). Ces différences sont de deux types. Le premier est un surplus de correspondances, dues à la méthode semi-automatique, correspondant aux éléments violets. La seconde différence porte sur la non-identification de certaines correspondances par la méthode semi-automatique, correspondant aux éléments rouges.

3.4.2 Divers ajustements à différentes étapes des méthodes de comparaison

Cette sous-section vise à reprendre tous les éléments valant -1 dans la matrice $SPmat^{1,2}$. La validation de la méthode semi-automatique nécessite plusieurs itérations pour obtenir le résultat final souhaité, c'est-à-dire que la matrice $SPmat^{1,2}$ ne doit contenir que des 1 et des -2, tout en minimisant ce dernier cas.

Pour chaque couple de KPI de la littérature présentant une correspondance avec la méthode manuelle et aucune correspondance avec la méthode semi-automatique, différentes modifications peuvent être mises en œuvre.

Une première modification consiste à revoir l'attribution des mots-clés définis pour chacun de ces KPI. L'objectif est de mieux caractériser les KPI de la littérature en modifiant les mots-clés. Ensuite, une autre modification possible est de réarranger les mots-clés dans la matrice de mots-clés $MCmat$. Suivant le degré de modification, la matrice de superposition $SPmat^{1,2}$ peut changer de manière significative. En effet, des éléments blancs (0) peuvent devenir rouges (-1) par exemple. Cette deuxième possibilité peut augmenter le nombre d'itérations pour atteindre l'objectif.

Après avoir répété ces étapes plusieurs fois et si l'objectif n'est pas atteint, il est possible de reprendre la matrice $MMmat^{1,2}$ et de la modifier. En effet, les experts ont pu identifier une correspondance qui n'est pas pertinente. Ainsi, un contrôle de cette matrice peut également contribuer à supprimer les éléments rouges de la matrice $SPmat^{1,2}$.

3.4.3 Généralisation de la méthode semi-automatique

Après avoir adopté une démarche permettant de calibrer et d'optimiser la méthode semi-automatique, cette dernière peut être utilisée pour comparer tous les modèles de maturité retenus. L'outil informatique, reprenant les équations présentées dans la sous-section 3.3.3, permet alors d'obtenir un nombre N_{MSA} de matrices de comparaison (sans compter les matrices transposées) dépendant du nombre de modèles de maturité comparés $N_{\mathcal{M}}$:

$$N_{MSA} = \frac{N_{\mathcal{M}} * (N_{\mathcal{M}} - 1)}{2}, \quad (3.10)$$

avec $N_{\mathcal{M}} \geq 1$.

Pour obtenir ces matrices et les indicateurs statistiques respectifs, il faut généraliser la méthode semi-automatique proposée dans la section 3.3. Ainsi, il suffit de remplacer les exposants 1 et 2 des modèles de maturité numérique \mathcal{M}^i par i_1 et i_2 , ce qui donne \mathcal{M}^{i_1} et \mathcal{M}^{i_2} (avec i_1 et $i_2 \in [1..N_{\mathcal{M}}]$).

L'utilisation de la méthode semi-automatique permet un gain de temps non négligeable. Précédemment, il a été observé que cette méthode pouvait faire apparaître de « faux positifs » dans les correspondances. Les experts ne pourront pas les identifier avant la synthèse des KPI, puisque la méthode manuelle n'est pas généralisée à l'ensemble des comparaisons de modèles.

Après avoir comparé tous les modèles de maturité \mathcal{M}^i , une étape de relecture de la matrice de mots-clés *MCmat* s'impose. En effet, cette matrice est complétée en même temps que l'attribution des mots-clés pour chaque KPI de la littérature. Il faut donc s'assurer de la cohérence de chaque ligne de cette matrice et qu'il n'y ait pas eu l'introduction de deux concepts distincts sur une même ligne par les experts. Dans le cas contraire, les experts peuvent réorganiser la matrice et vérifier l'impact vis-à-vis des KPI de la littérature concernés.

Enfin, les indicateurs statistiques peuvent être généralisés. Pour simplifier les équations, l'explication se limitait aux modèles \mathcal{M}^1 et \mathcal{M}^2 . Cependant, ces indicateurs statistiques s'appliquent à l'ensemble des modèles étudiés et aideront les experts pendant la synthèse des KPI de la littérature.

Alors que la méthode manuelle nécessitait une étape supplémentaire pour trier les correspondances partielles, la méthode semi-automatique propose des groupements de KPI appartenant à la même sous-dimension, ce qui permet de continuer sur la démarche employée pour la synthèse des KPI des modèles de maturité retenus.

3.5 Démarche pour synthétiser les KPI de la littérature

La dernière étape de cette méthodologie est donc la synthèse des KPI issus des modèles de maturité retenus pour l'étude. Il s'agit de l'étape permettant de créer de nouveaux KPI évaluant la maturité numérique et agrégeant l'ensemble des données des modèles de maturité retenus.

Il est possible que certains concepts soient identifiés dans plusieurs modèles de maturité numérique alors que d'autres sont spécifiques à un modèle en particulier.

Le processus détaillé de la démarche de synthèse des KPI de la littérature est illustré ci-dessous (Figure 3.4).

Cette démarche est divisée en **quatre phases itératives**. La première phase (**Collecte**) consiste à effectuer la collecte de KPI relatifs à une sous-dimension ainsi que les informations en lien avec cette dernière pour une première lecture. La deuxième phase (**Analyse**) a pour but d'analyser l'ensemble de ces informations. Ensuite, les experts choisissent les KPI à conserver puis à fusionner. Suivant les choix qui sont faits, la troisième phase (**Rédaction**) peut mener à la rédaction d'un ou plusieurs nouveaux KPI, notés KPI CAN. La dernière phase (**Contrôle**) correspond à un suivi de données (indicateurs

statistiques, KPI de la littérature et KPI CAN) pour être capable, par la suite, de connaître les modèles de maturité qui supportent chaque nouveau KPI CAN.

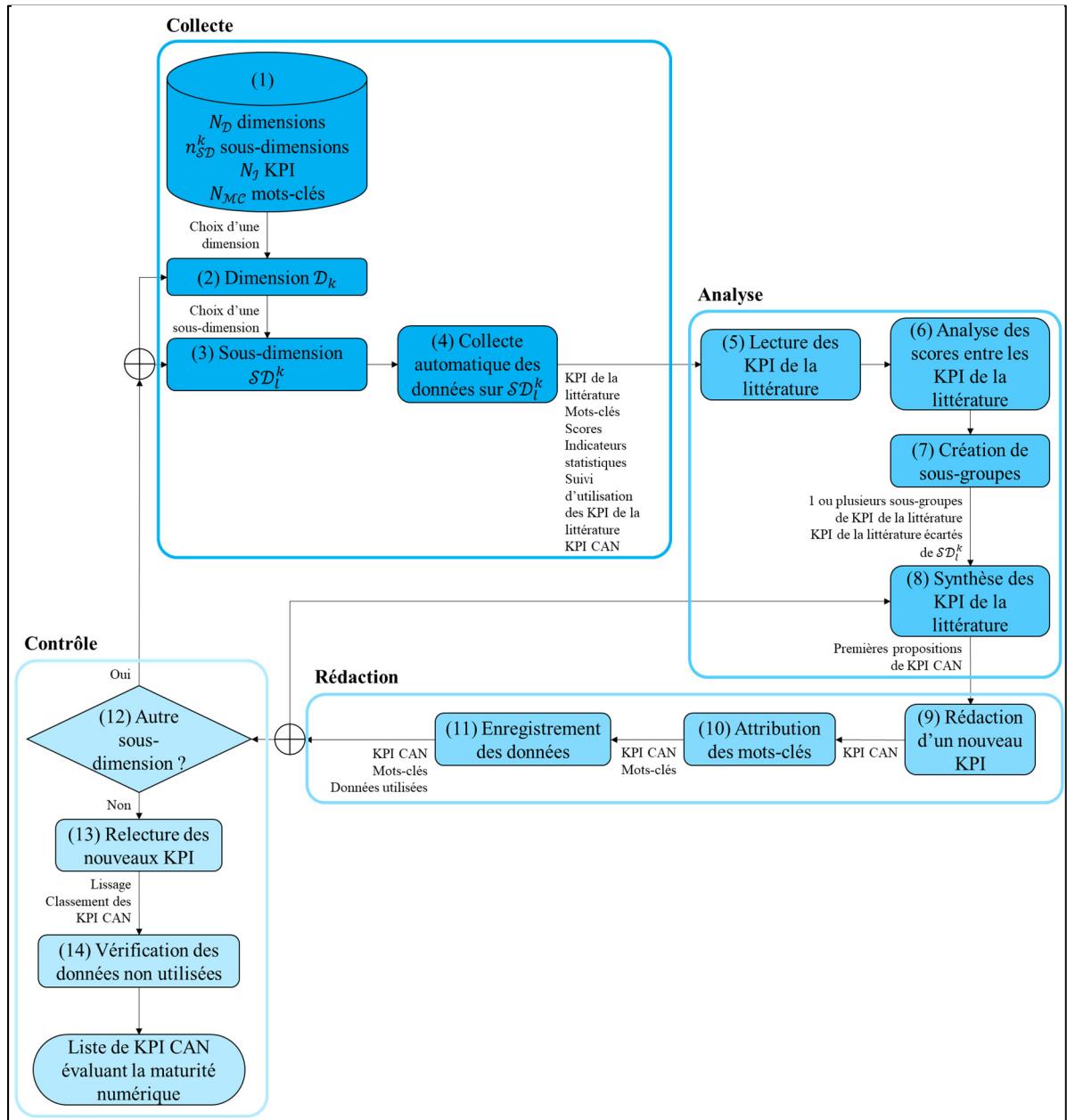


Figure 3.4 Démarche suivie pour la synthèse des KPI de la littérature

Les paragraphes qui suivent décrivent les étapes de chacune des phases de la démarche utilisée pour faire la synthèse des KPI de la littérature (Collecte, Analyse, Rédaction et Contrôle).

3.5.1 Collecte des données

Dans cette phase, les experts doivent avoir accès à toutes les informations nécessaires à un seul endroit. En effet, la démarche de comparaison des modèles de maturité mène à la constitution d'une base de données qu'il faut synthétiser (correspondant à l'étape (1) sur la Figure 3.4). Ainsi, en plus des KPI de la littérature en lien avec la sous-dimension choisie, les informations utiles sont les suivantes :

- le nombre de KPI de la littérature associés à cette sous-dimension,
- les scores résultants de la comparaison des KPI obtenus à l'aide de la méthode de comparaison semi-automatique,
- les mots-clés associés à chaque KPI collecté,
- les indicateurs statistiques tels que l'appui de la sous-dimension par les modèles de maturité retenus.

Le regroupement de toutes ces données permet d'avoir aisément accès aux informations utiles à la caractérisation de la sous-dimension. De surcroit, opter pour une méthode qui nécessiterait de visualiser plusieurs feuilles serait long et inefficace.

Une première méthode aurait été de répertorier ces informations manuellement. Cependant, il est possible que certains mots-clés changent de sous-dimension, ce qui imposerait de refaire ce travail. Pour gagner du temps, un formulaire de saisie est développé avec l'outil VBA et est conçu pour automatiser cette collecte de données (Figure 3.5).

Synthèse des KPI

Choisir une dimension

(a)

Choisir une sous-dimension

(b)

Choisir les modèles

(c) Modèles issus de la littérature Listes canadienne et allemande

ÉTS
Le génie pour l'industrie

Figure 3.5 Formulaire de saisie pour regrouper les données autour d'une sous-dimension

Ainsi, cet outil permet à l'utilisateur de choisir une dimension \mathcal{D}_k (avec $k \in [1..N_{\mathcal{D}}]$) (correspondant à l'étape (2) sur la Figure 3.4) parmi les $N_{\mathcal{D}}$ définies précédemment et une sous-dimension \mathcal{SD}_l^k associée ($l \in [1..n_{\mathcal{SD}}^k]$ et $n_{\mathcal{SD}}^k$ le nombre de sous-dimensions de la dimension k) (correspondant à l'étape (3) sur la Figure 3.4), respectivement via les champs (a) et (b) sur la Figure 3.5. De plus, il est possible de faire apparaître tous les KPI des modèles de maturité retenus pour l'étude avec les KPI de la liste canadienne (en progression), ou uniquement les KPI des listes canadienne et allemande (correspondant à (c) sur la Figure 3.5).

Le **choix d'une sous-dimension** n'est pas aléatoire (correspondant à l'étape (3) sur la Figure 3.4). Il se base sur l'**importance relative d'une sous-dimension** sur les modèles de maturité retenus, noté $\mathcal{X}_{Appui,SD}^{k,l}$. La première sous-dimension sélectionnée doit avoir l'appui le plus grand sur les modèles de maturité retenus. Ensuite, il faut analyser, en priorité, les autres sous-dimensions appartenant à la même dimension pour assurer la cohérence de cette dernière.

Après avoir spécifié les trois critères précédents ((a), (b) et (c)), l'outil informatique, lié au formulaire présenté sur la Figure 3.5, s'exécute et récupère tous les KPI qui possèdent au moins un des mots-clés de la sous-dimension \mathcal{SD}_l^k . Il s'agit de l'étape (4) sur la Figure 3.4 de la démarche de synthèse. De plus, il permet l'affichage de plusieurs éléments dans une feuille spécifique du fichier Excel. Sur cette dernière, il est rappelé les noms de la dimension \mathcal{D}_k et de la sous-dimension \mathcal{SD}_l^k sélectionnées. Le nombre de KPI relatif à cette sous-dimension est inscrit tout comme le nombre de nouveaux KPI CAN rédigés et ayant un lien avec la sous-dimension \mathcal{SD}_l^k .

Ensuite, l'ensemble des KPI de la littérature récupérés ainsi que leurs mots-clés sont répertoriés. Les KPI de la littérature appartenant à cette liste sont classés en cinq groupes lors de la synthèse :

- les KPI non encore utilisés (cellules blanches),
- les KPI déjà partiellement utilisés (cellules orange),
- les KPI déjà totalement utilisés (cellules rouges),
- les KPI identiques (cellules grises),
- les KPI supprimés (cellules noires).

En effet, pendant la démarche de synthèse, un **suivi de l'utilisation des KPI de la littérature** permet, pour les itérations suivantes, de repérer rapidement ceux déjà utilisés lors de la synthèse des KPI des autres sous-dimensions. De plus, le ou les nouveaux KPI CAN qui les utilisent sont également indiqués. En effet, les KPI CAN forment une nouvelle liste de KPI qui sont comparés avec la méthode semi-automatique de la même manière que pour les KPI de la littérature.

Un KPI de la littérature déjà **partiellement utilisé** implique qu'une partie de ce KPI a permis la rédaction d'un nouveau KPI CAN lors d'une étape précédente. Cependant, le concept non utilisé pourrait permettre la rédaction d'un autre KPI CAN dans cette sous-dimension ou une autre.

Un KPI de la littérature est considéré comme **totalement utilisé** lorsque l'ensemble des concepts contenus dans ce KPI est utilisé par un ou plusieurs nouveaux KPI CAN.

Ensuite, un KPI de la littérature **identique** résulte du fait que certains modèles citent les mêmes sources et les experts ne souhaitent les analyser qu'une seule fois. Ce type de KPI a été identifié lors de l'étape de rétro-ingénierie pour la comparaison des modèles de maturité.

Un KPI de la littérature peut être **supprimé** de la liste de KPI lorsque ce dernier n'évalue pas la maturité numérique d'une entreprise.

Un sixième groupe peut être identifié dans cette liste. Il s'agit des **KPI CAN nouvellement rédigés** et dont l'un des mots-clés les lie à la sous-dimension \mathcal{SD}_l^k . Ces KPI CAN sont repérés par la couleur verte de leur cellule et la sous-dimension dans laquelle ils ont été rédigés est affichée.

Les **scores, résultant de la comparaison des KPI de la littérature**, sont récupérés pour former une matrice de comparaison uniquement avec les KPI de la littérature liés à \mathcal{SD}_l^k . Ces scores sont issus des précédentes matrices de comparaison *MSAmat* et offrent un aperçu des correspondances possibles entre chacun des couples de KPI de la littérature. En plus, l'indicateur statistique $\mathcal{X}_{Appui,SD}^{k,l}$, qui représente l'appui de la sous-dimension \mathcal{SD}_l^k sur les modèles de maturité, est affiché. Ceci a pour objectif d'indiquer l'importance relative de cette sous-dimension dans les modèles de maturité étudiés.

3.5.2 Analyse des données

Dans cette phase, il s'agit d'analyser les KPI de la littérature définis lors de l'étape de rétro-ingénierie en vue de la synthèse. À travers une première lecture, chaque expert commence, individuellement, à identifier des liens entre les KPI de la littérature liés à la sous-dimension \mathcal{SD}_l^k (correspondant à l'étape (5) sur la Figure 3.4).

Un outil informatique permet de supprimer les KPI de la littérature déjà totalement utilisés (rouges), identiques (gris) et supprimés (noirs). Le but est de réduire le nombre de KPI à analyser, de simplifier l'analyse et de gagner du temps.

Par ailleurs, la présence de la matrice de comparaison permet d'identifier rapidement quels sont les KPI de la littérature qui sont les plus proches (correspondant à l'étape (6) sur la Figure 3.4). De cette observation, les experts lisent les KPI de la littérature qui ont un score élevé entre eux et discutent de leurs similarités et différences. L'aboutissement de ces discussions est la **constitution d'un ou de plusieurs sous-groupes de KPI de la littérature** qui relèvent chacun d'un concept commun. Ces sous-groupes de KPI de la littérature sont identifiés par des couleurs (correspondant à l'étape (7) sur la Figure 3.4).

Pendant cette étape de regroupement, les experts ont le choix, pour chaque KPI de la littérature, entre le conserver pour la sous-dimension \mathcal{SD}_l^k ou l'écartez s'ils considèrent qu'il devrait être traité dans une autre sous-dimension. Pour rappel, la méthode semi-automatique identifie de potentielles correspondances entre les KPI de la littérature, cependant certaines correspondances ne sont pas avérées (« faux positifs »). Le score obtenu montre la proportion de mots-clés similaires entre deux KPI. Ainsi, ce score ne garantit pas l'appartenance des deux KPI à la sous-dimension en cours d'analyse et leur correspondance n'est pas certaine. Enfin, les experts discutent pour décider quels sont les sous-groupes à conserver pour rédiger de nouveaux KPI dans la sous-dimension \mathcal{SD}_l^k . Les autres seront utilisés dans une autre sous-dimension.

Lors de la création des sous-groupes de KPI de la littérature, certains d'entre eux sont éliminés de la démarche de synthèse. Effectivement, dans certains cas, les experts peuvent considérer qu'un KPI identifié dans les modèles de maturité n'évalue pas la maturité numérique d'une entreprise. Ce KPI sera alors supprimé des analyses subséquentes et aura une cellule noire s'il réapparaît dans une autre sous-dimension.

Ensuite, en s'appuyant sur les indicateurs statistiques énumérés précédemment, sur le nombre de KPI de la littérature en présence et sur le nombre de sous-groupes réalisés, les experts discutent du nombre de KPI à synthétiser pour couvrir cette sous-dimension (correspondant à l'étape (8) sur la Figure 3.4).

3.5.3 Rédaction des nouveaux KPI

La troisième phase de la démarche de synthèse des KPI de la littérature est la rédaction des nouveaux KPI CAN. Les experts doivent se mettre d'accord sur la formulation de chacun des KPI CAN qui est donc débattue.

Une étape de rédaction (correspondant à l'étape (9) sur la Figure 3.4) permet d'aboutir à une **formulation unique prenant en compte les avis et l'accord de chaque expert**. Pendant ces échanges, les experts décident du vocabulaire qui va être utilisé, souvent en provenance d'un ou de plusieurs KPI de la littérature.

Pendant cette étape, les experts ne doivent pas inclure dans le nouveau KPI de concept n'étant pas explicitement présent dans les KPI de la littérature. Les nouveaux KPI CAN reposent uniquement sur les informations extraites des modèles de maturité et non pas sur une interprétation d'un des experts qui effectuent cette synthèse.

Aussi, lorsqu'un KPI CAN est rédigé, il faut lui **attribuer des mots-clés** (correspondant à l'étape (10) sur la Figure 3.4), identifier les KPI de la littérature sur lesquels il s'appuie et, enfin, enregistrer toutes ces informations (correspondant à l'étape (11) sur la Figure 3.4).

Un formulaire de saisie permet de faciliter le travail. Sur ce formulaire (Figure 3.6), toutes les informations en lien avec la sous-dimension \mathcal{SD}_l^k sont rappelées (Figure 3.6, (a)). Ce formulaire présente, dans un premier temps, les mots-clés en lien avec la sous-dimension \mathcal{SD}_l^k (Figure 3.6, (b)) et, dans un second temps, l'ensemble de tous les mots-clés utilisés par les KPI en lien avec cette sous-dimension \mathcal{SD}_l^k (Figure 3.6, (c)). Ensuite, un champ est

disponible pour écrire le nouveau KPI CAN (Figure 3.6, (d)). En dessous, les champs libres sont réservés pour l'attribution de mots-clés (Figure 3.6, (e)). Une liste des KPI (Figure 3.6, (f)) associés à la sous-dimension \mathcal{SD}_l^k est présente pour pouvoir enregistrer le type d'utilisation, total ou partiel, des KPI de la littérature en appui au nouveau KPI CAN, ou encore « consommés » par le nouveau KPI CAN.

New KPIs from Maturity Model KPIs																																																	
KPIs list		Dimension \mathcal{D}_k		Subdimension \mathcal{SD}_l^k																																													
		Business, strategy & governance		Business model & strategy																																													
<table border="1"> <tr> <td colspan="2">Statistics</td> </tr> <tr> <td>Number of KPIs</td> <td>42</td> <td>Number of models</td> <td>12</td> <td>Support</td> <td>92 %</td> </tr> <tr> <td colspan="6">KWs of KPIs list</td> </tr> <tr> <td colspan="6"> business model, value creation, revenues, business outcomes, economic benefits, business requirements, business operations, commercial activity, strategic plan, strategic vision, core competencies </td> </tr> <tr> <td colspan="6"> data-driven services, organization's portfolio, digital features, smart product, smart service, data usage, data analysis, new technologies, social media, cloud computing, IT organization, agility, lead times, performance management, data collection, digital strategy review, digital activities governance, CRM, customer interactions, sales tools, communication channels, IoT, i4.0 awareness, i4.0 strategy, social benefits, environmental benefits, encryption, cost analysis, KPI, digital leader, digital strategy, partners integration, i4.0 expertise, i4.0 organization's capabilities, external collaboration, system lifetime monitoring, customer feedbacks, customers integration, end-to-end integration, profitability </td> </tr> <tr> <td colspan="2">New KPIs</td> <td colspan="2"></td> <td colspan="2"></td> </tr> <tr> <td colspan="2">Associated KWs</td> <td colspan="2"></td> <td colspan="2"></td> </tr> <tr> <td colspan="6"> Next  </td> </tr> </table>						Statistics		Number of KPIs	42	Number of models	12	Support	92 %	KWs of KPIs list						business model, value creation, revenues, business outcomes, economic benefits, business requirements, business operations, commercial activity, strategic plan, strategic vision, core competencies						data-driven services, organization's portfolio, digital features, smart product, smart service, data usage, data analysis, new technologies, social media, cloud computing, IT organization, agility, lead times, performance management, data collection, digital strategy review, digital activities governance, CRM, customer interactions, sales tools, communication channels, IoT, i4.0 awareness, i4.0 strategy, social benefits, environmental benefits, encryption, cost analysis, KPI, digital leader, digital strategy, partners integration, i4.0 expertise, i4.0 organization's capabilities, external collaboration, system lifetime monitoring, customer feedbacks, customers integration, end-to-end integration, profitability						New KPIs						Associated KWs						Next 					
Statistics																																																	
Number of KPIs	42	Number of models	12	Support	92 %																																												
KWs of KPIs list																																																	
business model, value creation, revenues, business outcomes, economic benefits, business requirements, business operations, commercial activity, strategic plan, strategic vision, core competencies																																																	
data-driven services, organization's portfolio, digital features, smart product, smart service, data usage, data analysis, new technologies, social media, cloud computing, IT organization, agility, lead times, performance management, data collection, digital strategy review, digital activities governance, CRM, customer interactions, sales tools, communication channels, IoT, i4.0 awareness, i4.0 strategy, social benefits, environmental benefits, encryption, cost analysis, KPI, digital leader, digital strategy, partners integration, i4.0 expertise, i4.0 organization's capabilities, external collaboration, system lifetime monitoring, customer feedbacks, customers integration, end-to-end integration, profitability																																																	
New KPIs																																																	
Associated KWs																																																	
Next 																																																	
(f)	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)																																												

Figure 3.6 Formulaire de saisie pour enregistrer les informations d'un nouveau KPI CAN

Ainsi, comme pour les KPI de la littérature, chaque nouveau KPI CAN se voit attribuer des mots-clés (correspondant à l'étape (10) sur la Figure 3.4). La différence est que, pendant la phase de synthèse des KPI de la littérature, les **mots-clés proviennent obligatoirement de la matrice de mots-clés $MCmat$** définie lors de la comparaison semi-automatique. De plus, la présence des mots-clés sur le formulaire (Figure 3.6, (b) et (c)) facilite le choix des experts.

Une fois tous les champs du formulaire complétés, il est possible d'**enregistrer toutes ces informations** (la dimension \mathcal{D}_k , la sous-dimension \mathcal{SD}_l^k , le KPI CAN, les mots-clés

respectifs et l'utilisation des KPI) dans une feuille Excel (correspondant à l'étape (11) sur la Figure 3.4). Le **suivi d'utilisation des KPI** de la littérature est important puisqu'il permet l'**attribution des couleurs à chacun des KPI de la littérature**, tel que décrit à la sous-section 3.5.1. En plus de l'état d'utilisation, il est possible de savoir dans quel KPI CAN les KPI de la littérature ont été utilisés et inversement. Ces couleurs et ce suivi d'informations permettent, lors de la phase de collecte des données, d'écartier automatiquement certains KPI de la littérature puisqu'ils ont déjà été « consommés ».

Lorsque pour une sous-dimension, les discussions convergent vers le choix de ne pas rédiger de KPI CAN, il faut justifier ce choix. De plus, lorsque toutes les sous-dimensions seront analysées, cette sous-dimension sera supprimée avec les mots-clés qu'elle regroupe.

3.5.4 Contrôle des KPI CAN

La phase de contrôle est la dernière phase de la démarche de synthèse des KPI de la littérature. Elle a pour objectif d'**éviter les redondances et d'uniformiser le vocabulaire** au sein la liste de KPI CAN.

Suite à l'enregistrement d'un KPI CAN dans la sous-dimension \mathcal{SD}_l^k , deux situations peuvent se présenter (correspondant à l'étape (12) sur la Figure 3.4). Le premier cas consiste à écrire un autre KPI CAN dans la sous-dimension \mathcal{SD}_l^k . Cela peut être le cas, si les experts ont identifié un autre sous-groupe de KPI. Il faut alors reprendre les étapes à partir de la phase de rédaction. Le deuxième cas est de changer de sous-dimension, voire de dimension et de recommencer avec la phase de collecte des données.

Lorsque toutes les dimensions et sous-dimensions ont été traitées, une étape de relecture de tous les KPI CAN est nécessaire (correspondant à l'étape (13) sur la Figure 3.4). Pendant cette étape, il faut **s'assurer de l'homogénéité du lexique utilisé**. La lecture de cette liste de KPI CAN doit également permettre de supprimer une éventuelle répétition entre deux KPI

CAN. Dit autrement, les experts doivent veiller à ce que deux KPI CAN ne se concentrent pas sur la même idée, même si certaines redondances ne peuvent être exclues.

Par ailleurs, dans le cadre du projet DIMLA, il a été demandé **d'identifier les KPI les plus importants dans la liste des KPI CAN synthétisés** à partir des modèles retenus. Un indicateur statistique a été mis en place à cette fin. Il s'agit de l'appui des KPI CAN sur les modèles de maturité, noté $\mathcal{X}_{Appui,KPI CAN}^{k,l}$. Pour le calculer, il s'agit du même principe que pour l'indicateur statistique $\mathcal{X}_{Appui,SD}^{k,l}$. En effet, lors de la rédaction des KPI CAN, les experts enregistrent les KPI qui leur ont permis d'aboutir à cette formulation. Il faut donc compter le nombre de modèles qui ont influencé l'écriture du nouveau KPI et le diviser par le nombre de modèles retenus pour l'étude $N_{\mathcal{M}}$:

$$\mathcal{X}_{Appui,KPI CAN}^{k,l} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{\mathcal{M}}} 1 \text{ si } \exists \mathcal{I}_j^i \subseteq \mathcal{I}_{jCAN}^{CAN}}{N_{\mathcal{M}}}, \quad (3.11)$$

avec $j \in [1..n_j^i]$.

Chaque KPI CAN appartient à une sous-dimension l et une dimension k . Ainsi, cet indicateur statistique, $\mathcal{X}_{Appui,KPI CAN}^{k,l}$, peut être égal ou inférieur à $\mathcal{X}_{Appui,SD}^{k,l}$ pour un KPI CAN rédigé dans la même sous-dimension l . Dans le cas contraire, cela signifie qu'un modèle de maturité a contribué à la rédaction du KPI CAN alors qu'aucun des KPI du modèle n'appartient à cette sous-dimension l .

La dernière étape (correspondant à l'étape (14) sur la Figure 3.4) consiste à repérer tous les KPI en provenance de la littérature et demeurés non utilisés, supprimés ou partiellement utilisés pour expliquer l'absence des concepts dans la liste finale de KPI CAN.

3.6 Synthèse

La démarche détaillée dans ce chapitre permet de **comparer et d'identifier les KPI** de la littérature faisant appel à des concepts similaires. Elle est suivie d'une synthèse pour rédiger

de nouveaux KPI sur les concepts identifiés parmi les modèles de maturité retenus. La démarche employée pour **synthétiser les KPI** de la littérature permet d'utiliser toutes les informations pertinentes trouvées dans les modèles de maturité numérique. Une vision globale de toutes les étapes décrites dans les sections précédentes de ce chapitre est présentée sur la Figure 3.7.

Ainsi, **deux méthodes de comparaison**, l'une manuelle et l'autre semi-automatique, ont été employées. Cette méthode d'identification des similarités entre les modèles de maturité permet de faciliter la synthèse de l'ensemble des KPI de la littérature. L'étape de **rétro-ingénierie**, présente dans les deux méthodes, permet d'**obtenir des KPI « autonomes »** et évite toute extrapolation des données analysées. De plus, tous les KPI issus des modèles de maturité étudiés sont conservés pour s'assurer que la **liste finale de KPI CAN** soit la **meilleure représentation possible des évaluations de la maturité numérique** actuelles, sauf si ces KPI de la littérature n'ont aucun lien avec l'évaluation de la maturité numérique, auquel cas ils sont écartés.

La première comparaison des modèles \mathcal{M}^1 et \mathcal{M}^2 , avec la méthode de comparaison manuelle, montre qu'elle est coûteuse en temps. Ce premier résultat permet néanmoins le calibrage de la **méthode de comparaison semi-automatique** avec les mêmes modèles. L'ajustement de la méthode semi-automatique, avec la méthode manuelle, permet de généraliser son utilisation à l'ensemble des modèles de maturité retenus. Ainsi, la méthodologie finale repose essentiellement sur la **définition de mots-clés** qui caractérisent chacun des KPI. Les mots-clés permettent de comparer les modèles de maturité et de **classer les KPI dans des dimensions et des sous-dimensions**.

Le regroupement de KPI de la littérature au sein des différentes sous-dimensions permet de faire la **synthèse des KPI de la littérature**, de rédiger de nouveaux KPI CAN et, alors, d'atteindre l'objectif de ce mémoire. Cette démarche se divise en **4 phases qui sont la collecte des données, leur analyse, la rédaction de KPI CAN et le contrôle des KPI CAN**.

Ces phases sont répétées jusqu'à ce que toutes les sous-dimensions, et donc les données extraites des modèles de maturité retenus, soient synthétisées en KPI CAN.

Au travers de la méthode de comparaison semi-automatique, une analyse des KPI de la littérature et de ceux obtenus par la démarche de synthèse est proposée. Il est possible d'identifier les similarités et les différences entre les modèles de maturité numérique. La **définition d'indicateurs statistiques** et le suivi de l'utilisation des KPI de la littérature donnent des indications sur l'**importance relative des modèles de maturité** et sur la **couverture des dimensions** et des sous-dimensions.

La méthodologie de comparaison est dite « semi-automatisée » puisqu'elle nécessite toujours la présence d'experts. L'étape de rétro-ingénierie, qui permet de transformer en KPI les questions et réponses en provenance des modèles de maturité ne peut pas être effectuée de manière automatique. L'attribution des mots-clés pour chacun des KPI et leur classement dans une matrice est également une étape manuelle basée sur la contribution des experts. De plus, la démarche de synthèse oblige une intervention humaine, puisque les correspondances entre KPI, créés avec la méthode semi-automatique, ne sont pas toujours valides (« faux positifs »). Les experts ont donc le rôle d'éliminer les KPI de la littérature qui ne sont pas liés à la sous-dimension traitée et de synthétiser les KPI restants.

Cette méthodologie va permettre aux experts d'établir une liste de KPI CAN pour évaluer la maturité numérique des entreprises. Cette démarche nécessite de **nombreuses discussions entre les experts** pour s'assurer qu'aucune information n'est laissée de côté et permet de limiter les biais subjectifs. En effet, l'automatisation d'une partie de cette méthodologie limite les erreurs dues à la surinterprétation d'une information ou la divergence d'une discussion. Cela permet également de mettre à jour rapidement l'ensemble des données et indicateurs lors de modifications ultérieures (changement de mots-clés, de dimensions, par exemple). Il est également important de souligner que de nombreuses décisions impliquent des discussions entre les experts sur des données qualitatives. Aussi l'implication des experts

a un impact sur le résultat auquel mène cette démarche, impact qui reste toutefois limité, du fait de la méthodologie employée et du nombre d'experts impliqués.

Après avoir présenté la méthodologie dans le chapitre 2 et détaillé la démarche adoptée dans ce chapitre, une présentation et une analyse des résultats, à partir des indicateurs statistiques mis en place, sont proposées dans le chapitre 4.

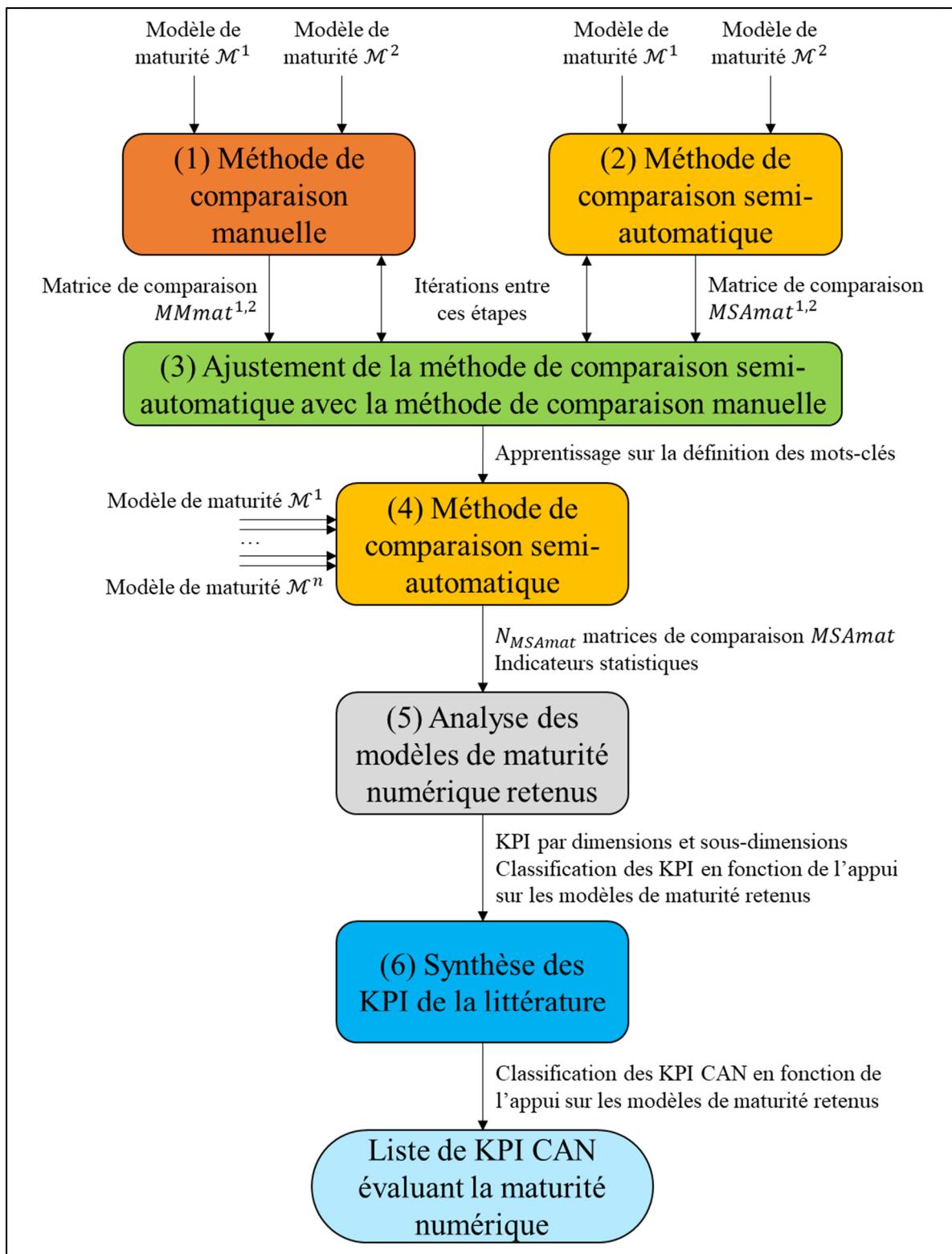


Figure 3.7 Démarche complète de la comparaison modèles de maturité retenus et de la synthèse de KPI de la littérature

CHAPITRE 4

RÉSULTATS DE LA COMPARAISON DES MODÈLES DE MATURITÉ RETENUS

Le chapitre 4 présente les résultats de la comparaison des modèles de maturité retenus en reprenant la méthodologie présentée au chapitre 2 et la démarche de comparaison détaillée au chapitre 3 (correspondant aux étapes (1) à (5) sur la Figure 3.7). Dans un premier temps, les modèles de maturité numérique, retenus pour l'étude, sont présentés. Dans un second temps, les résultats obtenus en comparant deux modèles de maturité avec les méthodes manuelle et semi-automatique sont présentés. Dans un troisième temps, une étape de révision des matrices de comparaison montre les différences entre les deux méthodes et donne la possibilité aux experts de généraliser la méthode de comparaison semi-automatique à l'ensemble des modèles de maturité retenus. Ensuite, les résultats obtenus avec la méthode semi-automatique, étendue à l'ensemble des modèles de maturité retenus, et la structure en dimensions et en sous-dimensions déduites de la matrice de mots-clés sont présentés. Enfin, la cinquième section de ce chapitre livre un aperçu sur l'ensemble des KPI de la littérature analysés, la structure mise en place et les indicateurs statistiques.

Ce chapitre s'attache à présenter les résultats principaux dans chacune des sections. Des exemples sont présentés pour faciliter la compréhension du travail réalisé. Certains résultats sont présentés en anglais, car la majorité des données traitées à partir des modèles de maturité utilisent cette langue qui a permis de favoriser les échanges dans la cadre du projet DIMLA.

4.1 Modèles de maturité numérique retenus pour l'étude

Pour cette étude et à partir de la revue de littérature présentée au chapitre 1, **13 modèles d'évaluation de la maturité numérique** ont été retenus et sont présentés dans le Tableau 4.1.

Cette liste de modèles de maturité est plus courte que la liste présentée dans l'annexe III, car certains d'entre eux ne livraient pas suffisamment de détails pour être exploités, alors que d'autres ont été repérés tardivement et n'ont pu être inclus dans l'étude.

Tableau 4.1 Modèles de maturité numérique retenus pour l'étude

#	Modèle de maturité numérique	Nombre de questions	Sigle
1	Industry 4.0 Readiness Online Self-Check for Businesses (IMPULS, 2015) *	19	IMP
2	Industry 4.0 - Enabling Digital Operations Self Assessment (PricewaterhouseCoopers, 2015) *	33	PWC
3	ADN 4.0 – Autodiagnostic (Ministère de l'Économie et de l'Innovation Québec, 2017) *	50	ADN
4	Digitalomètre (Bpi France, 2018) *	25	BPI
5	Adoption Maturity Model (AMM) (Scremin et al., 2018)	35 (sous forme de KPI)	SCR
6	The Digital Maturity Model 4.0 (Gill & VanBoskirk, 2016)	28	FOR
7	Maturity and Readiness Model for Industry 4.0 Strategy (Akdl et al., 2018)	68	AKD
8	Évaluer la maturité numérique de votre entreprise (MEDEF France, 2016) *	33	MED
9	Transformation digitale (Cegos, 2017) *	18	CEG
10	Industry 4 self-assessment tool (University of Warwick, 2017) *	37	WAR
11	Gestion et gouvernance des technologies numériques (MACH 1.6) (Aéro Montréal, 2011)	49	MAC
12	Assessment Tool (Singapore Economic Development Board, 2017)	16 (sous forme de KPI)	SIN
13	SMART DIAG' - Diagnostic numérique (AGEFOS PME, 2018) *	25	AGE

* Modèles de maturité numérique disponibles sous forme d'outils d'auto-évaluation.

Chacun de ces modèles présente un nombre de questions distinct. Le nombre de questions indiqué dans le Tableau 4.1 pour chacun des modèles retenus correspond aux questions évaluant la maturité numérique.

En effet, certains modèles, comme ceux d'IMPULS et de PwC, possèdent des questions additionnelles (nombre d'employées, chiffre d'affaires, domaine d'activité ...) pour classer

les résultats des entreprises qui réalisent le questionnaire. Ces questions n'ont aucune influence sur le résultat et ne portent pas sur la maturité numérique à proprement parler.

Dans les modèles de Scremin et al. (2018) et Singapore Economic Development Board (2017), les KPI sont directement disponibles et le second explicite les niveaux de maturité pour chacun de ses 16 KPI. Les sigles définis pour chaque modèle sont utilisés pour présenter les résultats dans les sections suivantes.

L'ensemble de ces modèles de maturité numérique sont disponibles en ligne à l'exception des modèles de Scremin et al. (2018) de MACH 1.6 (Aéro Montréal, 2011) pour lesquelles une demande aux auteurs a été nécessaire pour avoir accès à leur contenu. Les modèles de maturité numérique correspondant à des outils d'auto-évaluation sont repérés à l'aide d'un astérisque.

De plus, tous ces modèles de maturité ne sont pas complètement indépendants. En effet, le modèle de Akdil et al. (2018) fait référence aux modèles de IMPULS (2015) et de l'University of Warwick (2017).

4.2 Premiers résultats obtenus à partir de la comparaison de deux modèles de maturité

Cette section présente la comparaison des deux modèles de maturité disponibles en ligne qui sont les modèles IMPULS (IMPULS, 2015) et PwC (PricewaterhouseCoopers, 2015). Ils correspondent aux modèles \mathcal{M}^1 et \mathcal{M}^2 mentionnés au chapitre 3 et sont notés IMP et PWC dans cette section et les suivantes. De manière analogue, les KPI seront désignés par le sigle du modèle et un numéro (par exemple IMP 1 pour le premier KPI du modèle IMP). Ces modèles de maturité ont été retenus par les experts pour réaliser cette première comparaison, car il s'agit de deux outils d'auto-évaluation facilement accessibles en ligne et de tailles similaires. En effet, le nombre de questions et le nombre de dimensions sont proches et relativement peu élevés pour un premier essai des deux méthodes de comparaison.

4.2.1 Comparaison manuelle des modèles de maturité

Chacun de ces deux modèles est structuré autour de 6 dimensions dans les outils d'auto-évaluation en ligne. Le modèle IMP est constitué de 19 questions et le modèle PWC contient 33 questions évaluant la maturité numérique.

La première étape de la méthode consiste à récupérer les informations des modèles de maturité et à les transformer en KPI. Pour le modèle IMP, les experts ont rédigé 25 KPI par rétro-ingénierie. Certaines questions du modèle IMP sont larges et plusieurs réponses sont attendues. Ces questions ont donc mené à la rédaction de plusieurs KPI. De la même manière, les experts ont identifié les KPI pour le modèle PWC. Ainsi, 33 KPI ont pu être formulés. Pour ce modèle, chacune des questions a conduit à la rédaction d'un seul KPI.

Tableau 4.2 Question et réponses issues du modèle de maturité IMPULS,
adapté de l'outil d'auto-évaluation en ligne IMPULS (2015)

Question	In which part of your company have you invested in the implementation of Industry 4.0 in the past two years, and what are your plans for the future?		
Réponses		Investments in the past 2 years	Investments in the next 5 years
	Research & development		
	Production/manufacturing		
	Purchasing		
	Logistics		
	Sales		
	Service		
	IT		

Par exemple, la question dans le Tableau 4.2, appartenant au modèle IMPULS (2015) et à la dimension « Strategy and organization » de ce modèle, a mené les experts à écrire les KPI IMP 4 et IMP 5 suivants :

- IMP 4 → Level of financial investment in the implementation of Industry 4.0 in different company sectors in the next 5 years,

- IMP 5 → Level of financial investment in the implementation of Industry 4.0 in different company sectors in the past 2 years.

Dans ce cas, la question du modèle IMP porte sur l'évaluation des investissements dans les différents départements d'une entreprise. Les KPI ne détaillent pas chacun des départements dans leur énoncé, mais s'intéressent aux investissements passés pour le premier, et aux investissements prévus pour le second. Ainsi, les **KPI sont généralement de plus hauts niveaux vis-à-vis des questions** et sont donc plus globaux.

Cette étape a été réalisée par au moins trois experts et a fait l'objet de nombreuses discussions afin d'obtenir une formulation précise pour chaque KPI de la littérature.

Ces deux listes de KPI de la littérature ont ensuite été comparées. La mise en place de la méthode de comparaison manuelle (décrise dans la section 3.2, correspondant à l'étape (1) sur la Figure 3.7 et à l'ensemble des étapes illustrées à la Figure 3.1) a permis d'établir des correspondances - fortes, partielles ou nulles – entre les modèles IMP et PWC qui ont été les résultats de discussions entre 6 experts. La correspondance a été évaluée pour chaque couple de KPI et les avis des experts ont convergé pour chacun d'eux, en utilisant parfois le principe du vote majoritaire. Une nouvelle fois, les experts ont porté une attention particulière pour éviter toute surinterprétation. Le résultat de cette première comparaison est présenté dans l'article de Cognet et al. (2019).

Par la suite, la liste de KPI du modèle IMP a été modifiée et a impacté les résultats dans la matrice de comparaison $MMmat^{IMP, PWC}$. En effet, lors de la comparaison manuelle initiale des modèles IMP et PWC, les experts ont rencontré de nombreuses difficultés avec la liste de KPI du modèle IMP. En effet, certains de ces KPI n'ont pas fait l'objet d'une rétro-ingénierie. Dans le rapport de Lichtblau et al. (2015), il est possible de repérer des KPI qui correspondent aux questions de l'outil d'auto-évaluation en ligne (IMPULS, 2015). Cependant, il s'est avéré qu'ils n'étaient pas suffisamment détaillés pour en avoir une bonne compréhension. Les 6 experts sont alors revenus aux dimensions, aux questions et aux

réponses de ce modèle pour comprendre le contexte autour de chaque KPI. Ce problème a été observé de manière beaucoup moins importante avec les KPI du modèle PwC. Les experts se sont donc imposés d'inclure le nom ou une **allusion à la dimension du modèle de référence** et de réaliser l'**étape de rétro-ingénierie sur tous les modèles**, même si des indicateurs de maturité étaient déjà rédigés.

Ainsi, la Figure 4.1 présente la matrice $MMmat^{IMP,PWC}$ corrigée qui reprend les résultats du travail des 6 experts.

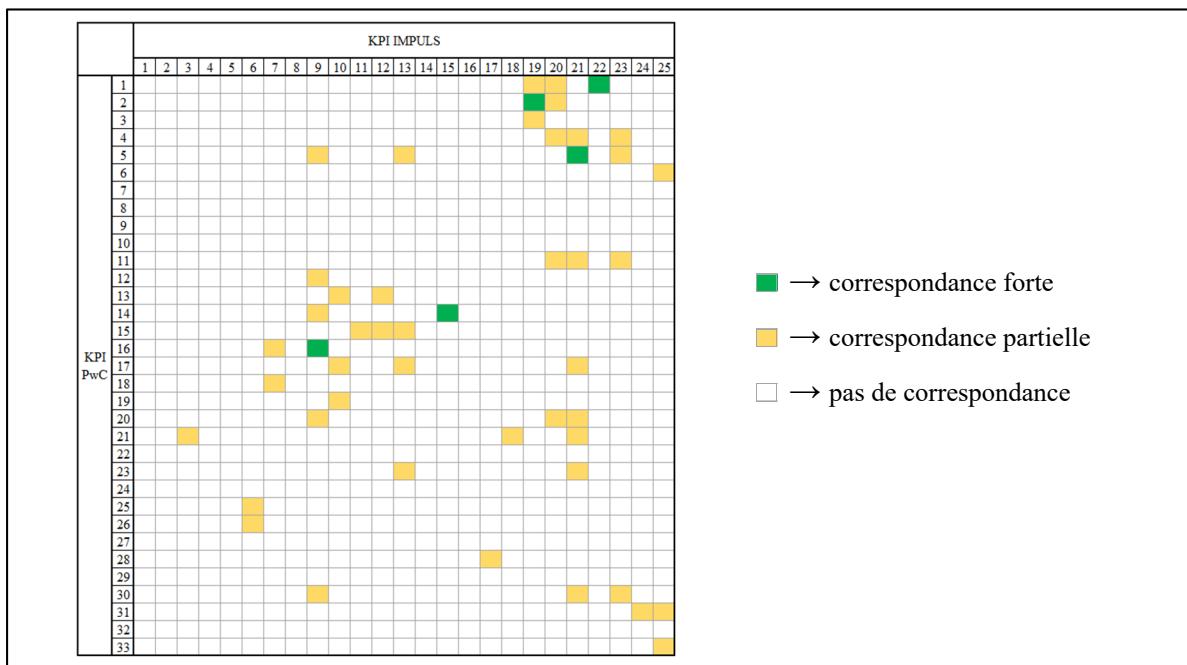


Figure 4.1 Matrice de comparaison entre les modèles IMPULS et PwC obtenu avec la méthode de comparaison manuelle

Cette matrice de comparaison contient peu de correspondances, qu'elles soient fortes ou partielles. Ainsi, le taux de remplissage $\chi_{Remplissage,MM}^{IMP,PWC}$ est de 6 %. La première conclusion qui peut être tirée de ce résultat est que cette méthode nécessite **beaucoup de temps pour comparer tous les couples de KPI possibles**. Pour cette matrice, il y a **825 comparaisons** ($= 25 * 33$) à analyser et les 6 experts ont obtenu la première version de $MMmat^{IMP,PWC}$ après deux jours de discussions avec l'identification de **49 correspondances**.

À l'intérieur de cette matrice, seuls **5 couples de KPI** ont été identifiés comme des **correspondances fortes**, c'est-à-dire qu'uniquement 5 KPI de chacun des deux modèles de maturité portent de manière similaire sur le même concept (deux à deux). Toutes les autres correspondances partielles, dans cette matrice, montrent que les modèles de maturité portent sur des aspects variés du même concept. Ces correspondances sont partielles, car la zone d'intérêt n'est pas la même entre les deux modèles.

Le faible taux de remplissage de la matrice $MMmat^{IMP,PWC}$ par rapport au temps nécessaire pour compléter cette matrice a conduit à la définition de la méthode de comparaison semi-automatique dont le premier résultat est présenté dans la sous-section suivante.

4.2.2 Comparaison semi-automatique des modèles de maturité

Pour cette méthode, correspondant à l'étape (2) sur la Figure 3.7 et à l'ensemble des étapes illustrées à la Figure 3.2, les KPI des deux modèles de maturité, IMP et PWC, sont ceux qui ont été formulés lors de la comparaison manuelle. Les experts doivent alors attribuer des mots-clés pour ensuite créer une première version de la matrice de mots-clés $MCmat$ et ainsi obtenir une matrice de comparaison $MSAmat^{IMP,PWC}$.

L'attribution des mots-clés pour chacun des KPI de la littérature doit être réalisée avec une grande rigueur. En effet, la **comparaison des KPI** de la littérature s'appuie désormais **sur les mots-clés**. Les experts ont attribué **en moyenne 3 mots-clés par KPI** (avec un écart-type de 1,2). Ce nombre dépend de la taille du KPI. En effet, certains sont plus longs que d'autres et nécessitent plus de mots-clés pour être correctement caractérisés.

En reprenant l'exemple proposé à partir de la question du Tableau 4.2, les mots-clés suivants ont été attribués à chacun des KPI IMP 4 et IMP 5 :

- IMP 4 → future investment / i4.0 implementation,
- IMP 5 → past investment / i4.0 implementation.

Cette première étape a abouti à l'identification de 133 mots-clés qui ont ensuite été classés dans la matrice de mots-clés $MCmat$. Certains de ces mots-clés ont été utilisés dans plusieurs KPI différents. Dans la matrice $MCmat$, les mots-clés ne peuvent apparaître qu'une seule fois. Les experts ont distingué 62 concepts différents lors de la première classification des mots-clés appliqués à chacun des KPI appartenant aux modèles IMP et PWC. Ces concepts sont de bas niveaux et feront l'objet d'une nouvelle classification lors de l'ajustement des matrices de comparaison.

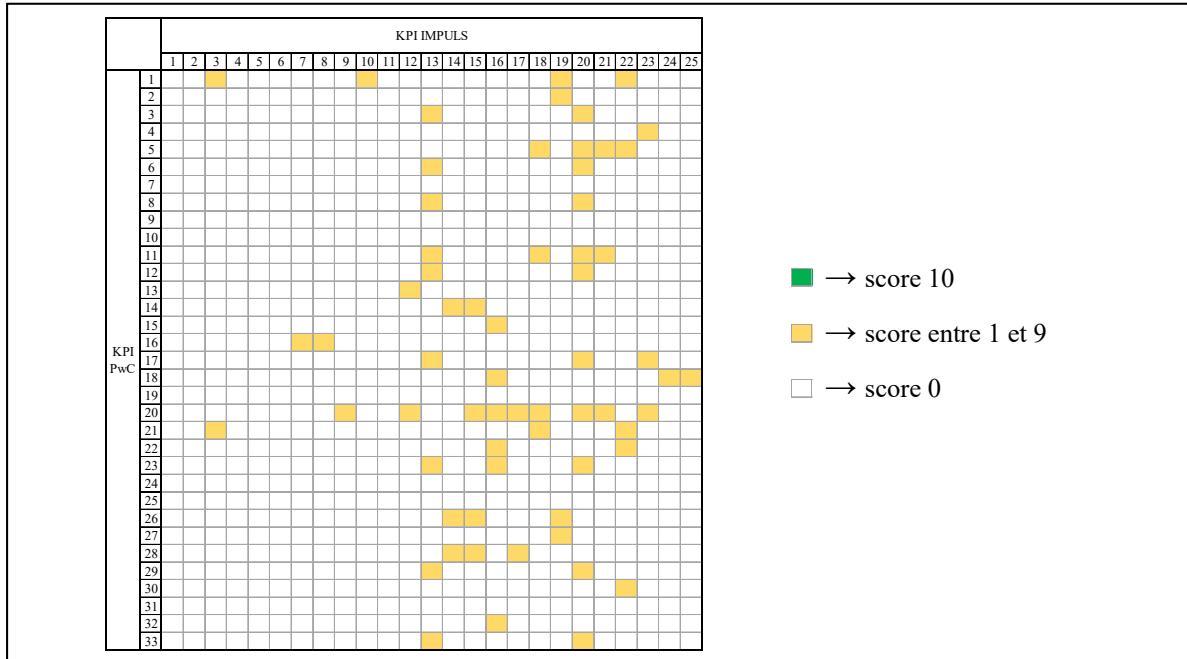


Figure 4.2 Matrice de comparaison entre les modèles IMPULS et PwC obtenue avec la méthode de comparaison semi-automatique

L'outil informatique, qui contient les équations présentées dans la section 3.3, permet d'obtenir la matrice de comparaison $MSAmat^{IMP,PWC}$. Cette matrice est présentée sur la Figure 4.2.

La comparaison des mots-clés permet d'obtenir 64 correspondances entre les KPI des modèles IMP et PWC. Ainsi, pour cette matrice, le taux de remplissage $\mathcal{X}_{Remplissage,MSA}^{IMP,PWC}$ est de 7,5 %, ce qui est légèrement supérieur au taux de remplissage de la méthode manuelle.

Les experts ont ensuite vérifié chacune de ces correspondances. À partir de cette relecture, il est possible de noter que certaines correspondances sont correctes, cependant d'autres correspondances sont détectées alors que les KPI ne sont pas liés. En effet, l'utilisation d'un même mot-clé dans deux contextes différents peut conduire à une fausse correspondance (ou « faux positif »). Les experts doivent donc analyser les deux matrices de comparaison obtenues avec les modèles IMP et PWC.

4.3 Ajustement des matrices de comparaison

Les deux matrices de comparaison, $MMmat^{IMP,PWC}$ et $MSAmat^{IMP,PWC}$ présentées dans les sous-sections précédentes, donnent des correspondances différentes entre les deux modèles de maturité étudiés. Un ajustement de ces 2 matrices de comparaison, correspondant à l'étape (3) sur la Figure 3.7, est nécessaire pour valider la méthode semi-automatique.

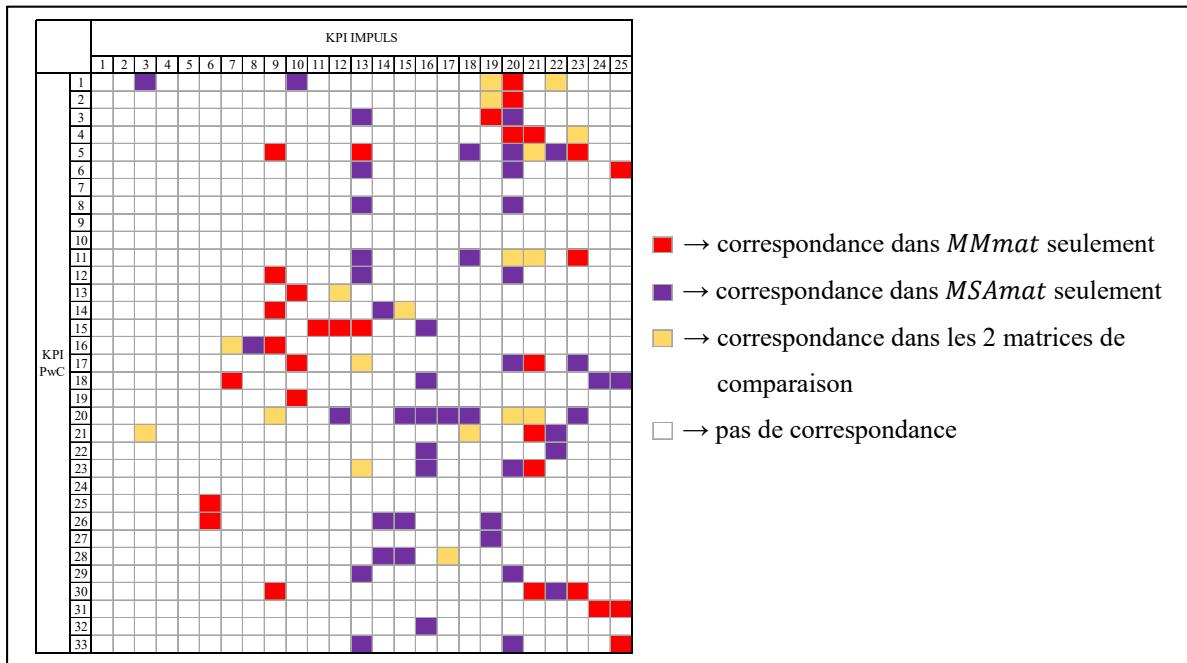
4.3.1 Résultats de la superposition des matrices de comparaison

Dans cette section, il est proposé de comparer les résultats des deux méthodes de comparaison présentés précédemment. Une première matrice de superposition $SPmat^{IMP,PWC}$ est créée pour observer les différences et les similarités entre les deux matrices de comparaison, $MMmat^{IMP,PWC}$ et $MSAmat^{IMP,PWC}$. Cette première matrice $SPmat^{IMP,PWC}$, présentée à la Figure 4.3, montre plusieurs cas de correspondances, discutés ci-après.

Dans un premier temps, cette matrice montre que les deux méthodes convergent sur certaines correspondances entre les couples de KPI des modèles IMP et PWC. Elles sont repérées par les éléments jaunes dans la matrice $SPmat^{IMP,PWC}$. Ainsi, sur les 49 correspondances identifiées par les experts, la méthode semi-automatique parvient à en repérer seulement 18.

Les éléments violets (46) sont les correspondances qui ont été relevées uniquement avec la méthode semi-automatique. Après relecture, la majorité de ces éléments ne sont pas des

correspondances valides (« faux positifs »), c'est-à-dire qu'il n'y a pas réellement de correspondance entre les KPI du couple.



Les autres correspondances, sont celles notées uniquement dans la matrice $MMmat^{IMP,PwC}$ et requièrent une analyse plus particulière à l'étape d'ajustement (section suivante). En effet, l'objectif avec la méthode semi-automatique est de retrouver au moins toutes les correspondances identifiées avec la méthode de comparaison manuelle. Les 31 éléments rouges de la matrice $SPmat^{IMP,PwC}$ correspondent aux couples de KPI qui doivent changer de couleur et devenir jaune pour valider la méthode de comparaison semi-automatique.

4.3.2 Ajustement des méthodes de comparaison manuelle et semi-automatique

Des modifications ont donc été opérées sur les mots-clés. En effet, les experts ont changé les mots-clés de certains KPI des modèles IMP et PWC pour mieux les caractériser. De plus, la

classification des mots-clés dans la matrice $MCmat$ a été modifiée, ce qui a impacté la matrice $MSAmat^{IMP,PWC}$.

Ensuite, pour éliminer les derniers éléments rouges de la matrice $SPmat^{IMP,PWC}$, les experts ont relu toutes les correspondances de la matrice $MMmat^{IMP,PWC}$ pour s'assurer du lien identifié pour chaque couple de KPI. Cette relecture a engendré une modification de la matrice $MMmat^{IMP,PWC}$.

Après plusieurs itérations, les experts sont parvenus à faire correspondre les deux matrices de comparaison $MMmat^{IMP,PWC}$ et $MSAmat^{IMP,PWC}$, qui sont montrés sur la Figure 4.4.

Tout d'abord, le nombre de mots-clés permettant de caractériser les KPI des modèles IMP et PWC est passé de 133 à 139 mots-clés. Le classement dans la matrice de mots-clés $MCmat$ a également évolué. Les experts ont constitué des lignes correspondant à des concepts plus généraux. Ils ont alors distingué 57 concepts (contre 62 précédemment). De plus, le nombre moyen de mots-clés employés pour caractériser chaque KPI est toujours d'environ 3 mots-clés (avec un écart-type de 1). Ainsi, les experts doivent définir autant de mots-clés que d'éléments importants pour chaque KPI de la littérature et ne pas oublier une potentielle correspondance.

La matrice de comparaison $MMmat^{IMP,PWC}$ (à gauche sur la Figure 4.4) montre que le nombre de correspondances a diminué. En effet, lors de la relecture, les experts ont revu leur jugement sur 11 correspondances partielles pour lesquelles le lien entre les KPI concernés n'était pas évident. Cette révision de la matrice $MMmat^{IMP,PWC}$ transforme 20 % des correspondances partielles en correspondances nulles. Il est possible de noter, dans un même temps, que les correspondances fortes ont été validées. Ainsi, le taux de remplissage de cette matrice a diminué pour atteindre la valeur de 4,7 %.

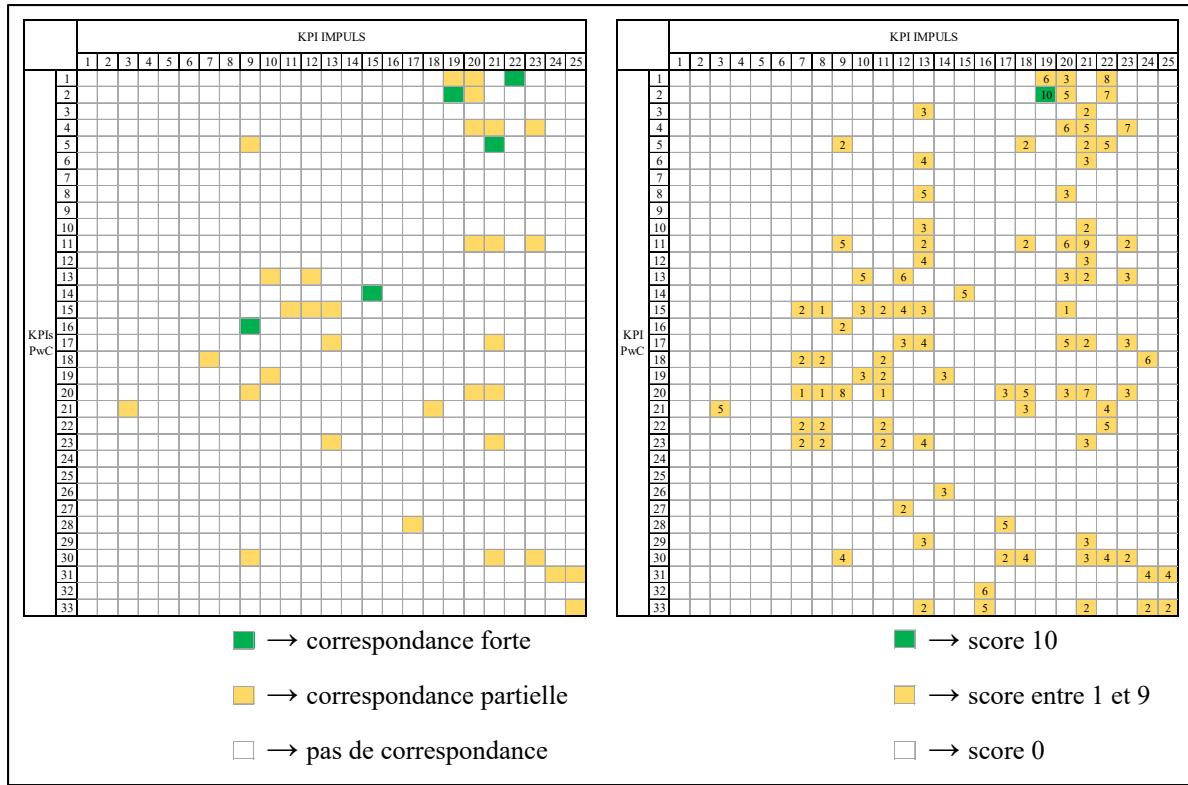


Figure 4.4 Résultat des modifications des matrices de comparaison des modèles IMPULS et PwC avec les méthodes de comparaison manuelle (à gauche) et semi-automatique (à droite)

L'effet inverse est observé pour la matrice de comparaison $MSAmat^{IMP,PwC}$ (à droite sur la Figure 4.4). Le nombre de correspondances a augmenté à la suite des modifications (+ 31) et la matrice $MSAmat^{IMP,PwC}$ a atteint un taux de remplissage de 11,5 %. Cette augmentation est considérée comme raisonnable. En effet, la **méthode semi-automatique permet d'éviter la comparaison de 88,5 % des couples de KPI** des modèles IMP et PwC, ce qui représente environ 734 comparaisons. Le gain de temps proposé par la méthode semi-automatique est donc non négligeable.

Les scores visibles sur la matrice $MSAmat^{IMP,PwC}$ (à droite sur la Figure 4.4) sont calculés à l'aide de la fonction (3.5) présentée dans le chapitre 3, mais avec une matrice $MCmat$ différente de celle présentée dans l'annexe IV.

Ainsi, il est possible de noter que toutes les correspondances identifiées par les experts avec la méthode de comparaison manuelle sont également repérées avec la méthode de comparaison semi-automatique. En effet, la matrice $SPmat^{IMP,PWC}$ ne contient plus d'éléments rouges (Figure 4.5).

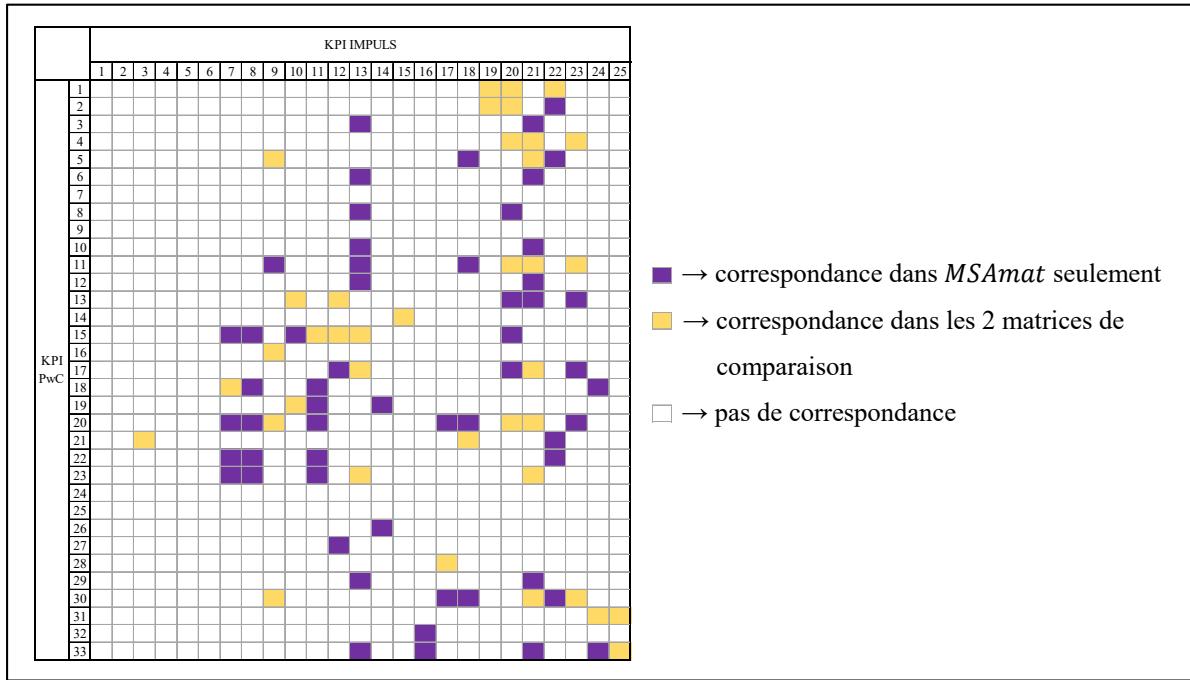


Figure 4.5 Matrice de superposition des résultats de la comparaison des modèles IMPULS et PwC après ajustements

Dans les nouvelles correspondances observées avec la méthode de comparaison semi-automatique, certaines concordent avec celles identifiées avec la première méthode de comparaison alors que d'autres sont des « faux positifs » (éléments violets). Les modifications sur les matrices de comparaison engendrent l'apparition de 11 « faux positifs » supplémentaires, soit un total de 57 « faux positifs ».

La méthode de comparaison semi-automatique permet de retrouver toutes les correspondances identifiées par les experts avec la première méthode de comparaison pour les modèles IMP et PWC, ainsi que d'autres correspondances supplémentaires. L'attribution de mots-clés à chacun des KPI et le classement des mots-clés dans la matrice *MCmat*

permettent de regrouper les KPI de la littérature autour de concepts qui guideront le travail de synthèse des experts.

4.4 Résultats de la comparaison semi-automatique des KPI de la littérature

Ces divers ajustements permettent alors d'exploiter la méthode de comparaison semi-automatique avec l'ensemble des modèles de maturité retenus (correspondant à l'étape (4) sur la Figure 3.7). **Quatre experts ont été impliqués dans la démarche de comparaison** et, lors de chacune des rencontres, au moins trois experts étaient présents.

Plusieurs itérations, et donc plusieurs rencontres entre les experts, ont été nécessaires pour s'assurer que les KPI de la littérature rédigés n'ont pas été l'objet d'une surinterprétation des questions et des réponses de chacun des modèles d'origine et qu'ils soient « autonomes ». En effet, les experts ont intégré dans l'énoncé des KPI le nom des dimensions pour obtenir une meilleure retranscription du concept mis de l'avant par chaque ensemble de questions et de réponses de la source originale.

Ainsi, à la fin de l'étape de rétro-ingénierie, 13 listes de KPI de la littérature (incluant les listes de KPI pour les modèles IMP et PWC) ont été obtenues. Le regroupement de ces listes représente 451 KPI, incluant quelques répétitions. En effet, lors de la rédaction des KPI de la littérature, il est possible d'observer que certains modèles retenus exploitent des questions et des réponses d'autres modèles.

Le Tableau 4.3 résume le nombre de KPI rédigés lors de l'étape de rétro-ingénierie de chacun des modèles de maturité numérique.

Tableau 4.3 Nombre de KPI rédigés en fonction du modèle de maturité numérique

\mathcal{M}^i	IMP	PWC	ADN	BPI	SCR	FOR	AKD	MED	CEG	WAR	MAC	SIN	AGE
n_j^i	25	33	50	25	39	28	69	33	18	39	51	16	25

La comparaison du nombre de questions dans chacun des modèles de maturité retenus (Tableau 4.1) et le nombre de KPI rédigés (Tableau 4.3) montre que **chaque question conduit à la rédaction d'un KPI dans la majorité des cas**.

4.4.1 Analyse générale des mots-clés employés

En suivant la démarche proposée dans le chapitre 3 et les conclusions tirées de l'étape d'ajustement (sous-section 4.3.2), **263 mots-clés différents** ont été définis et utilisés pour caractériser les **451 KPI rétro-conçus**.

Une première observation est à noter sur le nombre de mots-clés par KPI de la littérature. En effet, ce nombre varie entre 1 et 8. De manière plus générale, le nombre de mots-clés attribués à chaque KPI de la littérature est en moyenne de 3 (avec un écart-type de 1). Ainsi, environ **85 % des 451 KPI comptent entre 2 et 4 mots-clés**.

Une analyse plus fine montre que moins de 30 % des KPI de la littérature sont caractérisés par un ou deux mots-clés. Parmi ces KPI, moins de 10 % possèdent un seul mot-clé. Pour donner suite à l'étape d'ajustement, les experts ont donc veillé à attribuer suffisamment de mots-clés à chaque KPI de la littérature pour que l'étape de comparaison automatique, via l'outil informatique, révèle toutes les correspondances possibles. Dit autrement, les correspondances que les experts auraient pu trouver après leur lecture des KPI deux à deux doivent être identifiées, quitte à augmenter le nombre de « faux positifs » dans les correspondances identifiées.

4.4.2 Classification des mots-clés et identification de dimensions et de sous-dimensions

L'ensemble des mots-clés employés a ensuite été classé dans la matrice de mots-clés $MCmat$. Cette matrice est présentée dans l'annexe IV. Chaque ligne de cette matrice représente une sous-dimension, notée \mathcal{SD}_l^k , et un groupement de lignes correspond à une dimension, notée \mathcal{D}_k .

Les 263 mots-clés sont répartis dans 58 sous-dimensions. Le nombre de mots-clés par sous-dimension est variable. Il est possible qu'une sous-dimension soit représentée par seulement 1 mot-clé alors que la sous-dimension avec le plus de mots-clés en compte 15.

Ensuite, les experts ont regroupé ces sous-dimensions pour former des dimensions. Douze dimensions ont été obtenues. Le nombre de sous-dimensions par dimension varie entre 2 et 10.

Tableau 4.4 Dimensions et sous-dimensions déduites de la matrice $MCmat$

#	Dimension \mathcal{D}_k	Sous-dimensions \mathcal{SD}_l^k
1	Business, strategy & governance	Business model & strategy, Digital awareness, Digital strategy, Digital plan & roadmap, Digital leadership, Implementation & deployment, Societal factors, Performance management, Digital risk management, IP management.
2	Smart portfolio & customer service	Organization's portfolio, Smart products & services, Customization, Configuration tools, Dynamic pricing, After-sales services.
3	Human resources	Management modes, Managers involvement, Hiring, Working modes, Change management, Skills & expertise, Training.
4	Digital security & compliance	Digital security, Digital compliance.
5	Finance	Investment, Funding, Finance.
6	Innovation & knowledge management	Innovation management, Technological watch, Knowledge, Traceability.
7	IT & software tools	IT technologies, Infrastructure, IT integration, Cloud services, Software tools, Upgradability & maintenance.
8	Digital data	Digital twin, Data as an asset, Data acquisition & processing, Data usage, Data sharing, Data recovery.
9	Smart manufacturing	Autonomous workpiece, Production digitalization, Agility, Inventory.
10	Internal value chain digitalization	Internal activities integration, Internal collaboration, Lifecycle simulation, Development process.
11	External value chain digitalization	External activities integration, Customer experience, External collaboration, Supply chain & logistics.
12	Sales & marketing	Selling & purchasing, Communication & marketing.

Ce découpage en **12 dimensions et 58 sous-dimensions** est la structure finale retenue par les experts. En effet, cette structure a évolué entre le début et la fin de la démarche de synthèse et est discutée dans le chapitre suivant.

Ces dimensions ont été obtenues après avoir classé les mots-clés, et leur création a donc été influencée par les modèles de maturité retenus pour l'étude. Le Tableau 4.4 montre brièvement les dimensions définies à partir de la matrice *MCmat* ainsi que les sous-dimensions associées.

Ce découpage en dimensions et sous-dimensions a obligé les experts à se doter de définitions pour préciser les nuances entre certains termes rencontrés dans les modèles de maturité retenus. En effet, les termes « modèle d'entreprise », « plan stratégique », « stratégie numérique », « plan numérique » et « feuille de route » sont apparus dans les modèles de maturité étudiés. Des définitions ont été examinées pour établir une distinction claire entre ces termes et les classer dans la matrice des mots-clés *MCmat*. Ces définitions sont proposées dans le Tableau 4.5.

À partir de ces définitions, les experts ont décidé de **regrouper les 5 termes en 3 concepts**. Le premier regroupe les termes « modèle d'entreprise » et « plan stratégique » (« Business model & strategy »), le deuxième contient le terme « stratégie numérique » (« Digital strategy ») et le troisième comporte les termes « plan numérique » et « feuille de route » (« Digital plan and roadmap »).

Du fait de cette classification, il faut comprendre que les termes « modèles d'entreprise » et « plan stratégique » sont de plus haut niveau et regroupent d'autres notions sans lien avec la transformation numérique. La « stratégie numérique » est une partie du « plan stratégique » qui implique l'intégration de nouvelles technologies numériques dans la stratégie globale de l'entreprise. Enfin, le « plan numérique » et la « feuille de route » sont d'un niveau plus opérationnel. Ces documents contiennent les actions à mettre en place en lien avec la « stratégie numérique » et, plus globalement, avec la transformation numérique.

Tableau 4.5 Définitions des termes autour de la dimension
 « Business, strategy & governance »

Terme	Définition
Modèle d'entreprise (en anglais « Business model »)	Document exposant la stratégie de l'entreprise en indiquant la direction dans laquelle elle souhaite se développer et en montrant les éléments qui lui permettront de progresser (par exemple, le bilan économique, les personnes, les institutions et les entreprises visées ainsi que les produits et les services proposés) (The Open Group, 2018b ; Office québécois de la langue française, 2016).
Plan stratégique (en anglais « Strategic plan »)	Plan à long terme dans lequel l'entreprise définit son ou ses objectifs fondamentaux ainsi que les actions (par exemple, échéancier détaillé, responsables) et les ressources (humaine, financière, matérielle/immatérielle) mises en place en lien avec ses choix stratégiques (Office québécois de la langue française, 2008 ; Gouvernement du Canada, 2009a).
Stratégie numérique (en anglais « Digital strategy »)	Stratégie regroupant la vision, les objectifs et les activités d'une entreprise afin de faire évoluer/d'accroître sa communication, ses avantages/attrait commerciaux et son portefeuille de produits et services à travers l'intégration de nouvelles technologies numériques (Gouvernement du Canada, 2009b). Le but de cette stratégie peut être de renforcer le lien avec la clientèle (par exemple, application, réseaux sociaux, collaboration), offrir de nouveaux produits et intégrer de nouveaux marchés (vente en ligne) ou encore optimiser son service marketing (PricewaterhouseCoopers, 2019).
Plan numérique (en anglais « Digital plan »)	Document qui contient les objectifs globaux et les grandes étapes nécessaires à une entreprise pour initier l'intégration d'une nouvelle technologie ou la transformation de sa structure (Gouvernement du Québec, s.d.).
Feuille de route (en anglais « Roadmap »)	Document contenant la stratégie, les objectifs ainsi qu'un échéancier clair et détaillé (par exemple, dates, responsables) des différentes étapes d'un projet de transformation. Il permet d'avoir une vue d'ensemble et de suivre l'évolution sur le déploiement d'une ou plusieurs nouvelles technologies (The Open Group, 2018a ; Garcia & Bray cités par Mittal et al., 2018b ; Office québécois de la langue française, 2018a). La principale différence à noter avec le plan numérique est que ce dernier ne contient pas d'échéancier et se limite à énoncer les grandes étapes non ordonnancées par lesquelles une entreprise doit passer sans les détailler, alors que la feuille de route reprend chaque étape et les découpe en plusieurs projets et sous-projets.

Par ailleurs, lors de l'analyse des modèles IMP et PWC, les experts ont rencontré les termes « Vertical integration » et « Horizontal integration ». Dans leur rapport sur l'« Industrie 4.0 », Kagermann et al. (2013) indiquent que ces termes désignent, dans le domaine de la production et de l'informatique, une intégration des systèmes informatiques dans les différents niveaux hiérarchiques d'une entreprise, et dans le processus de fabrication au sein d'une entreprise et entre plusieurs entreprises respectivement. Cependant, selon le

dictionnaire de l'Office québécois de la langue française (2006), ces termes sont utilisés dans le domaine de l'économie et de la gestion pour désigner l'acquisition d'une entreprise par une autre. Pour le premier terme « Vertical integration », il s'agit de l'intégration d'une activité dans le processus de production d'une entreprise. Pour le second terme « Horizontal integration », il s'agit de l'intégration d'une activité similaire à celle de l'entreprise pour réduire la concurrence.

Pour éviter toute confusion, les experts ont choisi d'utiliser le terme **Numérisation de la chaîne de valeur interne** (en anglais « Internal value chain digitalization ») pour désigner l'intégration de systèmes numériques dans l'entreprise elle-même (par exemple, dans les systèmes de contrôle, de gestion de la production, de la fabrication et de planification de l'entreprise) (Kagermann et al., 2013).

Pour le second terme, les experts ont favorisé l'emploi de **Numérisation de la chaîne de valeur externe** (en anglais « External value chain digitalization ») pour désigner l'intégration de systèmes numériques autour des différentes étapes de fabrication et de logistique dans l'entreprise (par exemple, pour la logistique entrante, la production et le marketing) et avec ces partenaires pour créer un réseau de valeur (Kagermann et al., 2013).

La définition de certains concepts et le classement des mots-clés dans la matrice *MCmat* permettent de comparer les KPI. Les dimensions, et les sous-dimensions qui les composent constitueront une structure pour la liste d'indicateurs de maturité numérique recherchée lors de la synthèse.

4.4.3 Convergence des résultats

Avant de discuter des résultats obtenus avec la méthode de comparaisons semi-automatique et ceux provenant des indicateurs statistiques, une analyse de la matrice de mots-clés *MCmat* est proposée. L'évolution du nombre de mots-clés donne une première indication sur la

convergence des résultats, c'est-à-dire que l'analyse de nouveaux modèles de maturité n'introduit pas une multitude de nouveaux concepts.

En effet, les mots-clés placés dans la matrice *MCmat* ne sont pas apparus qu'avec l'étude du premier modèle de maturité IMP. Chacun des modèles de maturité possède son propre vocabulaire et ces propres zones d'intérêts, entraînant l'ajout de nouveaux mots-clés. Ainsi, les experts ont utilisé 263 mots-clés.

La Figure 4.6 montre ainsi l'apparition de nouveaux mots-clés en fonction du modèle de maturité étudié. L'axe des abscisses représente les modèles de maturité retenus pour l'étude, et il peut être confondu avec le temps, car les modèles de maturité ont été traités dans cet ordre chronologique.

Il est possible d'observer, à l'aide de la Figure 4.6, qu'environ 60 % des mots-clés de la matrice *MCmat* (165 sur les 263 mots-clés) ont été utilisés dans les 3 premiers modèles (IMP, PWC et ADN). Les autres modèles de maturité engendrent l'ajout d'une dizaine de nouveaux mots-clés chacun en moyenne. Ainsi, le nombre de mots-clés se stabilise.

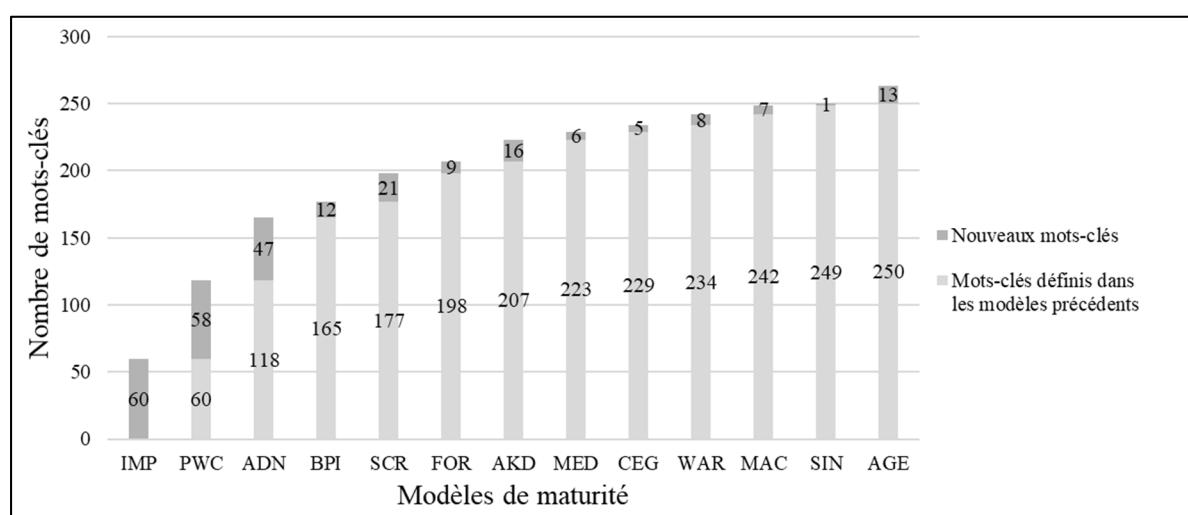


Figure 4.6 Évolution chronologique du nombre de mots-clés

Cependant, l'unique observation des mots-clés ne permet pas de valider la convergence des résultats. En effet, il se peut que l'apparition d'un mot-clé engendre soit l'identification d'une variante d'un concept existant, soit l'identification d'un nouveau concept et donc d'une nouvelle sous-dimension. La Figure 4.7 révèle l'évolution du nombre de sous-dimensions SD_l^k en fonction des modèles de maturité analysés. Comme sur la Figure 4.6, l'axe des abscisses de la Figure 4.7 peut être assimilé à un axe temporel.

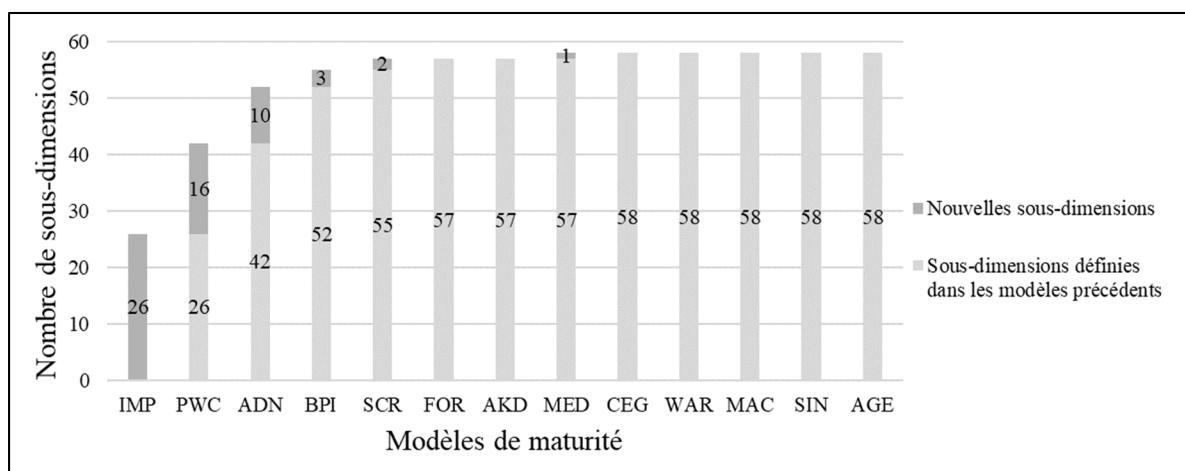


Figure 4.7 Évolution chronologique du nombre de sous-dimensions

Le graphique sur la Figure 4.7 suit la même évolution que le graphique précédent. Ici, 90 % des concepts, qui sont devenus des sous-dimensions, ont été repérés à l'aide des 3 premiers modèles de maturité (IMP, PWC et ADN). Ainsi, les 10 autres modèles de maturité ont permis l'identification de seulement 6 concepts. Après l'analyse du modèle MED, de nouveaux mots-clés ont été ajoutés dans la matrice *MCmat* (Figure 4.6), mais aucun nouveau concept n'a été identifié (Figure 4.7).

Cette **convergence des mots-clés et sous-dimensions** permet de **valider le résultat de l'étude**. En effet, bien que des modèles, comme AKD et WAR, s'inspirent de deux modèles retenus (IMP et PWC), d'autres, comme MAC, ont été créés indépendamment. Ainsi, le fait qu'aucune sous-dimension n'ait été identifiée dans les modèles de maturité après le traitement du modèle MED montre que les KPI des modèles CEG à AGE apportent des

nuances à des concepts qui ont déjà été identifiés dans des KPI de la littérature précédemment traités. Ces nuances confirment et valident les concepts identifiés par les experts.

Même si ces observations dépendent fortement de l'ordre dans lequel les modèles de maturité sont traités, la convergence des 2 graphiques, et notamment le deuxième (Figure 4.7), indique que les concepts identifiés, et analysés dans la sous-section suivante, sont présents dans différents modèles. Cette **répétabilité** est un **critère pour valider la liste de KPI CAN** correspondant à l'objectif de ce mémoire.

Si la convergence n'avait pas pu être observée, cela aurait voulu dire qu'il fallait continuer à chercher de nouveaux modèles de maturité numérique afin de couvrir l'ensemble des concepts liés à la maturité des entreprises.

4.4.4 Analyse des matrices de comparaison obtenues avec la méthode semi-automatique

Tous les KPI de la littérature sont caractérisés par des mots-clés et ces derniers sont classés dans la matrice $MCmat$. À présent, il est possible de comparer tous les KPI des 13 modèles de maturité retenus avec l'outil informatique et les formules présentées au chapitre 3.

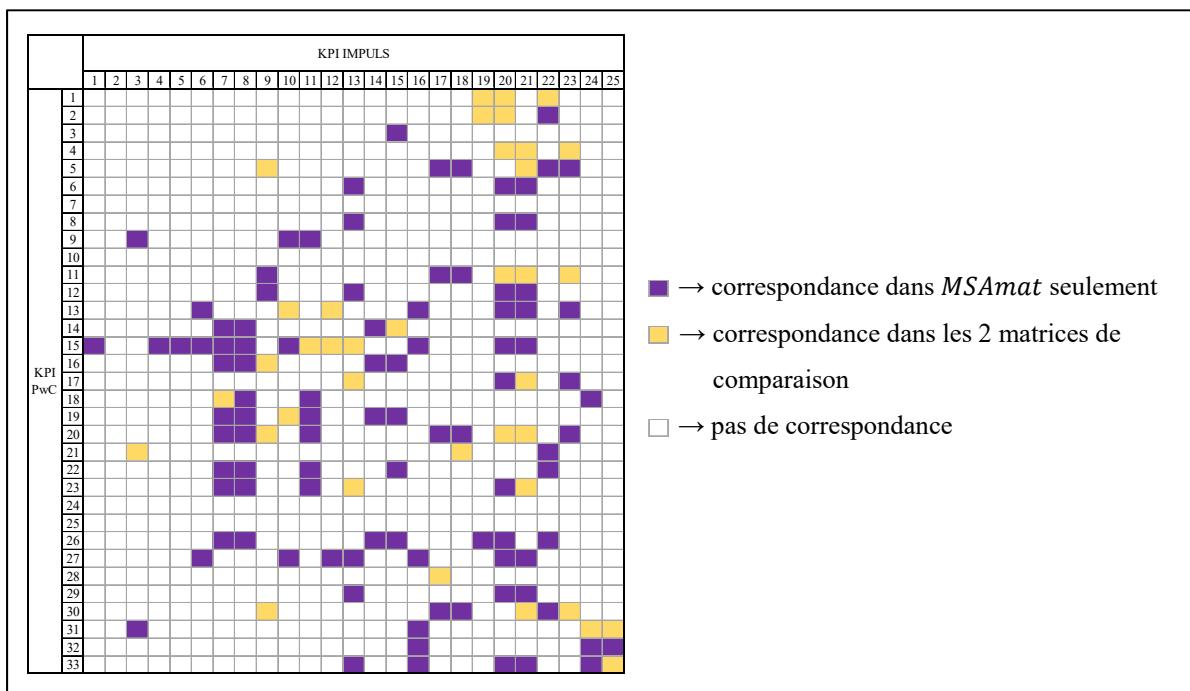
La généralisation de la méthode de comparaison semi-automatique a amené à revoir la matrice de mots-clés et a, par conséquent, modifié le résultat contenu dans la matrice de comparaison $MSAmat^{IMP,PWC}$ (à droite sur la Figure 4.4).

Une nouvelle révision de la matrice $MCmat$ est causée par l'apparition de nouveaux mots-clés et les experts ont revu la classification des mots-clés.

La matrice de superposition présentée sur la Figure 4.5 a changé. Il faut alors observer l'impact des modifications de la matrice $MCmat$ sur la matrice $MSAmat^{IMP,PWC}$ et si toutes les correspondances identifiées manuellement, lors de la comparaison des modèles IMP et

PWC, le sont toujours avec la méthode de comparaison semi-automatique. De plus, un exemple de calcul d'une correspondance entre deux KPI des modèles IMP et PWC est présenté dans l'annexe V.

La Figure 4.8 est le résultat de la superposition des matrices de comparaison des méthodes manuelle, $MMmat^{IMP,PWC}$, et semi-automatique, $MSAmat^{IMP,PWC}$, avec la nouvelle matrice de mots-clés $MCmat$ (annexe IV). Le premier constat est que **toutes les correspondances identifiées avec la méthode de comparaison manuelle sont retrouvées avec la méthode de comparaison semi-automatique**. En effet, la matrice présentée en Figure 4.8 ne possède aucun élément rouge. Cependant, le nombre d'éléments « faux positifs » (éléments violets) a augmenté et est à présent égal à 100. Ce nombre a quasiment doublé à comparer à la matrice présentée sur la Figure 4.5 à la fin de l'étape d'ajustement.



Le taux de remplissage de la matrice $MSAmat^{IMP,PWC}$ a alors augmenté pour atteindre la valeur de 16,7 %. Cette valeur montre toujours l'intérêt de la méthode semi-automatique, puisque la méthode permet d'éviter près de 83 % des comparaisons possibles pour les modèles IMP et PWC.

La généralisation de la méthode semi-automatique a permis d'obtenir **78 matrices de comparaison $MSAmat$ différentes** avec les 13 modèles de maturité numérique. Toutes ces matrices ne sont pas présentées en détail, mais une observation du taux de remplissage de ces matrices est proposée.

La Figure 4.9 montre les différents taux de remplissage, $\mathcal{X}_{Remplissage,MSA}$, pour chaque matrice de comparaison $MSAmat$, en pourcentage. En moyenne, ce taux est de 16,8 % (avec un écart-type de 5,1 %). Ainsi, pour chaque matrice de comparaison et sur toutes les correspondances possibles, seuls 16,8 % des couples de KPI partagent au moins un concept commun.

IMP	IMP													
PWC	16,7	PWC												
ADN	16,6	17,7	ADN											
BPI	12,0	15,2	19,0	BPI										
SCR	13,1	12,7	18,7	12,0	SCR									
FOR	15,7	17,9	19,9	17,1	20,8	FOR								
AKD	18,9	19,0	18,4	15,2	14,9	19,7	AKD							
MED	10,2	12,8	13,2	20,2	10,6	18,5	11,4	MED						
CEG	7,3	11,6	13,1	20,9	8,7	17,1	9,1	19,5	CEG					
WAR	16,2	17,7	15,1	10,3	15,1	16,1	18,8	7,5	5,7	WAR				
MAC	18,1	14,4	22,0	17,9	27,0	26,5	20,4	18,5	16,7	17,9	MAC			
SIN	21,5	19,7	20,9	17,5	26,6	17,9	19,3	15,3	11,8	17,8	29,7	SIN		
AGE	13,0	12,1	18,0	29,1	19,0	12,6	10,3	22,3	28,0	8,0	21,6	23,8	AGE	

Figure 4.9 Taux de remplissage (en pourcentage) des matrices de comparaison $MSAmat$

Les modèles de maturité qui partagent le plus faible nombre de concepts communs, au travers des KPI, sont les modèles CEG et WAR. Le taux de remplissage est de seulement 5,7 %. À l'inverse, les modèles de maturité MAC et SIN sont les modèles qui ont le plus de concepts communs, $\chi_{Remplissage,MSA}^{MAC,SIN} = 29,7 \%$.

Donc, la **méthode semi-automatique évite aux experts de comparer environ 83 % des couples de KPI de la littérature**, en moyenne, qui n'ont aucun lien entre eux. Cette méthode implique, certes, la définition et le classement de mots-clés qui ne sont pas nécessaires dans la méthode de comparaison manuelle. Cependant, le nombre de correspondances entre chaque modèle est peu élevé, vis-à-vis du nombre de possibilités, et la méthode de comparaison semi-automatique permet un gain de temps non négligeable pour la comparaison des modèles de maturité numérique.

Après avoir discuté de la matrice de mots-clés et du nombre de correspondances entre les KPI de la littérature dans chaque matrice de comparaison, une analyse des indicateurs statistiques présentés dans la sous-section 3.3.4 permet de comparer les modèles entre eux et avec les dimensions et sous-dimensions définies dans la matrice de mots-clés.

4.5 Comparaison des modèles de maturité étudiés

Cette section s'appuie sur les différents résultats obtenus au travers de 2 indicateurs statistiques qui sont la couverture des dimensions \mathcal{D}_k (celles présentes dans *MCmat*, Tableau 4.4) et l'appui des sous-dimensions par les modèles de maturité retenus. Ces indicateurs statistiques permettent d'analyser le degré de similarité entre les modèles et de connaître l'importance relative de chaque concept défini par les experts. Cette analyse des résultats de comparaison correspond à l'étape (5) sur la Figure 3.7.

4.5.1 Étude des similarités et des différences entre les modèles de maturité retenus

Il a été vu, dans le chapitre de revue de littérature (chapitre 1), que tous les modèles de maturité numérique ne portent pas sur les mêmes aspects de la transformation numérique. Cette sous-section s'attache à relever les points forts et les points faibles des 13 modèles de maturité numérique retenus.

La définition de l'indicateur statistique $\mathcal{X}_{\text{Couverture}, \mathcal{D}}^{i,k}$ permet d'**analyser la portée de chaque modèle de maturité**. Il s'agit de la couverture des dimensions, définies dans la matrice $MCmat$ et notées \mathcal{D}_k , par les modèles de maturité retenus. Le pourcentage, obtenu pour chaque dimension, représente le nombre de sous-dimensions qui font l'objet d'au moins un KPI par le modèle de maturité étudié. Une comparaison des modèles IMP et PwC est proposée sur la Figure 4.10.

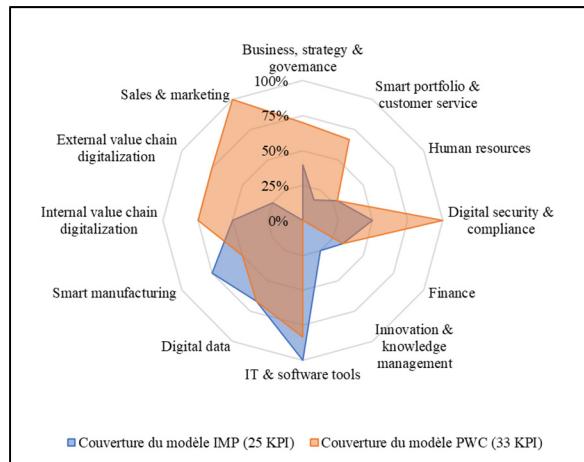


Figure 4.10 Comparaison de la couverture des modèles de maturité IMPULS et PwC selon les dimensions définies par les experts

Ainsi, le modèle IMP se concentre sur les dimensions « IT & software tools » et « Smart manufacturing ». Le modèle PwC s'intéresse également à la dimension « IT & software tools », mais aussi à « Internal value chain digitalization », « External value chain digitalization », « Digital security & compliance » et « Sales & marketing ». Pour certaines

dimensions (par exemple, « Sales & marketing), ces modèles de maturité sont complémentaires. En effet, cette dimension n'est pas évaluée dans le modèle IMP alors que le modèle PWC la couvre complètement. Cependant, si seuls ces deux modèles avaient été retenus pour l'étude, la liste de KPI recherchée ne couvrirait pas complètement les dimensions « Human resources » et « Innovation & knowledge management ». En effet, certains concepts ont été identifiés dans d'autres modèles, d'où la nécessité de prendre en compte un maximum de modèles de maturité numérique disponibles. Il s'agit donc de deux limitations pour IMP et PWC.

L'annexe VI présente individuellement chaque modèle retenu pour connaître les spécificités de chacun d'eux. Les modèles de maturité AKD et WAR ont la couverture la plus grande sur les dimensions \mathcal{D}_k identifiées. Cette couverture n'est, cependant, pas totale et montre la nécessité du travail réalisé dans ce mémoire, c'est-à-dire de créer une liste de KPI permettant l'évaluation la plus large de la maturité numérique des entreprises. Le modèle CEG, qui est un des modèles avec moins de 20 KPI, est celui qui a la plus petite couverture, mais il se concentre sur 2 dimensions particulières, « Human resources » et « Sales & marketing ». La plupart des graphiques montrent que tous les modèles de maturité couvrent totalement une ou plusieurs dimensions. Ainsi, ces résultats permettent aux experts de connaître la portée de chacun des modèles. Le modèle FOR est le seul qui ne couvre pas une dimension à 100 %. Il axe l'évaluation sur plusieurs dimensions sans les couvrir totalement.

Sur ces graphiques, il est possible de noter que toutes les dimensions sont couvertes au moins une fois à 100 % par un modèle de maturité. Seule la dimension « Business, strategy & governance » fait exception, mais il s'agit de la dimension la plus large (10 sous-dimensions) et 4 modèles couvrent 80 % de cette dimension. Chacun de ces modèles ne couvre pas les mêmes sous-dimensions. Ainsi, même si aucun modèle ne couvre entièrement la dimension « Business, strategy & governance », toutes ses sous-dimensions sont couvertes au minimum par deux modèles de maturité (Figure 4.11).

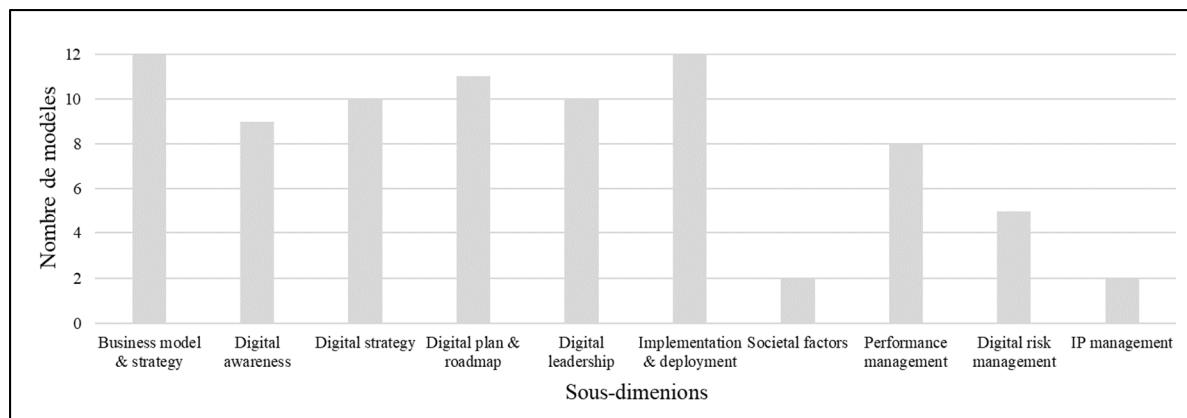


Figure 4.11 Couverture des sous-dimensions de la dimension « Business, strategy & governance » par les modèles de maturité retenus

Le fait que plusieurs modèles évaluent le même concept engendre l'apparition de nuances pour un même concept qui permettent de valider l'identification de ces dimensions et sous-dimensions.

4.5.2 Importance relative de chacune des sous-dimensions

Les indicateurs statistiques observés permettent d'identifier certaines similarités et différences entre les modèles de maturité retenus ainsi que leurs spécificités. À présent, il reste à évaluer l'importance relative des sous-dimensions à la lumière des appuis que chacune trouve sur les modèles de maturité retenus.

Les graphiques sur la Figure 4.7 et la Figure 4.10 montre que chaque concept peut être identifié dans différents modèles. Il faut donc repérer, pour chaque sous-dimension \mathcal{SD}_l^k , les modèles qui ont un KPI, au travers d'un ou plusieurs mots-clés, appartenant à cette sous-dimension.

L'indicateur statistique d'appui des sous-dimensions sur les modèles de maturité, noté $\chi_{Appui,SD}^{k,l}$, permet d'estimer l'importance relative des sous-dimensions les unes par rapport aux autres en fonction des modèles de maturité retenus. Les sous-dimensions sont

ensuite classées par ordre décroissant d'importance. Un extrait de ce classement est présenté dans le Tableau 4.6.

Tableau 4.6 Extrait du classement des sous-dimensions en fonction de leur appui sur les modèles de maturité retenus

Dimension	Sous-dimension	Appui de la sous-dimension	Nombre de KPI de la littérature
Human resources	Skills & expertise	100 %	45
IT & software tools	IT technologies	100 %	59
Business, strategy & governance	Business model & strategy	92 %	42
Business, strategy & governance	Implementation & deployment	92 %	59
IT & software tools	Software tools	92 %	63
Internal value chain digitalization	Internal activities integration	92 %	45
External value chain digitalization	External activities integration	92 %	59
Business, strategy & governance	Digital plan & roadmap	85 %	29
Human resources	Training	85 %	15
Digital security & compliance	Digital security	85 %	35
Smart manufacturing	Production digitalization	85 %	38
Business, strategy & governance	Digital strategy	77 %	51
Business, strategy & governance	Digital leadership	77 %	16
IT & software tools	IT integration	77 %	22
...
Digital data	Data recovery	15 %	4
Smart portfolio & customer service	Configuration tools	8 %	1

En moyenne, chaque sous-dimension est appuyée par 7 modèles de maturité, mais il y a une grande différence entre les sous-dimensions les plus et les moins importantes (écart-type de 3). Ainsi, 52 des 58 sous-dimensions définies ont été repérées dans au moins 3 modèles de maturité différents, soit 90 % des sous-dimensions.

Les sous-dimensions « Skills & expertise » et « IT technologies » sont les plus importantes relativement, car tous les modèles retenus les mentionnent au moins une fois, l'indicateur statistique d'appui est de 100 %. À l'opposé, la sous-dimension « Configuration tools » est appuyée par seulement un modèle de maturité.

Dans ce classement, les dimensions « Human resources », « IT & software tools » et « Business, strategy & governance » sont celles qui possèdent plusieurs sous-dimensions avec un indicateur statistique d'appui élevé.

La dernière colonne du Tableau 4.6 indique le nombre de KPI de la littérature en lien avec chacune des sous-dimensions et qui seront traités lors de la démarche de synthèse. Le classement de toutes les sous-dimensions est placé dans l'annexe VII.

Lors de la démarche de synthèse, les experts pourront s'appuyer sur ce classement pour commencer la rédaction de nouveaux KPI en sélectionnant les sous-dimensions avec l'appui le plus grand à partir des modèles de maturité retenus.

4.6 Synthèse

Ce chapitre a permis d'exposer tous les résultats de la comparaison des modèles de maturité retenus pour l'étude. La comparaison semi-automatique des KPI de la littérature, à l'aide des mots-clés attribués par un **minimum de trois experts**, a permis de dégager les correspondances entre les KPI des différents modèles de maturité retenus dans les matrices *MSAmat* et de proposer une **structure, composée de dimensions et de sous-dimensions**, qui couvre l'ensemble des KPI identifiés dans la littérature.

Les **13 modèles de maturité numérique retenus** couvrent plusieurs concepts de la maturité numérique, tels que suggérés par l'indicateur statistique de couverture des dimensions, $\chi_{\text{Couverture},\mathcal{D}}^{i,k}$, ainsi que de multiples nuances d'un même concept entre les modèles, tel que

suggéré par l'indicateur statistique d'appui des sous-dimensions, $\mathcal{X}_{Appui,SD}^{k,l}$. Ces indicateurs permettent de valider les résultats présentés dans ce chapitre.

En effet, le fait que plusieurs experts - ceux ayant contribué à la création des différents modèles de maturité retenus - aient considéré un même concept dans différents modèles de maturité numérique donne un poids plus important à ce concept. Cette analyse a permis d'identifier les sous-dimensions les plus présentes dans les modèles de maturité et autour desquelles il est possible d'observer un consensus des auteurs de ces modèles.

Finalement, il a été possible de **caractériser et de comparer la portée de chacun des modèles** de même que les potentiels manquements dans les modèles de maturité retenus. L'étape de caractérisation et de comparaison des modèles de maturité retenus étant complétée, la liste des KPI de la littérature structurés en dimensions et sous-dimensions servira d'intrant au travail des experts dans une démarche de synthèse des KPI de la littérature en une nouvelle liste de KPI CAN.

CHAPITRE 5

RÉSULTATS DU TRAVAIL DE SYNTHÈSE DES KPI DE LA LITTÉRATURE

Le chapitre 4 se focalisait sur la comparaison des modèles retenus et présentait la structure en dimensions et sous-dimensions menant à la synthèse des KPI de la littérature. Les mots-clés, les matrices de comparaison et les indicateurs statistiques sont autant d'éléments sur lesquels les experts peuvent s'appuyer pour rédiger les nouveaux KPI.

Dans ce chapitre, les nouveaux KPI rédigés sont notés KPI CAN pour les distinguer de ceux rétro-conçus à partir des modèles de maturité retenus et analysés au chapitre précédent.

À présent, il faut créer une liste de KPI CAN pour **synthétiser les 451 KPI** de la littérature en une liste d'environ 80 KPI CAN qui représentent l'ensemble des concepts organisés en dimensions et sous-dimensions. Pour réaliser cette synthèse, la démarche détaillée dans la section 3.5 est mise en place et correspond à l'étape (6) sur la Figure 3.7 et à l'ensemble des étapes illustrées à la Figure 3.4.

Ainsi, dans un premier temps, une présentation du déroulement du travail de synthèse des KPI de la littérature est proposée. Un exemple permet de montrer le travail réalisé par les experts pour chacune des sous-dimensions, suivant les étapes de la Figure 3.4. Dans un second temps, la liste de KPI CAN, résultante du travail de synthèse, est présentée. Cette liste sera analysée par rapport à l'ensemble des modèles retenus pour l'étude avec les mêmes indicateurs statistiques employés dans le chapitre 4. De plus, l'indicateur d'appui des KPI CAN permet **d'attribuer une importance relative à chacun des KPI CAN** et d'identifier les priorités lorsqu'une entreprise entreprend sa transformation numérique. Dans un troisième temps, une comparaison avec la liste de KPI rédigés par l'équipe allemande du projet DIMLA en utilisant les indicateurs statistiques est proposée.

5.1 Mise en place de la démarche de synthèse des KPI de la littérature

La comparaison des modèles de maturité a permis d'établir un classement des sous-dimensions en fonction du nombre de modèles qui évaluaient ce concept. Les experts vont s'appuyer sur ce classement pour établir l'ordre de traitement des sous-dimensions. La sous-section 5.1.1 décrit l'organisation du travail de synthèse qui a été suivie par les experts.

Ensuite, un premier outil informatique, présenté à la sous-section 3.5.1, permet de repérer les KPI de la littérature liés à chaque sous-dimension dans la liste des 451 KPI et de les présenter aux experts. Un exemple de synthèse des KPI de la littérature appartenant à une sous-dimension est proposé pour comprendre le travail réalisé par les experts.

5.1.1 Organisation du travail de synthèse des KPI

Les experts ont décidé de débuter la synthèse des KPI de la littérature en sélectionnant une dimension avec des sous-dimensions regroupant un faible nombre de KPI. Le choix s'est porté sur la dimension « Smart portfolio & customer service ». Cette dimension contient 6 sous-dimensions et a conduit à la rédaction de 8 KPI CAN.

Après s'être familiarisés avec la démarche de synthèse, les experts ont rédigé 30 KPI CAN en prenant successivement les KPI de la littérature liés aux 17 sous-dimensions les plus importantes. Cette liste devait contenir la synthèse des KPI de la littérature les plus importants des modèles de maturité retenus et permettre à une équipe du projet DIMLA de commencer la réalisation d'un modèle de maturité, et plus particulièrement d'un questionnaire. Cependant, l'indicateur statistique, $\chi_{Appui,KPI CAN}^{k,l}$ qui représente l'appui des KPI CAN sur les modèles de maturité retenus, montre qu'un KPI CAN lié à une sous-dimension importante n'est pas nécessairement important.

La stratégie consistant à synthétiser en priorité les sous-dimensions avec l'appui le plus élevé, sur les modèles retenus, a alors été abandonnée pour favoriser la synthèse des

dimensions. Ainsi, les experts ont suivi la méthodologie définie initialement. En effet, les dimensions, qui possèdent au moins un KPI CAN lié à une de ses sous-dimensions, sont sélectionnées pour synthétiser les autres sous-dimensions indépendamment de leur appui.

Une fois que toutes les dimensions partiellement complétées sont synthétisées, les autres dimensions sont analysées. Une dimension est sélectionnée si elle contient la sous-dimension la plus importante non synthétisée.

Pendant cette démarche de synthèse, les experts ont modifié les dimensions et les sous-dimensions. En effet, l'indicateur statistique $\chi_{Appui,SD}^{k,l}$ a montré que certaines sous-dimensions étaient spécifiques à un modèle de maturité et l'étude d'autres sous-dimensions a relevé qu'elles se concentraient sur un détail de la transformation numérique. Ainsi, le nombre de dimensions et de sous-dimensions a respectivement évolué de 13 et 68 à 12 et 58.

Plusieurs réorganisations des mots-clés au sein de différentes dimensions ont alors été nécessaires au cours de la synthèse des KPI de la littérature. En effet, certaines sous-dimensions se concentraient sur un détail et les experts ont décidé de modifier la structure des sous-dimensions, en les fusionnant, pour rédiger des KPI CAN avec le même niveau de détail. Dans d'autres cas, certaines sous-dimensions représentaient des concepts déjà synthétisés dans d'autres sous-dimensions. Ainsi, les sous-dimensions sont alors supprimées (par exemple, la sous-dimension « Governance ») pour ne pas avoir de KPI CAN redondants entre eux.

Cette démarche de synthèse a nécessité la planification de nombreuses rencontres pour établir la liste de KPI. Les **quatre experts précédemment impliqués dans la démarche** de comparaison des modèles de maturité retenus sont de nouveau impliqués pour mener cette opération de synthèse des KPI de la littérature. Lors de chaque séance de travail, au moins trois experts étaient réunis pour la rédaction de nouveaux KPI CAN. Lorsque le quatrième n'était pas présent, les KPI CAN rédigés pendant son absence sont relus, et modifiés si nécessaire, lors de la rencontre suivante.

La durée moyenne requise pour écrire un KPI CAN est d'environ 1 heure, mais cette durée dépend de la longueur de la liste de KPI de la littérature à synthétiser. Il a été observé, au début de cette démarche de synthèse, que la durée nécessaire pour obtenir un KPI CAN était de 2 heures, car le nombre de KPI de la littérature à synthétiser était élevé. Cette durée n'est plus que de 30 minutes lors de la synthèse des dernières sous-dimensions. La démarche de synthèse a alors nécessité 72 heures de travail aux experts pour rédiger l'ensemble des KPI CAN. Ce temps de travail a été découpé en 34 rencontres ayant une durée entre 1 et 6 heures.

La sous-section suivante propose un exemple de synthèse des KPI de la littérature appartenant à une sous-dimension. Il est alors possible d'observer le travail réalisé par les experts.

5.1.2 Exemple de synthèse des KPI d'une sous-dimension

Des rappels à la démarche détaillée dans la section 3.5 sont indiqués dans cet exemple. Cette sous-section vise à détailler la démarche de synthèse suivie par les experts pour la sous-dimension « Business model & strategy » appartenant à la dimension « Business, strategy & governance » (correspondant aux étapes (2) et (3) sur la Figure 3.4).

Cette sous-dimension réunit 42 KPI de la littérature (correspondant à l'étape (4) sur la Figure 3.4). Ces KPI possèdent chacun au moins un mot-clé relié à la sous-dimension « Business model & strategy » (annexe IV). Il ne s'agit pas de la première sous-dimension synthétisée par les experts. Ainsi, cette liste de KPI de la littérature contient des KPI déjà utilisés totalement ou partiellement pour la rédaction d'autres KPI CAN (identifiés par un fond rouge et orange, respectivement). Cet exemple ne contient pas de KPI de la littérature identiques ou supprimés volontairement par les experts (qui auraient été identifiés par un fond gris et noir, respectivement). Un exemple de ce dernier type de choix est présenté après l'exemple. Le Tableau 5.1, montre un extrait de la liste des 42 KPI de la littérature en lien avec la sous-dimension « Business model & strategy ».

Tableau 5.1 Extrait de la liste de KPI de la littérature en lien avec la sous-dimension « Business model & strategy » (avant l'exclusion des KPI de la littérature vus auparavant)

Référence	Intitulé des KPI de la littérature issus de l'étape de rétro-ingénierie
IMP 22	Share of revenues derived from data-driven services
PWC 1	Contribution of digital features, products and services to the overall value creation of the organization's portfolio
PWC 5	Importance of data usage and analysis for the organization's business model
PWC 21	Importance of new technologies (social media, mobility, analytics and cloud computing) to enable business operations
PWC 22	Ability of the IT organization to fulfill business requirements in the requested time, quality and cost
PWC 30	Capability to create value from data so as to optimize operations and foster new business models
ADN 18	Availability and actualization level of the strategic plan
BPI 1	Level of use of a CRM tool to monitor and drive the organization's commercial activity
BPI 4	Level of use of digital sale tools for onsite and online customers-oriented commercial activities
SCR 24	Level of awareness of the potential economic benefits in the adoption of IoT technologies
SCR 25	Level of awareness of the potential social benefits in the adoption of IoT technologies
SCR 26	Level of awareness of the potential environmental benefits in the adoption of IoT technologies
SCR 29	Capacity to give encrypted information/statistics on the cost reduction
SCR 37	Availability of indicators to evaluate the expected/obtained economic benefits
FOR 1	Level of awareness that the competitive strategy depends on digital
FOR 2	Level of support of the executives on the digital strategy
FOR 14	Capacity of the vendor partners to deliver value that enhances the digital competencies of the organization
FOR 19	Level of evaluation of the technology teams when considering business outcomes versus system uptime
FOR 24	Availability of customer-centric metrics to measure the success of the organization
FOR 25	Availability of indicators to measure how channels (online sales, ...) work together to accomplish a desired outcome

Les KPI identifiés par un fond rouge, gris ou noir peuvent être enlevés de la liste pour que les experts n'aient pas à revoir des KPI de la littérature traités lors de la synthèse des sous-

dimensions précédentes. Les KPI identifiés par un fond orange sont conservés, car ils peuvent contribuer à la rédaction d'un autre KPI CAN. La liste est alors constituée de 35 KPI et les experts la lisent une première fois (correspondant à l'étape (5) sur la Figure 3.4).

Ensuite, un travail de sélection des KPI à conserver dans cette sous-dimension est effectué. Il s'agit alors d'analyser et de créer des sous-groupes de KPI de la littérature pour rédiger des KPI CAN (correspondant aux étapes (6) et (7) sur la Figure 3.4). Pour cette sous-dimension, des sous-groupes ont été constitués, à partir de la matrice de comparaison contenant les KPI de la sous-dimension, et ont permis la **rédaction des KPI CAN 1 à CAN 4** suivants (correspondant aux étapes (8) et (9) sur la Figure 3.4) :

- CAN 1 → Ability of the organization to integrate digitalization aspects into its business model and strategy (écriture verte ; $\mathcal{X}_{Appui,CAN\ 1}^{1,1} = 62\%$),
- CAN 2 → Ability of the organization's IT resources to support its business model and strategy (écriture violette ; $\mathcal{X}_{Appui,CAN\ 2}^{1,1} = 31\%$),
- CAN 3 → Ability of the organization to generate revenues from data-driven services (écriture bleue ; $\mathcal{X}_{Appui,CAN\ 3}^{1,1} = 23\%$),
- CAN 4 → Availability of indicators to assess value creation and economic benefits related to the organization's investments in its digital transformation (écriture marron ; $\mathcal{X}_{Appui,CAN\ 4}^{1,1} = 23\%$).

Le numéro attribué à chacun des KPI CAN ne correspond pas à l'ordre dans lequel ils ont été rédigés. En effet, à la fin de l'étape de synthèse, les numéros pour chacun des KPI CAN ont été attribués selon l'ordre d'apparition des dimensions et sous-dimensions dans le Tableau 4.4.

De nombreuses discussions entre les experts permettent d'analyser et de grouper les KPI de la littérature à l'aide des matrices de comparaison et des mots-clés. Le Tableau 5.1 indique les sous-groupes de KPI de la littérature créés par les experts et chacun de ces sous-groupes a permis l'obtention d'un KPI. Cette indication est notable par la couleur de la police dans la

colonne référence (vert, violet, bleu et marron). Ensuite, des mots-clés sont attribués à chacun de ces KPI CAN et un enregistrement de ces nouveaux éléments est effectué (correspondant aux étapes (10) et (11) sur la Figure 3.4).

Dans la liste du Tableau 5.1, qui n'est qu'un extrait, il est possible de noter que 4 KPI, ADN 18, FOR 14, FOR 19 et FOR 25, ont une couleur de police rouge. Cette couleur de police indique que les experts, après discussion, ont décidé de ne pas utiliser ces KPI pour la synthèse de la sous-dimension « Business model & strategy ». Ils seront utilisés pour la rédaction d'un KPI CAN d'une autre sous-dimension.

Cet extrait de KPI de la littérature en lien avec la sous-dimension « Business model & strategy » contient 4 KPI de la littérature déjà partiellement utilisés pour la rédaction d'autres KPI CAN (identifiés par un fond orange sur le Tableau 5.1). Il est possible de distinguer deux cas pour ces 4 KPI de la littérature.

Le premier cas concerne les KPI FOR 1 et FOR 2. Ces deux KPI de la littérature ont déjà été utilisés partiellement pour la rédaction des KPI CAN 6 et CAN 10 appartenant aux sous-dimensions « Digital strategy » et « Digital leadership ». Cependant, ces KPI de la littérature considèrent des aspects que l'entreprise doit aussi prendre en compte dans sa stratégie globale. En effet, les KPI FOR 1 et FOR 2 supportent également l'idée du KPI CAN 1 sur le modèle d'entreprise (couleur de police verte). À la suite du traitement de la sous-dimension « Business model & strategy », ces KPI de la littérature sont considérés comme totalement utilisés.

Le deuxième cas concerne les KPI FOR 19 et FOR 25. Ces deux KPI de la littérature ont déjà été utilisés partiellement pour la rédaction du KPI CAN 14 - *Availability and update process of Key Performance Indicators (KPIs) to monitor the organization's operational efficiency*. Les concepts d'évaluation du « system uptime », dans le premier, et la différenciation entre chacun des canaux de communication, pour le second, ne sont pas pris en compte. Ces concepts peuvent alors mener à la rédaction d'un autre KPI CAN, c'est pourquoi les experts

considèrent alors les KPI FOR 19 et FOR 25 partiellement utilisés. Cependant, ces concepts pourront donc être utilisés dans une autre sous-dimension (couleur de police rouge).

Les KPI CAN de cette sous-dimension « Business model & strategy » ont une importance relative différente (l'appui sur les modèles de maturité retenus est indiqué entre parenthèses pour chacun des KPI CAN 1 à CAN 4) bien qu'ils appartiennent à la même sous-dimension. En effet, tous les modèles, sur lesquels s'appuie cette sous-dimension, ne contribuent pas à la rédaction de chacun des KPI CAN.

Ce travail a été répété pour toutes les sous-dimensions (correspondant aux étapes (12) à (14) sur la Figure 3.4). Pendant la rédaction des KPI CAN, les experts ont veillé à toujours conserver le lien entre les KPI de la littérature et les KPI CAN.

5.2 Résultats de la synthèse des KPI de la littérature et suivi de leur utilisation

La synthèse des KPI de la littérature a mené à la **rédaction de 74 KPI CAN**. Ces KPI CAN permettent de couvrir toutes les dimensions et représentent la totalité des concepts qui ont été observés et permettant d'évaluer la maturité numérique.

Un deuxième outil informatique, présenté à la sous-section 3.5.3 et sur la Figure 3.6, permet d'enregistrer les KPI CAN nouvellement rédigés lors de la synthèse des KPI de la littérature ainsi que les données (mots-clés et suivi de l'utilisation des KPI de la littérature) s'y rapportant. Cette section livre une analyse sur le suivi de l'utilisation des KPI de la littérature et les choix effectués par les experts. De plus, les indicateurs statistiques utilisés précédemment sont réemployés dans cette section pour comparer cette nouvelle liste de KPI CAN avec ceux identifiés dans les modèles de maturité retenus.

5.2.1 Liste de KPI CAN pour évaluer la maturité numérique des entreprises

Les experts ont rédigé 74 KPI CAN répartis en 12 dimensions et 58 sous-dimensions. L'étude de l'ensemble des modèles de maturité retenus a conduit à cette liste de KPI CAN et

répond à l'objectif principal de ce mémoire. Cette liste de KPI CAN est présentée dans l'annexe VIII avec les dimensions et sous-dimensions correspondantes.

Une première analyse de cette liste montre que la majorité des sous-dimensions synthétisées a abouti à la rédaction d'un KPI CAN. En effet, seulement 11 sous-dimensions contiennent entre 2 et 4 KPI CAN. La majorité de ces sous-dimensions correspondent à des sous-dimensions importantes identifiées avec l'indicateur statistique $\chi_{Appui,SD}^{k,l}$.

Le nombre de sous-dimensions, n_{SD}^k , étant différent entre chacune des dimensions, \mathcal{D}_k , il en est de même pour le nombre de KPI CAN permettant d'évaluer chacune des dimensions \mathcal{D}_k . Ainsi, il est possible de noter que **3 dimensions, « Business model, strategy & governance », « Human resources » et « IT & software tools », regroupent 36 KPI CAN**, soit quasiment la moitié de la liste.

Les sous-dimensions qui possèdent plus d'un KPI CAN reflètent les concepts qui ont été observés dans plusieurs des modèles de maturité retenus. En effet, ces sous-dimensions regroupent le plus grand nombre de KPI de la littérature, au travers de l'attribution des mots-clés, et conduit les experts à rédiger plusieurs KPI CAN, contrairement à d'autres sous-dimensions.

Cette liste de KPI CAN synthétise les KPI de la littérature. À présent, une étude sur l'utilisation des KPI de la littérature pendant la démarche de synthèse est proposée.

5.2.2 Suivi de l'utilisation des KPI de la littérature

Dans cette sous-section, une description de l'utilisation des KPI de la littérature est proposée. Lors de la rédaction des KPI CAN, les experts ont également accompli un travail de suivi de l'utilisation des KPI de la littérature. Ce travail repose sur la définition d'un code couleur lors de l'utilisation d'un KPI de la littérature. Ainsi, comme il a été dit dans la section précédente, le rouge et l'orange représentent un KPI totalement ou partiellement utilisé, le gris identifie

un KPI similaire à un autre et le noir est attribué pour les KPI de la littérature ne relevant pas spécifiquement de la maturité numérique.

Lors de l'étape de vérification des KPI de la littérature (correspondant à l'étape (14) sur la Figure 3.4), les experts ont analysé tous les KPI de la littérature non utilisés, partiellement utilisés et supprimés. Cette étape permet, dans certains cas, d'attribuer un KPI de la littérature à un KPI CAN, car les mots-clés qui le caractérisent n'ont pas permis de le classer dans la sous-dimension adéquate. Ainsi, **au début de l'étape (14)**, les experts ont vérifié :

- 12 KPI de la littérature qui n'ont pas été utilisés (totalement ou partiellement), ni identiques à un autre KPI ni supprimés ;
- 16 KPI de la littérature qui ont déjà été partiellement utilisés ;
- 14 KPI de la littérature qui ont été supprimés.

Cette étape a révélé que certains KPI de la littérature pouvaient être caractérisés par de meilleurs mots-clés et ensuite pouvaient supporter un KPI CAN nouvellement rédigé. Le diagramme circulaire (Figure 5.1) indique **l'état d'utilisation des 451 KPI de la littérature à la fin de cette étape de vérification**.

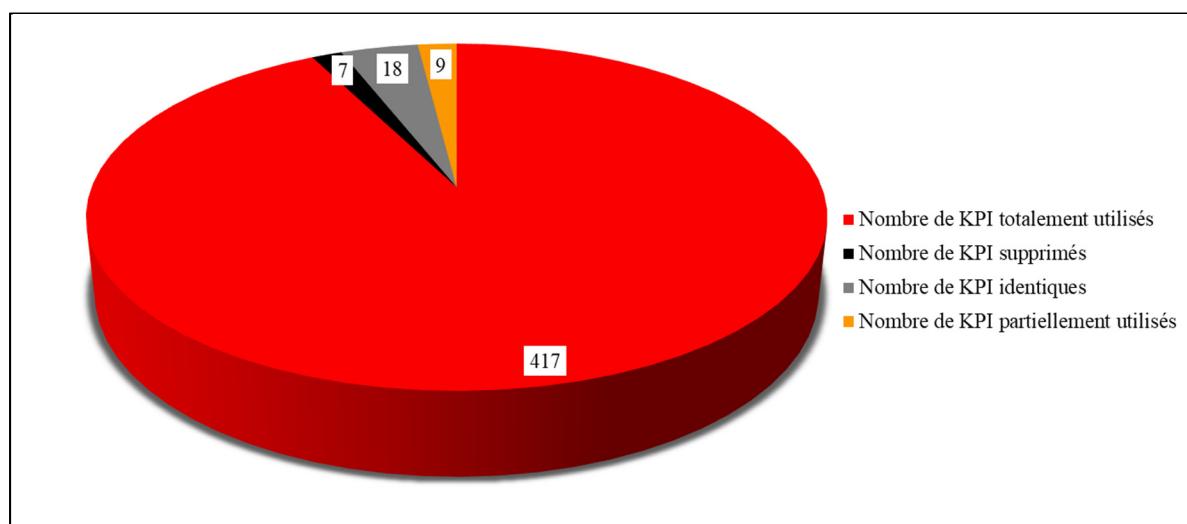


Figure 5.1 Suivi de l'utilisation des KPI de la littérature à la fin de la démarche de synthèse

Il est tout d'abord possible de noter que plus de **96 % des KPI de la littérature ont été utilisés** (= $(417 + 18) / 451$) dans la démarche de synthèse. Les experts ont identifié 18 KPI de la littérature qui sont utilisés dans deux modèles de maturité différents (couleur grise sur la Figure 5.1). Ainsi, bien que des modèles se soient inspirés des modèles déjà existants, leur apport est intéressant à prendre en compte. Les experts ont distingué quelques KPI très proches ou identiques entre les modèles IMP, PWC, AKD et WAR notamment. Cependant, AKD compte seulement 9 KPI identiques sur les 69 qu'il contient et WAR a 6 KPI identiques sur les 39 qui le composent. Ces deux modèles couvrent tout de même d'autres concepts qui doivent faire partie de l'étude. Le suivi de l'utilisation des KPI de la littérature montre donc que les **18 KPI identiques sont des doublons de KPI totalement utilisés**.

La Figure 5.1 montre que des KPI de la littérature ont été volontairement supprimés par les experts (couleur noire sur la Figure 5.1). En effet, lors de l'étape de rétro-ingénierie et d'attribution des mots-clés, les experts se sont efforcés de conserver tous les KPI identifiés dans les modèles de maturité. Toutefois, pendant la démarche de synthèse, certains KPI de la littérature et certaines sous-dimensions se sont avérés ne pas relever de l'évaluation de la maturité numérique des entreprises. Dans la majorité des cas, ces KPI sont spécifiques à un modèle de maturité numérique et les experts ont décidé de ne pas les considérer dans la construction de la liste de KPI CAN finale.

Par exemple, le modèle PWC a initialement mené les experts à définir une sous-dimension « Taxes » avec l'unique mot-clé « tax issues ». Cependant, lors de la collecte des données autour de cette sous-dimension pendant la démarche de synthèse, seul le KPI PWC 27 est apparu - *Level of management of the digital components of the organization's value chain with respect to tax related topics (IP location ...)*. Ce concept de « taxe » est mentionné uniquement dans le modèle PWC et n'est pas considéré comme central dans l'évaluation de la maturité numérique d'une entreprise, les experts ont donc décidé de ne pas prendre en compte ce KPI. La sous-dimension « Taxes » a également été supprimée.

Les experts ont donc fait le choix de ne pas considérer 7 KPI de la littérature (« KPI supprimés » sur la Figure 5.1), mais cela représente moins de 2 % (= 7 / 451) de la totalité des KPI identifiés dans les modèles de maturité numérique. Ils sont contenus dans les modèles PWC (1), ADN (1), AKD (1), MAC (3) et SIN (1).

À la fin de la démarche de synthèse, il reste **9 KPI de la littérature partiellement utilisés** (couleur orange sur la Figure 5.1). Ces KPI de la littérature ont permis la rédaction de KPI CAN, mais une partie de leur formulation n'a pas été utilisée. En effet, la majorité des KPI de la littérature sont utilisés dans 2 KPI CAN, car les dimensions retenues ne correspondent pas à celles des modèles de la littérature. Par exemple, le KPI WAR 8 - *Level of readiness of machines and systems with respect to Industry 4.0 requirements* - a permis la rédaction du KPI CAN 46 - *Ability of the organization to integrate and use IT and digital technologies among the organization's activities to support the organization's digital transformation*. Dans ce nouveau KPI CAN, la notion de « readiness » n'est pas reprise, le KPI WAR 8 est donc partiellement utilisé. Il en est également de même pour les KPI FOR 19 et FOR 25 vus dans l'exemple présenté dans la section précédente.

Tous les modèles retenus ont contribué à l'établissement de la liste des 74 KPI CAN. Maintenant, les indicateurs statistiques utilisés précédemment sont appliqués sur la liste des KPI CAN.

5.2.3 Couverture des dimensions et appui des KPI CAN sur les modèles de maturité retenus

À la suite de la synthèse de toutes les sous-dimensions identifiées et retenues par les experts, une comparaison des 74 KPI CAN avec les modèles de maturité retenus est proposée. Cette comparaison reprend les indicateurs statistiques de remplissage des matrices de comparaison, $\mathcal{X}_{Remplissage,MSA}$, et de couverture des dimensions, $\mathcal{X}_{Couverture,D}^{i,k}$. De plus, un nouvel indicateur statistique, noté $\mathcal{X}_{Appui,KPI\,CAN}^{k,l}$, permet de **classer les KPI CAN par ordre**

d'importance en fonction des modèles de maturité retenus, de la même manière qu'il a été fait pour les sous-dimensions \mathcal{SD}_l^k définies par les experts.

Après avoir rédigé des KPI CAN, les experts ont également attribué des mots-clés à ces nouveaux KPI. Les experts ont attribué les mots-clés classés dans la matrice *MCmat* pour éviter d'introduire un concept non identifié préalablement à la synthèse. En moyenne, le nombre de **mots-clés attribués pour chaque KPI CAN est de 4** (avec un écart-type de 1,6). Les KPI CAN sont plus long que les KPI de la littérature et les experts ont attribué plus de mots-clés pour mieux les caractériser.

Cette étape a permis par la suite d'intégrer la liste de KPI CAN à l'outil utilisé pour les modèles de maturité numérique retenus. Ainsi, 13 matrices de comparaison supplémentaires ont été obtenues. Elles correspondent à la comparaison de la liste de KPI CAN avec chacun des modèles de maturité retenus.

En observant le taux de remplissage, $\mathcal{X}_{Remplissage,MSA}$, de ces nouvelles matrices, plusieurs éléments sont à noter. Les matrices incluant la comparaison de la liste de KPI CAN avec un modèle de maturité retenu pour l'étude montrent un taux de remplissage supérieur à ceux obtenus pour la comparaison des modèles retenus entre eux. En effet, le taux de remplissage des nouvelles matrices de comparaison est de 18,2 % en moyenne (avec un écart-type de 3,5 %) contre 16,8 % pour les autres matrices (avec un écart-type de 5,1 %).

Ce premier résultat indique qu'il existe davantage de correspondances entre la liste de KPI CAN et les modèles retenus que de correspondances entre les modèles retenus. Cette liste de KPI CAN incorpore autant que possible les concepts qui ont pu être identifiés dans les modèles retenus et la méthode de comparaison semi-automatique permet de le souligner.

Ces taux de remplissage sont élevés pour toutes les matrices de comparaison *MSAmat* concernant la liste de KPI CAN et un des modèles de maturité retenus. En effet, le taux le plus faible est observé pour la comparaison du modèle PWC avec les KPI CAN et est de

14,9 %. Ce taux est plus de deux fois supérieur au plus petit taux de remplissage observé lors de la comparaison des modèles de maturité retenus ($\chi_{Remplissage, MSA}^{CEG, WAR} = 5,7 \%$).

Au cours de la rédaction des KPI CAN, les experts ont utilisé l'indicateur de couverture des dimensions, $\chi_{Couverture, \mathcal{D}}^{i,k}$, pour observer l'avancement de la démarche de synthèse des KPI de la littérature. À l'exception du KPI et du concept « Taxes » mis de côté par les experts, **toutes les dimensions identifiées par les experts à partir des modèles de maturité retenus sont couvertes à 100 %** (Figure 5.2).

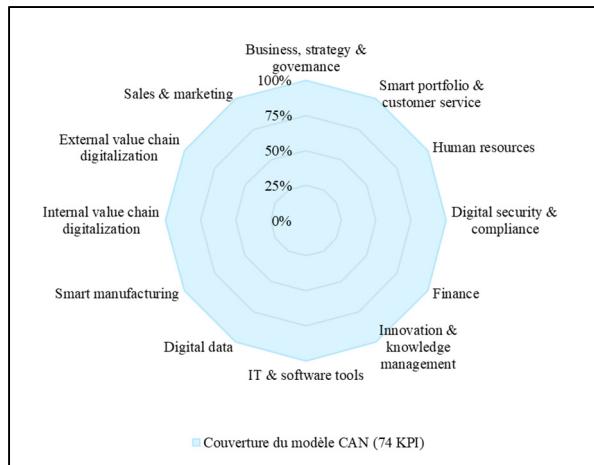


Figure 5.2 Couverture de la liste de KPI CAN selon les dimensions définies par les experts

Le diagramme radar, présenté sur la Figure 5.2, montre que tous les concepts identifiés par les experts ont conduit à la rédaction d'au moins un KPI CAN qui contient alors un mot-clé associé au même concept. Cette démarche de synthèse permet donc d'absorber la quasi-totalité des concepts identifiés dans les modèles de maturité retenus pour cette étude.

Pour une sous-dimension donnée, les experts ont noté que le ou les KPI CAN ne découlaient pas de tous les modèles sur lesquels la sous-dimension s'appuie. En effet, un KPI CAN peut retranscrire une idée observée dans 2 modèles de maturité alors que la sous-dimension s'appuie sur 8 modèles de maturité, par exemple.

L'indicateur statistique $\mathcal{X}_{Appui, KPI CAN}^{k,l}$, qui représente l'appui d'un KPI CAN sur les modèles de maturité retenus, est alors utilisé. Tout comme l'indicateur statistique d'appui des sous-dimensions, les KPI CAN sont classés par ordre décroissant d'importance en fonction des modèles de maturité qui ont contribué à leur rédaction. Un extrait de ce classement est présenté dans le Tableau 5.2.

Tableau 5.2 Extrait du classement des KPI CAN
en fonction de leur appui sur les modèles de maturité retenus

KPI CAN	Appui du KPI CAN	Sous-dimension	Appui de la sous-dimension	Nombre de KPI de la littérature utilisés
CAN 31	77 %	Skills & expertise	100 %	11
CAN 34	77 %	Training	85 %	13
CAN 36	77 %	Digital security	85 %	30
CAN 33	69 %	Skills & expertise	100 %	11
CAN 46	69 %	IT technologies	100 %	14
CAN 56	69 %	Data as an asset	69 %	35
CAN 58	69 %	Data usage	54 %	28
CAN 1	62 %	Business model & strategy	92 %	16
CAN 57	62 %	Data acquisition & processing	69 %	27
CAN 8	54 %	Digital plan & roadmap	85 %	7
CAN 48	54 %	IT integration	77 %	10
CAN 63	54 %	Agility	69 %	7
CAN 70	54 %	Customer experience	69 %	10
CAN 74	54 %	Communication & marketing	69 %	18
CAN 38	54 %	Investment	54 %	11
...
CAN 12	8 %	Implementation & deployment	92 %	1
CAN 54	8 %	Upgradability & maintenance	31 %	4
CAN 21	8 %	Configuration tools	8 %	1

La majorité des KPI CAN ont un appui sur les modèles de maturité qui est supérieur à 15 %, c'est-à-dire qu'au moins 2 modèles ont permis la rédaction de ces KPI CAN. Ces KPI CAN sont validés par le fait qu'un concept est observé dans plusieurs modèles de maturité retenus. Cependant, à la fin de ce classement, 3 KPI CAN ont été rédigés en utilisant un ou des KPI issus d'un seul modèle de maturité (CAN 12, CAN 21 et CAN 54). Cette particularité est expliquée dans le chapitre 6 au niveau de la section 6.3. Dans l'annexe VIII, ces KPI CAN sont repérés en gris.

Les 15 premiers KPI CAN de ce classement possèdent un appui supérieur à 50 %, c'est-à-dire que pour chacun de ces KPI CAN, plus de la moitié des modèles de maturité retenus contiennent la même idée dans un ou plusieurs KPI. Parmi ces 15 KPI CAN, il est possible de noter que les dimensions « Human resources » et « Digital data » ont 3 KPI CAN chacune qui sont supportés par au moins 8 des 13 modèles de maturité, soit $\chi_{Appui, KPI CAN}^{k,l} \geq 62\%$.

La dernière colonne du Tableau 5.2 donne le nombre de KPI de la littérature sur lesquels les experts se sont appuyés pour rédiger un KPI CAN. Ainsi, pour certains concepts, de nombreuses nuances sont observées dans chacun des modèles et aboutissent à la rédaction d'un KPI CAN qui englobent toutes ces nuances. Par exemple, le KPI CAN 36 s'appuie sur 30 KPI de la littérature. A l'inverse, des consensus entre les modèles peuvent être observés pour certains concepts qui permettent d'obtenir des KPI CAN avec un appui élevé, mais provenant d'un nombre limité de KPI de la littérature (par exemple, KPI CAN 31).

Le Tableau-A IX-1 dans l'annexe IX présente le classement complet des KPI CAN en fonction de leur appui. Ce classement montre ainsi les KPI CAN autour desquels il est possible d'observer un consensus plus ou moins important entre les modèles de maturité retenus. Ainsi, la grandeur de l'appui d'un KPI CAN reflète sa validité.

En parallèle de ce travail, une équipe allemande a également rédigé une liste de KPI, notée par la suite KPI GER, pour évaluer la maturité numérique en suivant sa propre méthodologie.

Les quatre experts impliqués dans la démarche de comparaison et de synthèse des KPI de la littérature constituent l'équipe canadienne dans la section suivante.

5.3 Comparaison avec la liste de KPI établie par l'équipe allemande

Le projet présenté dans ce mémoire relève d'un projet de plus grande envergure, le projet international DIMLA, qui a pour objectif de créer un modèle de maturité numérique pour aider les PME du secteur aéronautique (Figure 0.1). Ainsi, les listes de KPI CAN et KPI GER représentent les différents concepts qui ont pu être observés par les experts des équipes canadiennes et allemandes dans les modèles de maturité numérique existants. **Les listes de KPI CAN et KPI GER comportent respectivement 74 et 89 KPI.** Par la suite, des personnes travaillant pour des PME canadiennes et allemandes de l'aéronautique se réuniront pour créer un modèle de maturité numérique commun, comportant une série de questions et de réponses.

Une comparaison entre les deux listes de KPI CAN et GER est proposée. Pour **comparer ces deux listes**, la liste de KPI GER a été intégrée à l'**outil de comparaison semi-automatique** employé précédemment. Les résultats de cette section ont un double objectif. Le premier est de valider la liste de KPI CAN avec la liste de KPI GER en observant les convergences entre les deux résultats. Le deuxième consiste à aider les personnes, chargées de rédiger les jeux de questions et réponses pour finaliser le modèle de maturité numérique, en leur indiquant les différences et les similitudes entre les KPI CAN et les KPI GER.

5.3.1 Comparaison semi-automatique des KPI GER à l'aide des indicateurs statistiques

La liste de KPI GER a été traitée par l'équipe canadienne comme l'ont été les modèles de maturité retenus pour cette étude. En effet, l'équipe allemande a défini sa propre structure en dimensions et sous-dimensions qui ne correspondaient pas à celle définie par l'équipe canadienne.

Ainsi, la méthode de comparaison semi-automatique est utilisée une nouvelle fois. L'étape de rétro-ingénierie n'est pas nécessaire dans ce cas, puisque les données initiales sont déjà des KPI, et non des jeux de questions et de réponses. Les quatre experts de l'équipe canadienne ont alors **attribué des mots-clés pour chacun des 89 KPI GER** et exécuté les outils informatiques.

L'ajout de la liste de KPI GER dans l'outil de comparaison a engendré l'apparition de 21 nouveaux mots-clés dans la matrice $MCmat$. En effet, l'équipe allemande a utilisé certains modèles de maturité retenus par l'équipe canadienne, mais également d'autres modèles non identifiés par l'équipe canadienne. Cependant, l'intégration de ces nouveaux mots-clés n'a pas abouti à l'identification d'un nouveau concept. Les dimensions \mathcal{D}_k et les sous-dimensions \mathcal{SD}_l^k proposent donc une large couverture des modèles de maturité existants.

Les experts ont attribué **en moyenne 4 mots-clés** (avec un écart-type de 1,2) **à chaque KPI GER**. Les mots-clés qui sont apparus avec cette liste ont été identifiés en bleu dans la matrice $MCmat$ présentée dans l'annexe IV.

La classification de ces nouveaux mots-clés a permis l'obtention de 14 nouvelles matrices de comparaison $MSAmat$. Ces matrices correspondent à la comparaison de la liste de KPI GER avec les modèles de maturité retenus par l'équipe canadienne et avec la liste de KPI CAN. Cette dernière matrice, notée $MSAmat^{CAN,GER}$, est présentée à la Figure 5.3.

Cette matrice $MSAmat^{CAN,GER}$ présente un taux de remplissage supérieur à 20 %. Ce taux de remplissage est l'un des plus élevés parmi ceux relevés dans les 105 matrices $MSAmat$ qui opposent deux modèles de maturité différents. Ainsi, la méthode de comparaison semi-automatique relève de nombreuses correspondances entre les listes de KPI CAN et GER.

Dans cette matrice $MSAmat^{CAN,GER}$, tous les KPI GER ont au moins une correspondance avec un KPI CAN. Dans l'autre sens, 3 KPI CAN n'ont aucune correspondance avec un KPI

GER. L'ensemble de ces correspondances seront vérifiées manuellement pour éliminer les éléments « faux positifs » dans la sous-section suivante.

Figure 5.3 Matrice de comparaison obtenue avec la méthode de comparaison semi-automatique entre les KPI CAN et les KPI GER

Enfin, l'observation de la couverture des dimensions \mathcal{D}_k , définies par les experts de l'équipe canadienne, par les KPI GER permet de connaître la portée de cette liste (Figure 5.4).

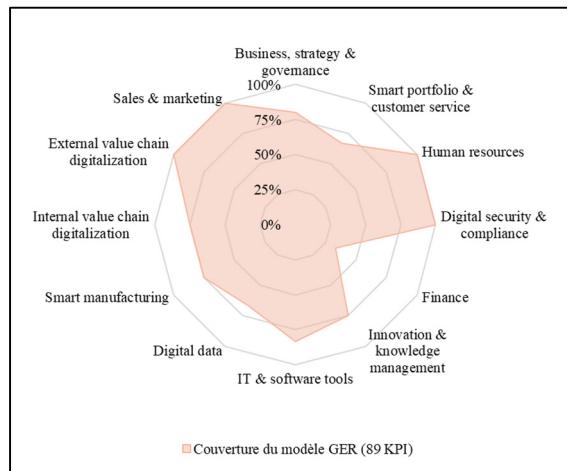


Figure 5.4 Couverture de la liste de KPI GER selon les dimensions définies par les experts de l'équipe canadienne

Sur le diagramme radar présenté sur la Figure 5.4, il est possible de noter que **la liste de KPI GER couvre une grande partie des sous-dimensions définies par l'équipe canadienne**. En effet, 9 des 12 dimensions identifiées sont couvertes à plus de 75 %. Les dimensions « Human resources », « Digital security & compliance », « External value chain digitalization » et « Sales & marketing » sont couvertes à 100 %. Cependant, ce graphique met en évidence la couverture limitée de la dimension « Finance » par les KPI GER.

Pour évaluer la proximité entre les 2 listes, une analyse manuelle des correspondances des couples de KPI est proposée. L'objectif est d'identifier des groupes de KPI CAN et KPI GER entre lesquels il existe une véritable correspondance.

5.3.2 Analyse manuelle des correspondances entre les KPI CAN et les KPI GER

La méthode de comparaison semi-automatique identifie les correspondances potentielles entre les KPI CAN et les KPI GER (Figure 5.3). Une **vérification de ces correspondances**

est effectuée pour éliminer les « faux positifs » parmi les correspondances induits par la méthode de comparaison semi-automatique.

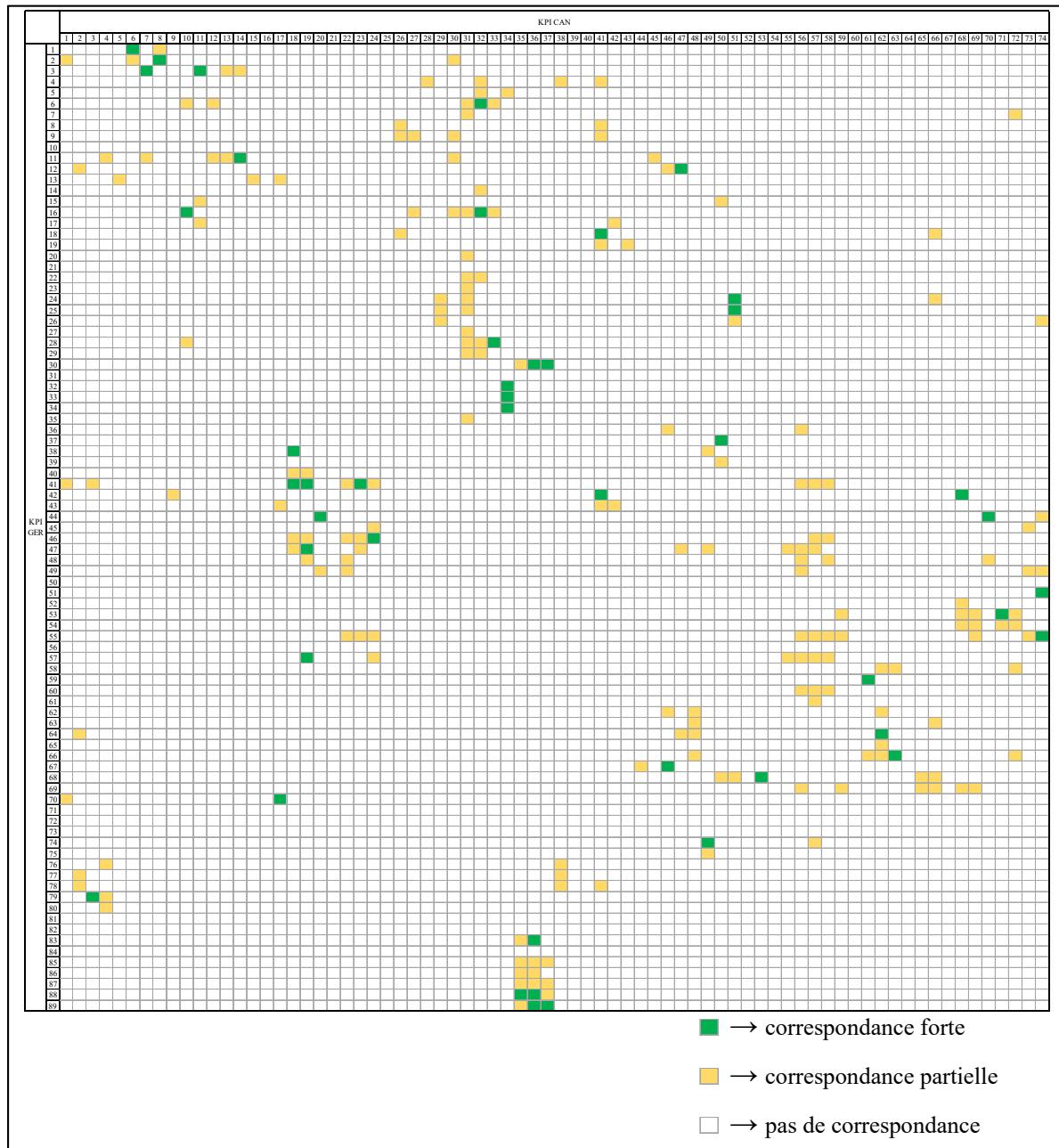


Figure 5.5 Matrice de comparaison obtenue avec la méthode de comparaison semi-automatique et corrigée entre les KPI CAN et les KPI GER

Cette étape a été réalisée par deux experts et le résultat est présenté sur la Figure 5.5. Bien que cette démarche ressemble fortement à la méthode de comparaison manuelle, tous les couples de KPI des listes CAN et GER ne sont pas analysés, c'est pourquoi le résultat est placé dans une matrice nommée $MSAmat_{corrigée}^{CAN,GER}$.

Dans cette matrice $MSAmat_{corrigée}^{CAN,GER}$, il faut noter que le **taux de remplissage a considérablement diminué, puisqu'il n'est plus que de 3 % (contre 20,4 % avec la méthode de comparaison semi-automatique)**. Ainsi, de nombreux éléments « faux positifs » ont été éliminés. Le nombre élevé des correspondances fortes montre que les 2 listes convergent sur l'importance de plusieurs concepts pour l'évaluation de la maturité numérique des entreprises.

Ce travail manuel permet de noter que finalement 10 KPI CAN, sur les 74 que comporte la liste, n'ont pas de véritables correspondances avec un KPI GER. Parmi ces KPI CAN, deux (CAN 21 et CAN 54) s'appuyaient uniquement sur un modèle de maturité retenu par l'équipe canadienne. Concernant la liste de KPI GER, les experts n'ont relevé aucune correspondance avec un KPI CAN pour 11 d'entre eux.

Dans la suite du projet DIMLA, l'équipe allemande a organisé plusieurs rencontres entre des scientifiques et des entreprises pour identifier environ **30 KPI GER comme étant les plus importants** et constituant une « shortlist ». Les discussions ont abouti sur l'identification de 33 KPI GER considérés comme prioritaires par les personnes qui ont participé à ces rencontres. Du côté canadien, les experts ont établi une liste de **32 KPI CAN prioritaires en utilisant l'indicateur statistique $X_{Appui,KPI CAN}^{k,l}$** . Cette liste est alors constituée de KPI CAN avec un appui d'au moins 38 %, c'est-à-dire qu'au moins 5 modèles de maturité retenus pour l'étude partagent cet indicateur (annexe IX). Cette « shortlist CAN » a la particularité de contenir au moins un KPI CAN de chacune des dimensions \mathcal{D}_k définies par les experts de l'équipe canadienne et offrent un bon aperçu de la liste complète.

Ensuite, une analyse entre ces deux « shortlist » permet de mettre en évidence les KPI CAN prioritaires autour desquels il est possible d'observer une convergence forte entre les travaux allemands et canadiens. Ainsi, en utilisant la matrice $MSAmat_{corrigée}^{CAN,GER}$, les experts ont relevé les KPI de chacune des deux « shortlist » pour lesquels une correspondance forte a été identifiée. Le résultat de cette analyse est montré sur la Figure 5.6 et la Figure 5.7.

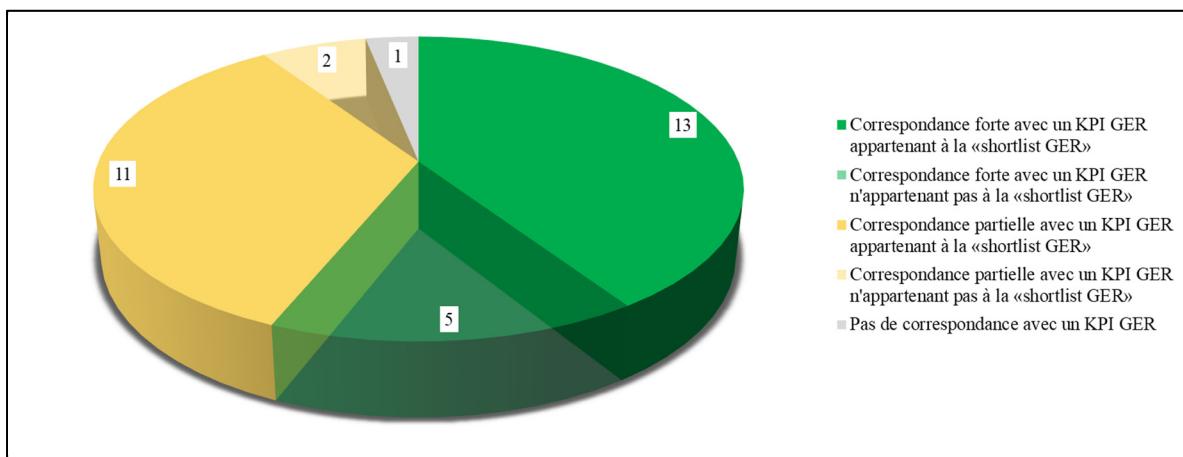


Figure 5.6 Correspondances de la « shortlist CAN » avec les KPI GER

La Figure 5.6 montre que **13 KPI CAN, appartenant à la « shortlist CAN », ont une correspondance forte avec un KPI GER, appartenant à la « shortlist GER »**. Ainsi, ces KPI CAN pourraient être prioritaires lors de l'évaluation de la maturité numérique d'une entreprise, puisque ces KPI CAN s'appuient sur plusieurs modèles de maturité retenus par l'équipe canadienne et ont une correspondance forte avec un KPI GER identifié comme important par des experts de la transformation numérique et des industriels allemands. Ces 13 KPI CAN prioritaires sont identifiés en vert dans l'annexe VIII et présentés dans le Tableau 5.3.

Cette analyse montre également que des dimensions sont plus importantes que d'autres. Ainsi, dans la liste des 13 KPI CAN, 4 dimensions sont représentées avec 2 ou 3 KPI CAN. Il s'agit des dimensions « Human resources », « IT & software tools », « Business, strategy & governance » et « Smart portfolio & customer service ».

Tableau 5.3 Liste des 13 KPI CAN considérés comme prioritaires

KPI CAN	Intitulé du KPI CAN	Dimension	Sous-dimension
CAN 8	Availability of a documented, reviewed and communicated digital plan/roadmap to support the digital strategy	Business, strategy & governance	Digital plan & roadmap
CAN 10	Availability of skilled digital leaders to inspire and drive the digital transformation day-to-day	Business, strategy & governance	Digital leadership
CAN 17	Ability of the organization to drive the evolution of its products/services portfolio and create new business opportunities by means of digital initiatives	Smart portfolio & customer service	Organization's portfolio
CAN 18	Ability of the organization to develop smart products incorporating add-on functionalities (e.g. memorization, localization, self-reporting, tracking, self-analysis) based on data acquisition and exploitation	Smart portfolio & customer service	Smart products & services
CAN 32	Availability of the digital competencies required to carry out upcoming digital transformation projects	Human resources	Skills & expertise
CAN 33	Availability of an appropriate structuring of the digital competencies to support the organization's digital transformation	Human resources	Skills & expertise
CAN 34	Adequacy of the resources for the employees to train and acquire the digital competencies required for the organization's digital transformation	Human resources	Training
CAN 36	Ability of the organization to implement IT security solutions for data integrity, confidentiality and availability throughout the organization	Digital security & compliance	Digital security
CAN 46	Ability of the organization to integrate and use IT and digital technologies among the organization's activities to support the organization's digital transformation.	IT & software tools	IT technologies
CAN 51	Ability of the organization to leverage software tools and systems to foster collaboration and collective intelligence	IT & software tools	Software tools
CAN 53	Ability of the organization to leverage software tools, machines and systems to locally or globally improve the organization's practices and processes (e.g. hiring, selling, manufacturing, inventorying processes)	IT & software tools	Software tools
CAN 68	Ability of the organization to share digital data and to collaborate with external partners and customers to support product/service development processes	Internal value chain digitalization	Development process
CAN 71	Ability of the organization to collaborate with academics, suppliers and customers in order to support the implementation and deployment of its digital transformation projects	External value chain digitalization	External collaboration

Une analyse similaire a été effectuée avec la « shortlist GER » et le résultat est présenté sur la Figure 5.7. Dans la « shortlist GER », 16 KPI GER ont une correspondance forte avec un KPI CAN présent dans la « shortlist CAN ».

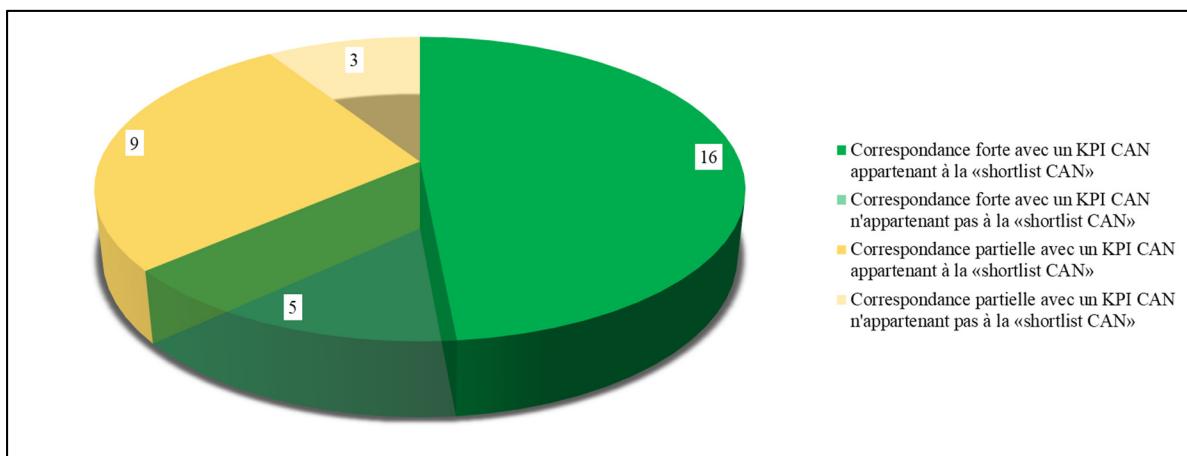


Figure 5.7 Correspondances de la « shortlist GER » avec les KPI CAN

Les 2 graphiques précédents montrent que 15 % des listes de KPI CAN et de KPI GER peuvent être priorisées et illustrent le consensus entre les travaux des équipes canadiennes et allemandes. Les deux « shortlist » ont de nombreux concepts en commun. En effet, seul un KPI CAN important (CAN 52) n'a pas une véritable correspondance avec un KPI GER. Ainsi, même si les KPI CAN et les KPI GER n'ont pas tous des correspondances fortes, les deux listes convergent sur l'identification de concepts similaires.

Lors de futurs travaux, l'utilisation d'une liste plutôt qu'une autre peut mener à l'identification de KPI prioritaires supplémentaires. En effet, sur chacun des graphiques précédents, une partie des « shortlist » a une correspondance avec des KPI de l'autre liste, mais ces derniers n'appartiennent pas à une « shortlist ». D'un côté, une préférence pour la liste CAN peut mener à l'identification de 18 KPI (= 13 + 5) prioritaires parmi les 74. De l'autre côté, une préférence pour la liste GER peut mener à l'identification de 21 KPI (= 16 + 5) prioritaires parmi les 89.

5.4 Synthèse

Dans ce chapitre, une présentation de la démarche de synthèse des KPI de la littérature montre le travail fourni par les quatre experts de l'équipe canadienne, pour créer une liste d'indicateurs de maturité numérique agrégeant les différents concepts identifiés dans les modèles de maturité retenus. Ainsi, une liste de **74 nouveaux KPI** (les KPI CAN) a été obtenue au travers de **discussion impliquant quatre experts**. Elle permet d'atteindre l'objectif principal de ce mémoire. Ce résultat est validé à l'aide des indicateurs statistiques utilisant les données issues des modèles de maturité retenus, mais aussi avec la liste de KPI produite par l'équipe allemande du projet DIMLA (les KPI GER).

En effet, la comparaison des deux listes montre de nombreuses similarités. **Les deux équipes canadienne et allemande convergent sur l'identification des concepts en lien avec la maturité numérique** des entreprises. Les analyses effectuées sur les KPI CAN ont montré des points forts et des points faibles dans la méthode employée. Le chapitre suivant propose une discussion autour de ces points.

CHAPITRE 6

DISCUSSION

Pour établir une liste d'indicateurs de la maturité numérique, une revue des modèles de maturité existants est conseillée par de nombreux auteurs, notamment par Becker et al. (2009) et Schwer et al. (2018). Ainsi, pour créer une liste d'indicateurs de la maturité numérique à partir de différents modèles de maturité retenus pour cette étude, une démarche de comparaison et de synthèse a été conçue. D'une part, elle permet d'identifier les correspondances entre les KPI de la littérature et, d'autre part, elle conduit à l'établissement d'une liste d'indicateurs couvrant un large périmètre de la maturité numérique. De plus, une question se pose quant à la validité de la liste de KPI CAN, présentée dans le chapitre 5 et dont l'intégralité est contenue dans l'annexe VIII.

Dans ce chapitre, une observation des avantages de la démarche de comparaison et de synthèse est proposée. En effet, la démarche adoptée dans ce mémoire a été conçue pour faciliter le travail des experts. Ensuite, au travers de la mise en application de la démarche adoptée, il est possible de relever les limites auxquelles les experts ont été confrontés. Suite à l'obtention d'une liste d'indicateurs de maturité numérique, une réflexion autour de sa validité est proposée dans la troisième section de ce chapitre. Ainsi, les indicateurs statistiques utilisés au cours de la comparaison et de la synthèse aident les experts à prendre des décisions et à valider leur choix.

6.1 Avantages de la démarche proposée

La démarche proposée dans ce mémoire se divise en deux : la comparaison des modèles de maturité et la synthèse des KPI de la littérature.

La première partie de cette démarche consiste à comparer les modèles de maturité retenus et à identifier les correspondances entre eux. Cette démarche nécessite un travail dit « manuel » qui consiste à rédiger des KPI à partir des questions et réponses composant les modèles de

maturité, puis à attribuer des mots-clés à chacun d'eux. Ensuite, la comparaison des KPI, nommés « KPI de la littérature », est basée sur les mots-clés et des formules, c'est pourquoi il s'agit d'une méthode de comparaison semi-automatique. En effet, la présence d'experts est nécessaire pour les premières étapes.

Le recours à des mots-clés dans la démarche de comparaison permet aux experts d'accomplir une double tâche. Premièrement, les mots-clés permettent de caractériser et d'identifier automatiquement des correspondances entre les KPI de la littérature. Lors de la comparaison manuelle des modèles IMPULS et PwC, les 6 experts réunis avaient adopté une procédure similaire pour établir des correspondances entre les KPI de ces 2 modèles de maturité. Deuxièmement, après avoir classé les mots-clés, une **structure en dimensions et sous-dimensions** a été obtenue. Elle constitue une référence pour comparer les modèles de maturité retenus et aider les experts à synthétiser toutes les informations autour de la maturité.

L'avantage de cette **structure** est qu'elle est **flexible**. Les experts peuvent modifier le classement des mots-clés lors de l'apparition d'un nouveau concept ou d'une réorganisation de la matrice *MCmat*. Ces modifications ont un impact sur l'identification des correspondances entre les KPI de la littérature, mais la **semi-automatisation de la méthode de comparaison permet d'obtenir les résultats rapidement**. Ainsi, lors de l'ajustement de la méthode de comparaison semi-automatique, les experts pouvaient directement observer les changements dans la matrice *MSAmat^{IMP,PWC}* liés aux modifications sur l'attribution ou le classement des mots-clés.

En ce qui concerne le regroupement des lignes dans la matrice *MCmat*, il est possible de reprendre les dimensions d'un modèle pour classer les mots-clés ou de classer les mots-clés pour ensuite identifier des dimensions. Cette deuxième approche a été retenue, car aucun des modèles de maturité retenus ne couvrait l'intégralité des autres.

Enfin, cette démarche de comparaison a permis aux experts d'éviter l'analyse de toutes les paires de KPI de la littérature possibles, dont le nombre est supérieur à 200 000. Elle permet de rapprocher les KPI de la littérature qui partagent un même concept. Un **gain de temps non négligeable** est possible à l'aide de cette démarche de comparaison, car en moyenne, peu de ces paires ont une véritable correspondance. La méthode de comparaison semi-automatique permet d'obtenir des matrices de comparaison avec un taux de remplissage moyen de 16,8 % (sous-section 4.4.4) incluant de « faux positifs ». Puisque cette méthode semi-automatique identifie au minimum toutes les correspondances identifiées manuellement, elle permet de réduire l'effort requis de la part des experts. Ils peuvent alors se concentrer sur les paires de KPI susceptibles d'être véritablement en correspondance. En contrepartie, une seule action supplémentaire est requise pour l'attribution de mots-clés à chacun des KPI de la littérature et la classification de ces mots-clés.

La démarche de synthèse des KPI de la littérature s'appuie sur les résultats de la comparaison des modèles de maturité retenus. Les experts n'ont pas à synthétiser un groupe de 451 KPI en un seul bloc. Ainsi, en utilisant les sous-dimensions, les experts devaient rédiger des KPI CAN à partir d'une liste de KPI de la littérature pouvant aller jusqu'à 63 KPI. L'avancement et le suivi de l'utilisation des KPI de la littérature dans cette démarche permettent d'obtenir des listes de KPI de moins en moins grandes, ce qui facilite le travail des experts.

La création des sous-groupes de KPI de la littérature à l'intérieur d'une sous-dimension s'appuie sur les matrices de comparaison créées avec les KPI de la littérature en lien avec la sous-dimension. Les experts ont alors une première indication quant aux KPI de la littérature qui ont une correspondance entre eux et qui peuvent mener à la rédaction d'un nouveau KPI CAN.

Cette synthèse prend en compte quasiment toutes les spécificités observées dans les modèles de maturité retenus pour l'étude. En effet, lors de la rédaction de KPI à partir des questions et des réponses, les experts ont conservé la totalité des informations disponibles. Pendant l'étape de synthèse, certains KPI de la littérature ne semblaient pas évaluer spécifiquement la

maturité numérique et ont été retirés. Au final, la liste des 74 KPI CAN représente les modèles de maturité numérique retenus et ne contient pas de concepts non identifiés dans les modèles retenus.

La démarche adoptée pour cette étude apporte de nombreux avantages dans la constitution d'une liste d'indicateurs de maturité numérique. Cependant, certains éléments représentent les limites de cette étude. La section suivante montre les points faibles qui ont été identifiés lors de l'application de la méthodologie et de l'analyse des résultats.

6.2 **Limites de la démarche adoptée**

La méthode de comparaison manuelle comporte une échelle à trois niveaux pour définir la correspondance entre deux KPI de la littérature. L'échelle à trois niveaux semble être un bon compromis pour la situation présente. En effet, cette approche permet de créer des liens entre les KPI de la littérature et de noter la couverture d'un modèle par rapport à un autre. De plus, une échelle avec plus de trois niveaux aurait compliqué la tâche des experts. En effet, il s'agit d'une étude qualitative et il serait difficile de caractériser le niveau d'une correspondance partielle, puisque l'évaluation repose sur des concepts variés.

Cependant, l'attribution d'une correspondance forte entre deux KPI de la littérature, représentée par la couleur verte dans les matrices $MMmat$, a engendré de nombreuses discussions entre les experts. Le résultat sur la Figure 4.1 montre qu'il y a peu de correspondances fortes et, lors de l'ajustement de la méthode semi-automatique, les experts ne cherchent pas à obtenir un score de 10 avec cette méthode de comparaison. Il serait donc possible de simplifier la méthode de comparaison manuelle et de réduire l'échelle de correspondances à deux niveaux (correspondance/pas de correspondance).

Cette méthode manuelle nécessite beaucoup de temps pour comparer l'ensemble des couples de KPI entre les modèles IMPULS et PwC. Le remplissage de la matrice $MMmat^{IMP,PwC}$

montre que le nombre de correspondances est faible face au nombre de possibilités (à gauche sur la Figure 4.4), c'est pourquoi la méthode semi-automatique a été développée.

Bien que cette deuxième méthode de comparaison mène à l'identification des correspondances trouvées avec la première méthode, le résultat, placé dans les matrices *MSAmat*, contient de **fausses correspondances** (« faux positifs ») qui n'ont pas pu être **écartées**. En effet, ces correspondances, identifiées en violet dans les matrices *SPmat* du chapitre 4, lient deux KPI de la littérature qui ont des mots-clés en commun, mais l'examen des deux énoncés par les experts montre que les deux KPI n'ont pas la même intention.

Une étape de seuillage a été imaginée pour éliminer automatiquement tous ces éléments des matrices *MSAmat*. Par exemple, toutes les correspondances avec un score inférieur ou égal à 2 pourraient être supprimées. Cependant, cette action enlèverait également des correspondances identifiées manuellement par les experts. En effet, l'analyse de la matrice de comparaison *MSAmat*^{IMP,PWC} montre que les correspondances partielles et fortes identifiées par les experts n'ont pas obligatoirement un score élevé avec la méthode de comparaison semi-automatique. Ainsi, certaines vraies correspondances faibles se retrouvent confondues avec du bruit lié aux mesures de similarité. Cette observation a été notée une nouvelle fois lorsque les experts ont vérifié la matrice de comparaison entre les listes de KPI CAN et GER.

Ainsi, la méthode de comparaison semi-automatique s'appuie sur les mots-clés et non sur les KPI de la littérature. Les scores obtenus avec cette méthode indiquent la proportion de mots-clés qui lient les couples de KPI de la littérature. Lorsque ce score est élevé (supérieur ou égal à 8), les KPI portent globalement, sur le même concept. À l'inverse, lorsque le score obtenu est faible, les KPI n'évaluent pas le même concept. Cependant, ces observations ne peuvent pas être généralisées à toutes les correspondances suite à l'analyse des matrices de comparaison *MSAmat*. Certaines correspondances fortes ont un score faible, par exemple, IMP 21 et PWC 5 (Figure 4.4).

Cette idée de seuillage a donc été abandonnée et, plutôt que de vérifier toutes les correspondances des matrices de comparaison *MSAmat*, toutes les correspondances sont conservées. Ce travail de vérification a été effectué en même temps que la démarche de synthèse lorsque les experts ont cherché à formé des sous-groupes de KPI de la littérature liés à une même sous-dimension.

L'ordre de traitement des modèles de maturité retenus constitue une autre limite de la méthode développée. Ainsi, l'apparition d'une sous-dimension ou d'un mot-clé dépend de l'ordre dans lequel les modèles de maturité sont étudiés. Dans ce mémoire, les modèles IMPULS, PwC et ADN 4.0 ont été les premiers modèles étudiés et apportent le plus de nouvelles sous-dimensions. Un travail équivalent réalisé dans un autre ordre aurait montré que l'apparition des sous-dimensions était due aux premiers modèles étudiés et pas obligatoirement aux modèles cités précédemment. L'information importante à retenir est qu'à partir de l'étude d'un certain nombre de modèles de maturité (ici, ce nombre est de 3), **les autres modèles retenus confirment principalement les concepts identifiés dans les modèles précédents** et les indicateurs de suivi du nombre de sous-dimensions et du nombre de mots-clés convergent.

De plus, il est difficile de juger l'impact qu'aurait pu avoir sur les résultats le fait de mener la même étude avec les mêmes modèles de maturité, mais en les traitant selon une séquence différente. Il est possible d'imaginer que la matrice de mots-clés *MCmat* aurait été différente et la structure du résultat l'aurait été aussi. Cependant, le résultat devrait couvrir le même périmètre, puisque les modèles seront toujours traités un par un permettant l'identification de tous les concepts en lien avec la maturité numérique.

La réalisation de la démarche de synthèse montre également une limite quant aux traitements des KPI de la littérature supprimés volontairement par les experts. À la fin de l'étape de vérification, certains de ces KPI de la littérature sont devenus « totalement utilisés » par un KPI CAN, alors qu'ils avaient initialement été supprimés bien qu'un KPI CAN proche avait été rédigé.

Pour éviter cette incohérence, les experts ne devraient pas supprimer des KPI pendant la démarche de synthèse et justifier leur choix de suppression seulement lorsque la liste de KPI CAN est rédigé complètement.

De plus, l'étape de vérification se limite à comparer chacun des KPI de la littérature (non utilisés, partiellement utilisés ou supprimés) directement avec la liste de KPI CAN. Une amélioration de la démarche serait d'effectuer, après l'étape de vérification, une nouvelle itération de toute la démarche de synthèse pour contrôler l'utilisation de tous les KPI de la littérature.

Une dernière limite est identifiée dans la démarche adoptée, et elle porte sur l'étendue des recherches au sujet de la maturité numérique. En effet, dans ce mémoire, les quatre experts se sont limités à étudier les informations sur la maturité numérique accessibles dans la littérature scientifique, en ligne ou obtenues auprès de partenaires. Quelques experts, externes au projet, sont intervenus pour apporter leur connaissance sur le sujet de la maturité numérique. Ainsi, des entrevues avec des consultants, des industriels ou encore des chercheurs, experts dans le domaine de la maturité numérique, pourraient être planifiées pour avoir une meilleure compréhension de la maturité numérique et valider la liste de KPI CAN.

6.3 Validité de la méthodologie et de la liste de KPI CAN

La démarche développée et mise en application dans ce projet pour obtenir la liste de 74 KPI CAN s'appuie sur l'intervention d'experts. En effet, dès la revue de littérature et dans les méthodes observées, des experts interviennent pour effectuer ou valider des choix. Dans ce projet, **quatre experts de la transformation numérique ont été impliqués**.

Pour la démarche de comparaison, au moins trois experts ont validé les résultats de chacune des étapes, comprenant la rédaction des KPI à partir des modèles de maturité retenus, la définition des mots-clés et l'étape d'ajustement des deux méthodes de comparaison. Pour l'élaboration de la liste de KPI CAN, au moins trois experts étaient présents à chacune des

rencontres. Lors de l'absence d'un des quatre experts, ce dernier vérifiait et validait les nouveaux KPI à la rencontre suivante. Ce cadre de travail permet de confronter les avis des experts et engendre des discussions au niveau de la compréhension et des choix de chacun.

La rédaction de la liste de KPI CAN s'appuie sur les données, généralement des questions et des réponses extraites des modèles de maturité retenus pour être converties en KPI. Ces modèles de maturité sont le résultat du travail de plusieurs experts, des travaux scientifiques qui ont été révisés par des pairs ou encore des modèles développés par des organismes et utilisés pour évaluer les entreprises actuellement. Les données que ces modèles contiennent peuvent être par conséquent considérées comme validées par des experts, et forment la matière première qui a alimenté la création des KPI CAN.

Pour s'assurer de la validité de chacun des concepts identifiés dans les modèles de maturité, un indicateur statistique, noté $\mathcal{X}_{Appui, KPI CAN}^{k,l}$, indique l'importance de l'appui que chacun des KPI CAN trouve sur les modèles de maturité retenus.

Ainsi un **KPI CAN supporté par au moins deux modèles de maturité est valide**. En effet, l'identification d'un même concept dans deux modèles de maturité montre que deux groupes d'experts ont considéré que ce concept permettait d'évaluer la maturité numérique des entreprises.

Dans la liste de KPI CAN, il est possible d'observer que 3 KPI CAN ont un appui sur seulement un modèle de maturité (Tableau 6.1). Il s'agit des KPI CAN 12 (MEDEF), CAN 21 (ADN 4.0) et CAN 54 (MACH 1.6). Après avoir analysé la liste de KPI établie par l'équipe allemande du projet DIMLA, le KPI CAN 12 a une correspondance partielle avec deux KPI GER. Le modèle MEDEF n'a pas été retenu par l'équipe allemande. Le concept contenu dans le KPI CAN 12 a donc été identifié dans au moins un autre modèle par l'équipe allemande. Par conséquent, le KPI CAN 12 peut être considéré comme validé à l'aide de la liste de KPI GER.

Tableau 6.1 Liste des 3 KPI CAN avec un seul appui sur la littérature

KPI CAN	Intitulé du KPI CAN	Dimension	Sous-dimension
CAN 12	Ability of the organization to identify and manage the obstacles to the deployment of the digital strategy	Business, strategy & governance	Implementation & deployment
CAN 21	Availability of products/services configuration tools	Smart portfolio & customer service	Configuration tools
CAN 54	Ability of the organization to specify, plan and communicate to the stakeholders the actions, frequencies and budgets for the maintenance of digital assets	IT & software tools	Upgradability & maintenance

Pour les 2 autres KPI, les experts ont décidé de les conserver, même s'ils ne s'appuient que sur un seul modèle. En effet, ce mémoire vise à répertorier et à intégrer tous les KPI de la littérature relevant de l'évaluation de la maturité numérique des entreprises. Bien que ces KPI CAN ne s'appuient que sur un seul modèle de maturité, ils contribuent à l'évaluation de la maturité numérique. Idéalement, pour confirmer leur place dans la liste de KPI CAN, il faut identifier d'autres modèles de maturité numérique dont au moins une question se rapporterait à chacun de ces KPI CAN.

De manière générale, plus le nombre de modèles de maturité retenus est élevé et plus le résultat final est valide. En effet, l'observation d'un même concept dans plusieurs modèles de maturité suggère l'importance relative de ce concept. L'étude de nouveaux modèles de maturité contribuerait donc à valider la méthodologie développée dans ce mémoire et le résultat final obtenu.

Pour intégrer de nouveaux modèles, il suffirait de rédiger les KPI et de leur attribuer des mots-clés. La démarche de synthèse consisterait alors à vérifier que les nouveaux KPI de la littérature sont contenus dans un ou plusieurs KPI CAN. Dans le cas contraire, il faudrait rédiger un nouveau KPI CAN.

Cependant, la convergence des indicateurs de suivi, du nombre de sous-dimensions et du nombre de mots-clés, montre que la liste actuelle de KPI CAN couvre adéquatement l'ensemble des concepts associés à l'évaluation de la maturité numérique.

Avec seulement 3 KPI CAN qui ont un appui faible, la liste de 74 KPI CAN résultants de la synthèse de 451 KPI issus de 13 modèles de maturité retenus montre que la démarche adoptée dans ce mémoire fonctionne. Cette liste de KPI CAN peut contribuer à la **création d'un modèle d'évaluation de la maturité numérique** des entreprises.

Un dernier constat sur la liste d'indicateurs de la maturité numérique obtenue est l'absence d'indicateurs relatifs à l'évaluation de la maturité des technologies. En effet, la littérature n'évalue pas ou peu cette idée. Ce constat a été mentionné par Schwer et al. (2018). Ainsi, la question porte sur la nécessité de l'évaluation de la maturité des technologies comme élément d'évaluation de la maturité numérique des entreprises.

CONCLUSION

Une révolution est en marche et il s'agit de la quatrième révolution industrielle. Comme les précédentes, cette révolution introduit de nouvelles technologies et de nouvelles méthodes de travail au sein des entreprises. Cette transformation de l'industrie a pour objectif d'améliorer la productivité des entreprises, mais son impact est beaucoup plus large.

Ainsi, la quatrième révolution industrielle modifie **les modes de production** (utilisation de nouvelles technologies), **les produits et les services, a des effets sur l'environnement** (écoconception, définition du cycle de vie, abandon de la production de masse), **sur la société** (insertion de robot ou « cobot » dans les entreprises, acquisition de nouvelles connaissances et des compétences nécessaires) et **sur l'économie** (réduction des coûts de fabrication) (Schwab, 2016).

Les entreprises modifient actuellement leur organisation pour répondre aux exigences de la transformation numérique. Les modèles de maturité servent à évaluer la situation de ces entreprises et à les guider dans les futures étapes de leur transformation. L'objectif de ce projet était de **créer une liste d'indicateurs de la maturité numérique**, notée KPI CAN, à partir des modèles d'évaluation de la maturité numérique de la littérature. Ce mémoire propose une démarche pour comparer les modèles de maturité numérique retenus et synthétiser les KPI de la littérature.

Une revue de littérature permet de montrer que de nombreux modèles évaluant la maturité numérique ont été développés. L'étude de ces modèles indique que **chaque auteur développe sa vision de la maturité numérique**.

Ces modèles de maturité sont globalement organisés de la même manière. Ainsi, **chacun de ces modèles contient des questions et des réponses qui sont réparties dans des dimensions** et parfois des sous-dimensions. Ces dernières indiquent les concepts autour

desquels les auteurs articulent leur évaluation. Enfin, des niveaux de maturité sont définis pour indiquer l'avancement d'une entreprise dans sa transformation numérique.

Cependant, la portée de cette évaluation varie d'un modèle à l'autre. Chacun des modèles de maturité axe son évaluation sur différents concepts comme le montrent les noms de leurs dimensions. Ainsi, la comparaison de deux modèles de maturité révèle une couverture partielle, c'est-à-dire que certains concepts sont évalués dans les deux modèles, alors que d'autres sont spécifiques à chacun. Aucun des modèles de maturité retenus dans cette étude ne contient l'ensemble des concepts identifiés dans les autres modèles.

À partir de cette observation, une première démarche de comparaison est mise en place pour examiner les similarités et les différences entre les modèles de maturité avec l'implication de quatre experts. **Deux méthodes de comparaison** ont été utilisées. La première, dite « **manuelle** », nécessite beaucoup de temps et a été remplacée par une seconde, dite « **semi-automatique** ». Pour uniformiser la comparaison, des listes de KPI sont rédigées en utilisant les questions et les réponses des modèles de maturité retenus. Cette étape mène à la rédaction de **451 KPI issus de 13 modèles de maturité numériques**. Des mots-clés sont attribués à chacun de ces KPI de la littérature et sont classés dans une matrice. Un outil informatique permet ensuite d'identifier les KPI de la littérature partageant un ou des concepts en commun et s'appuyant sur ces mots-clés.

Le classement des mots-clés conduit à la définition de **12 dimensions et de 58 sous-dimensions**. Cette structure sert premièrement de référence pour comparer les modèles de maturité retenus. Le résultat de cette comparaison, obtenu à l'aide d'indicateurs statistiques, montre que les dimensions « Human resources », « Business, strategy & governance » et « IT & software tools » sont importantes dans les modèles de maturité retenus pour l'étude.

Dans l'objectif de créer une liste d'indicateurs de la maturité numérique, une synthèse des KPI de la littérature complète la démarche de comparaison. La structure en dimensions et sous-dimensions, définie précédemment, sert dans un second temps à synthétiser les KPI

issus des modèles de maturité retenus. Ainsi, chaque sous-dimension regroupe des KPI de la littérature, qui contiennent au moins un mot-clé de cette sous-dimension. À partir de ces groupes de KPI de la littérature, **au moins trois experts** synthétisent ces KPI pour rédiger de nouveaux KPI, les KPI CAN, en s'aidant des indicateurs statistiques, des matrices de comparaison et des mots-clés.

Cette démarche de synthèse aboutit à la création d'une **liste de 74 indicateurs de maturité numérique** (notée KPI CAN). Cette liste a la particularité de prendre en compte la totalité des 13 modèles de maturité numérique retenus. Chacune des sous-dimensions en lien avec la maturité numérique est couverte par au moins un KPI CAN de cette liste. Ces 74 indicateurs de maturité numérique ne sont pas observés dans tous les modèles de maturité. Certains sont liés à un seul modèle alors que d'autres montrent une convergence entre tous les modèles de maturité. Ainsi, un classement de ces nouveaux KPI CAN, en fonction de leur appui sur les modèles de maturité retenus, permet d'identifier les KPI CAN les plus importants, ou qui font davantage consensus, pour l'évaluation de la maturité numérique des entreprises.

Cette liste de KPI CAN montre de nombreuses similarités avec la liste de KPI GER, qui est la liste d'indicateurs de maturité numérique générée par l'équipe allemande du projet DIMLA. En effet, ce projet s'inscrit dans un projet international qui associe une équipe canadienne à une équipe allemande. Ces deux listes de KPI ne sont pas identiques, mais montrent un **consensus autour des dimensions importantes**, ce qui permet de valider la démarche adoptée et le résultat obtenu.

L'objectif du projet DIMLA est de créer un modèle de maturité numérique. Le projet DIMLA s'intéresse plus particulièrement aux PME du secteur aéronautique pour leur donner la possibilité d'évaluer leur niveau de maturité 4.0. À l'aide des listes d'indicateurs de maturité, KPI CAN et KPI GER, deux équipes de consultants et d'industriels vont transformer les KPI en jeux de questions et réponses. Ces derniers sont développés pour les PME du secteur de l'aéronautique, mais les listes de KPI CAN et GER peuvent s'appliquer aussi bien aux petites qu'aux grandes entreprises et dans de nombreux domaines. En effet, les

modèles de maturité de la littérature pris en compte ne spécifient pas un type d'entreprise ou un secteur particulier.

À la suite de ce projet, d'autres avenues de recherches sur la maturité numérique peuvent être envisagées. Ainsi, l'intégration d'autres modèles de maturité à l'aide de la démarche de comparaison développée permettrait de confirmer ou d'élargir la portée de cette étude.

De plus, l'évaluation de la maturité numérique des entreprises avec les modèles de maturité est une première étape qui permet de donner un niveau qui représente l'état d'avancement des entreprises dans leur transformation numérique. Une seconde étape a pour objectif de guider les entreprises dans leurs futurs investissements.

Actuellement, certains outils d'auto-évaluation présentent les différents niveaux de maturité pour chaque dimension. Avec sa note et son niveau de maturité associé, une entreprise a une idée globale sur les différents changements qu'elle doit opérer en observant les critères du niveau de maturité supérieur. Cependant, ces outils ne proposent pas de démarche permettant de prioriser les alternatives possibles ni d'identifier les étapes à suivre. Pour cela, des organismes proposent des audits aux entreprises pour les aider dans leur transformation. Ces audits permettent de créer une feuille de route et de personnaliser la transformation de chacune des entreprises qui ont toute une organisation différente. Une réflexion sur la création d'une feuille de route en lien avec le modèle de maturité DIMLA permettrait alors un meilleur accompagnement des entreprises.

ANNEXE I

ÉVOLUTION DES PUBLICATIONS SUR LA TRANSFORMATION NUMÉRIQUE

Pour observer l'intérêt mondial à l'essor du concept « Industrie 4.0 » et plus généralement à la transformation numérique, plusieurs requêtes ont été effectuées dans les bases de données Scopus et Web of Science. Les conclusions de cette annexe sont reprises dans la sous-section 1.1.4.

Une liste des termes autour du concept « Industrie 4.0 » a été constituée. Ainsi, dans le rapport du CEFRI (Danjou et al., 2017), une première liste est proposée :

- Industry 4.0,
- Industrie 4.0,
- Industrial 4.0,
- Industrial Internet,
- Smart production,
- Smart Manufacturing,
- Smart factory,
- Smartfactory,
- Factory of the future,
- Factories of the future,
- Advanced Manufacturing,
- Intelligent Manufacturing,
- Industry of the future,
- Industries of the future,
- High value manufacturing,
- Smart Industry,
- SmartIndustry,
- Manufacturing 4.0,
- Integrated industry,
- Digital factory,
- Manufacturing Renaissance,
- Make in India.

À cette liste, il est possible d'ajouter de nouveaux termes qui sont apparus plus récemment et rencontrés dans la littérature à plusieurs reprises :

- Industrie du futur,
- Transformation numérique,
- Digital transformation,
- Made in China 2025,
- Usine du futur,
- Usine connectée,
- Quatrième révolution industrielle,
- Fourth industrial revolution.

Une première étape a été de rechercher individuellement chacun de ces termes dans les deux bases de données en concentrant les requêtes sur les titres, les mots-clés et les résumés. À partir de cette étude, seuls les termes apparaissant dans plus de 200 documents dans les deux bases de données ont été sélectionnés. Pour donner suite à cette analyse, seule la base de données Scopus a été retenue du fait que Web of Science renvoyait un nombre de documents inférieur à Scopus pour les mêmes requêtes.

Ensuite, une requête plus globale a été lancée pour observer l'évolution du nombre de publications entre 2006 et 2019 sur les titres, les mots-clés et les résumés des documents dans Scopus :

("Industry 4.0" OR "Advanced Manufacturing" OR "Digital transformation" OR "Industrial Internet" OR "Fourth industrial revolution" OR "Digital factory" OR "Intelligent Manufacturing" OR "Smart Manufacturing" OR "Smart factory" OR "Industrie 4.0").

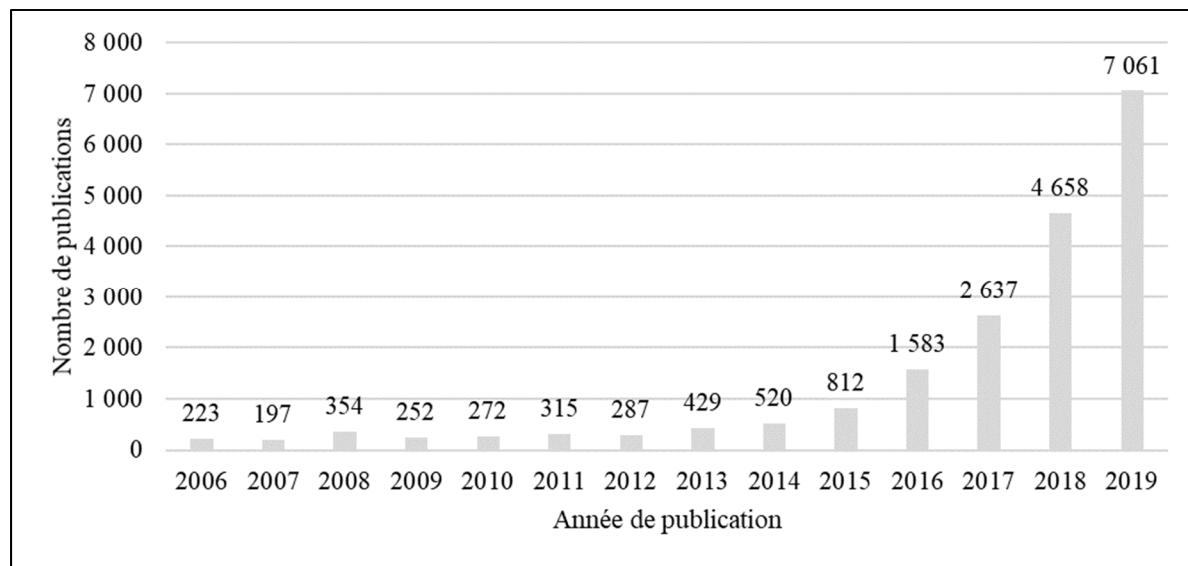


Figure-A I-1 Nombre de publications par année en lien avec l'« Industrie 4.0 » entre 2006 et 2019, issue de la base de données Scopus, consultée le 18 mars 2020

Cet intérêt grandissant et mondial s'observe également dans les bases de données. Dans le rapport pour le CEFRI (Danjou et al., 2017), les auteurs avaient déjà noté que le

phénomène de l' « Industrie 4.0 » suscitait un intérêt croissant depuis 2012 jusqu'en 2015. La Figure-A I-1 montre que cet engouement est toujours d'actualité. La forte croissance du nombre de publications, depuis 2015 jusqu'en 2019, montre que la transformation numérique est en cours et que de nombreux scientifiques effectuent des travaux de recherches à ce sujet.

Cette requête permet également d'observer les pays qui contribuent le plus aux recherches sur l'« Industrie 4.0 ». Sur la Figure-A I-2, il est présenté les 20 pays qui ont le plus de publications sur la période 2006 à 2019.

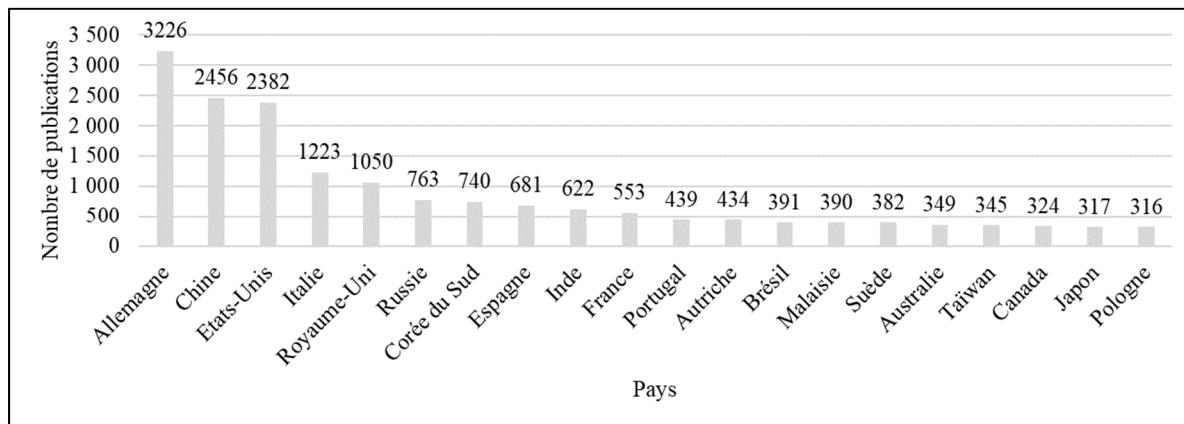


Figure-A I-2 Pays avec le plus de publications sur l'« Industrie 4.0 » entre 2006 et 2019, issue de la base de données Scopus, consultée le 18 mars 2020

Cette analyse, dans Scopus, indique que tous les continents sont conscients de cette révolution. Cependant, trois pays ont de l'avance sur les autres. Ainsi, le nombre de publications en Allemagne (3 226) dépasse largement tous les autres pays ce qui montre son avance sur le domaine. Ensuite, les Etats-Unis et la Chine devancent les autres pays assez largement. Ces trois pays regroupent plus d'un tiers des publications à eux seuls. Ensuite, le Royaume-Uni et l'Italie se démarquent avec plus de 1 000 publications chacun. Enfin, la Russie, la Corée du Sud, l'Espagne, l'Inde, la France ont un nombre de publications moindre au cours de cette même période.

En 2019, la dynamique autour de l'« Industrie 4.0 » est toujours forte et les cinq pays qui publient le plus sont la Chine, l'Allemagne, les Etats-Unis, l'Italie et Royaume-Uni. Entre 2006 et 2015, 42 pays possédaient au moins 10 publications (Danjou et al., 2017). Actuellement, sur la période allant de 2006 à 2019, ce nombre est en hausse et a doublé sur les quatre dernières années. Désormais, 80 pays possèdent au moins 10 publications sur le sujet de la transformation numérique.

ANNEXE II

DÉFINITIONS DES 9 GROUPES TECHNOLOGIQUES SUPPORTANT LA TRANSFORMATION NUMÉRIQUE

Dans cette annexe, il est proposé une définition pour chacun des 9 groupes technologiques identifiés dans la littérature (sous-section 1.2.2). Ces définitions sont issues principalement des 4 documents desquels sont extraits les 9 groupes technologiques : Danjou et al. (2017), Oztemel & Gursev (2020), Rüßmann et al. (2015) et Salkin et al., (2018).

Internet des Objets (IoT)

L'Internet des Objets (en anglais « Internet of Things ») repose sur l'ensemble des objets connectés. Ainsi, ce groupe technologique permet une communication entre le monde physique (les objets) et le monde virtuel à l'aide d'Internet et des réseaux de télécommunication.

L'IoT est aussi nommé « IIoT » (en anglais « Industrial Internet of Things ») pour désigner l'Internet des Objets pour les Industries (Schaeffer, 2017).

L'IoT regroupe les technologies comme les puces RFID (en anglais « Radio-Frequency Identification »), les réseaux de capteurs sans fil (WSN), les logiciels et les inter-logiciels (Danjou et al., 2017 ; Salkin et al., 2018). Il permet également de supporter d'autres groupes technologiques comme l'analyse des mégadonnées, la simulation ou encore les CPS.

Systèmes Cyber-Physiques (CPS)

Les Systèmes Cyber-Physiques (en anglais « Cyber-Physical Systems », CPS) sont des mécanismes qui sont composés de logiciels, de composants électroniques (capteurs, actionneurs) et de communication. Ils permettent de faire fonctionner et de contrôler des objets physiques en temps réel (Danjou et al., 2017).

Également appelés systèmes embarqués, ce sont des entités autonomes qui ont la possibilité d'agir les uns sur les autres en « échangeant des informations » (Hermann, Pentek, & Otto, 2015).

Les CPS sont donc en mesure de prendre des informations dans le monde réel, et, du fait qu'ils sont connectés au réseau de l'entreprise, peuvent agir sur les modes et les processus de fabrication instantanément (Lee, Bagheri, & Kao (2015) cités par Salkin et al., 2018).

Simulation

La simulation, aussi appelée « virtual manufacturing » (Oztemel & Gursev, 2020), correspond à l'analyse et au contrôle d'un objet ou d'une personne dans un monde artificiel. La simulation est très développée dans le domaine de l'ingénierie notamment avec le développement de la Conception Assistée par Ordinateur (CAO) et l'ajout d'efforts ou de contraintes sur l'objet dessiné.

La simulation permet d'analyser l'efficacité d'une nouvelle ligne de production, de simuler l'ensemble des interactions entre les machines, les produits et les humains (Rüßmann et al., 2015). Il est alors possible d'optimiser virtuellement la chaîne de production pour assurer la robustesse du processus (Salkin et al., 2018).

Les outils permettant de réaliser des simulations sont les logiciels CAO, les logiciels de modélisation, le PLM, le prototypage rapide (Oztemel & Gursev, 2020).

Mégadonnées, analyse et Intelligence Artificielle (IA)

Les mégadonnées ou les données massives (en anglais « Big data ») regroupent l'ensemble des informations qui peuvent être enregistrées dans la vie quotidienne. Les données issues des objets connectés, qui retiennent la position par exemple, celles issues des réseaux sociaux ou encore des outils de production en sont de bons exemples (Oztemel & Gursev, 2020). Le

volume de données est devenu tellement important au fil de ces dernières années que l'homme a été obligé de créer des méthodes pour les analyser. Le rapport de Rüßmann et al. (2015) précise que l'analyse de ces données est une aide pour la prise de décision dans les entreprises.

Il n'existe pas une définition unique de l'IA dans la littérature. Une définition globale est présentée dans cette annexe. Ainsi, dans son ouvrage, Nilsson (2009, p. 13) définit l'AI de la manière suivante : « *artificial intelligence is that activity devoted to making machines intelligent, and intelligence is that quality that enables an entity to function appropriately and with foresight in its environment* ». L'Intelligence Artificielle peut permettre à des machines de réaliser des tâches humaines à l'aide de théories. Dans le cadre de la transformation numérique, l'IA permettrait à une machine de fabriquer une pièce à partir des informations issues de la fabrication d'autres pièces, par exemple.

L'exploration des mégadonnées est parfois combinée à des algorithmes d'arbres de décision, des réseaux de neurones pour de la classification de données, des méthodes d'apprentissage ou des prises de décision (Salkin et al., 2018).

Cybersécurité

La cybersécurité est l'ensemble des mesures et des techniques qui visent à protéger le réseau, les ordinateurs et les données contre les « cyberattaques ». Il s'agit de l'un des risques les plus importants de la transformation numérique.

Il faut donc être vigilant et utiliser des protocoles de communication stricte pour se protéger de cette menace (Danjou, Rivest & Pellerin, 2017). La cybersécurité consiste à sécuriser les technologies d'exports de données, protéger les informations confidentielles et gérer les accès aux données (Salkin et al., 2018).

Réalité augmentée (AR)

La réalité augmentée correspond à la vision du monde réel en introduisant des éléments modifiés à l'aide d'interfaces en temps réel (Salkin et al., 2018 ; Oztemel & Gursev, 2020). Le fait d'ajouter des modifications virtuelles à un élément réel conduit à l'expression de réalité « augmentée ».

Au sein de l'industrie, cette technologie peut être utilisée pour des opérations de maintenance. L'opérateur, muni d'un outil de réalité augmentée, pourra réparer un système plus facilement, car, dans son champ de vision, il apparaîtra la zone défectueuse ainsi que toutes les informations nécessaires pour réaliser sa tâche (Rüßmann et al., 2015).

Machines autonomes

Il s'agit certainement du groupe technologique le plus large de cette liste. Ainsi, les machines autonomes regroupent les robots autonomes et les procédés de fabrication additive. Ces deux technologies sont en rupture avec ce qui peut être observé actuellement dans les usines de production. Les machines autonomes doivent permettre à l'industrie de devenir « plus autonomes, plus flexibles et coopératives » (Danjou et al., 2017, p. 15).

Les robots, qui étaient cantonnés majoritairement au contrôle des produits, sont aujourd'hui capables de réaliser n'importe quelles tâches (Schwab, 2016). Ces robots pourront interagir avec les humains, ce sont des « cobots » ou « robots intelligents » (Salkin et al., 2018). Ils sont capables de réaliser des opérations complexes et répétitives.

La fabrication additive est également une révolution dans les méthodes de production. Elle utilise directement le modèle numérique d'un objet (réalisé sur un logiciel CAO) pour fabriquer la pièce par un processus d'ajout de matière (Salkin et al., 2018). Ce procédé de fabrication couche par couche (de l'ordre du micron) est préféré à l'enlèvement de matière ce

qui réduit la quantité de déchets. Cette méthode de production permet de personnaliser le produit pour un coût minimal et favorise la production unitaire (Rüßmann et al., 2015).

Infonuagique (Cloud)

L'infonuagique (en anglais « Cloud ») est un moyen de stockage des données à distance en utilisant le réseau Internet. De plus, il permet d'utiliser la puissance de calcul de serveurs informatiques externes.

Pour la transformation numérique d'une entreprise, il s'agit de stocker l'ensemble des données qu'elle possède et de faire en sorte que toutes les machines y aient accès pour s'en servir (Danjou et al., 2017). Cet outil facilite alors le partage des données dans une entreprise et même entre plusieurs entreprises.

Il s'agit de l'outil de stockage le plus simple qui ne nécessite aucune installation, partage et protège les données (Oztemel & Gursev, 2020).

Communication inter-machines (en anglais « Machine-to-Machine », M2M)

La Communication inter-machines désigne de manière générale la liaison entre deux objets intelligents qui deviennent autonomes. Ces objets ont accès à une base de données pour communiquer entre eux.

Dans le cadre d'une entreprise, la communication M2M correspond à un réseau interne à l'entreprise qui consiste à relier les machines entre elles (Danjou et al., 2017). Ce groupe technologique se repose sur la télécommunication et permet de s'affranchir d'une intervention humaine (Oztemel & Gursev, 2020).

ANNEXE III

INVENTAIRE DES MODÈLES DE MATURITÉ NUMÉRIQUE

Cette annexe répertorie l'ensemble des modèles de maturité récupérés dans la littérature scientifique, en ligne ou auprès de divers organismes par ordre chronologique.

Le Tableau-A III-1 regroupe ainsi 19 modèles de maturité numérique. Ils sont comparés en fonction du nombre de dimensions, sous-dimensions, questions (portant sur la maturité numérique de l'entreprise) et indicateurs de maturité formulés dans le modèle, du type de réponses possibles et de leur échelle de maturité (sous-section 1.3.2).

Les 13 modèles de maturité retenus pour la démarche de comparaison et de synthèse sont identifiés à l'aide d'un astérisque dans le tableau ci-dessous (section 4.1).

Tableau-A III-1 Comparaison de la structure des modèles de maturité numérique

Modèle de maturité numérique	Nombre de dimensions et de sous-dimensions	Nombre de questions et/ou de KPI	Type de réponse	Niveaux de maturité
Gestion et gouvernance des technologies numériques (MACH 1.6) (Aéro Montréal, 2011) *	4 dimensions	49 questions	Un seul choix parmi 5 réponses équivalent à un niveau (MACH 1 à 5) Parfois des sous-questions aident à définir le niveau	5 niveaux (de MACH 1 : « Understand excellence » à MACH 5 : « Impose excellence »)
Industry 4.0 Readiness Online Self-Check for Businesses (IMPULS, 2015) *, ^c	6 dimensions 18 sous-dimensions	19 questions	Réponses à choix multiple	6 niveaux (Niveau 0 : « Outsider » à 5 : « Top performer »)
Industry 4.0 - Enabling Digital Operations Self Assessment (PricewaterhouseCoopers, 2015) *, ^d	6 dimensions dans l'outils en ligne (7 dimensions dans le rapport de (Geissbauer et al., 2016)	33 questions	Deux curseurs pour évaluer l'état actuel et l'objectif à atteindre avec 5 niveaux chacun	4 niveaux (de « Digital novice » à « Digital champion »)

Modèle de maturité numérique	Nombre de dimensions et de sous-dimensions	Nombre de questions et/ou de KPI	Type de réponse	Niveaux de maturité
A Maturity Model for Assessing Industry 4.0 Readiness and Maturity (Schumacher et al., 2016)	9 dimensions	Identification de 62 « items » Pas accès à toutes les questions (un exemple)	Un seul choix parmi 5 réponses équivalent à un niveau	5 niveaux (de 1 à 5)
CLIMB model (Rossi & Terzi, 2016)	4 dimensions 8 sous-dimensions	107 questions (« Best practices »)	Un seul choix parmi 5 réponses équivalent à un niveau	5 niveaux (de « Chaos » à « Best Practice »)
Évaluer la maturité numérique de votre entreprise (MEDEF France, 2016) *	5 dimensions	33 questions	Un curseur à 3, 4 ou 5 possibilités de réponse	5 niveaux (de « Retardataire » à « Précurseur »)
The Digital Maturity Model 4.0 (Gill & VanBoskirk, 2016) *	4 dimensions	28 questions	4 réponses possibles (0 à 3) représentant l'accord avec l'énoncé	4 niveaux (de « Skeptics » à « Differentiators »)
A technological readiness perspective (Samaranayake et al., 2017)	6 dimensions	Identification de 21 « factors »	<i>Information non disponible</i>	4 niveaux
ADN 4.0 – Autodiagnostic (Ministère de l'Économie et de l'Innovation Québec, 2017) *	3 dimensions 11 sous-dimensions	50 questions	Un seul choix de réponse par question (nombre de possibilités variant)	4 niveaux (de 1 : « Bronze » à 4 : « Platine »)
Assessment Tool (Singapore Economic Development Board, 2017) *	3 dimensions 8 sous-dimensions	Définition de 16 KPI	<i>Information non disponible</i>	6 niveaux définis et décrits pour chaque indicateurs
Industry 4 readiness assessment tool (University of Warwick, 2017) * ^e	6 dimensions 37 sous-dimensions	37 questions	Un seul choix parmi 6 réponses équivalent à un niveau	4 niveaux (de « Beginner » à « Expert »)
Transformation digitale (Cegos, 2017) *	3 dimensions	18 questions	4 réponses possibles représentant l'accord avec l'énoncé (pas du tout à complètement)	4 niveaux (de « A l'entraînement » à « Enchaîne les sprint »)
Digital maturity (Rossmann, 2018)	8 dimensions	Identification de 32 « items »	<i>Information non disponible</i>	7 niveaux (de « does not apply » à « totally applies »)

Modèle de maturité numérique	Nombre de dimensions et de sous-dimensions	Nombre de questions et/ou de KPI	Type de réponse	Niveaux de maturité
Digitalomètre (Bpi France, 2018) *	4 dimensions	25 questions	Un curseur à 3 ou 5 niveaux (non concerné à oui totalement)	Note sur 100 pour chaque dimension
DREAMY (Digital Readiness Assessment MaturitY model) (De Carolis, Macchi, Negri, & Terzi, 2017) ; (De Carolis, Macchi, Negri, & Terzi, 2018)	4 dimensions	Environ 200 questions (pas d'accès)	Un seul choix parmi 5 réponses équivalent à un niveau	5 niveaux (de « ML 1 Initial » à « ML 5 Digital-Oriented »)
Maturity and Readiness Model for Industry 4.0 Strategy (Akdil et al., 2018) *	3 dimensions 13 sous-dimensions	68 questions	Un seul choix de réponse ou choix multiple (nombre de possibilités variant)	4 niveaux (de 0 : « Absence » à 3 : « Maturity »)
SMART DIAG' - Diagnostic numérique (AGEFOS PME, 2018) *	11 dimensions (accès à seulement 4 dimensions)	Accès à 25 questions et 11 questions à tiroirs	Curseur avec différents niveaux ou réponse à choix multiple	Note sur 10 pour chaque dimension
Smart Manufacturing Maturity Model for SMEs (SM ³ E) (Mittal et al., 2018a)	5 dimensions 23 sous-dimensions	<i>Information non disponible</i>	<i>Information non disponible</i>	5 niveaux (de « Novice » à « Expert »)
Adoption Maturity Model (AMM) (Scrémin et al., 2018) *	3 dimensions 8 sous-dimensions	30 KPI Pas accès aux questions du modèle de maturité	<i>Information non disponible</i>	5 niveaux (de 0 à 4)

^c Données validées et/ou complétées à l'aide du rapport de Lichtblau et al. (2015).

^d Données validées et/ou complétées à l'aide du rapport de Geissbauer et al. (2016).

^e Données validées et/ou complétées à l'aide du rapport de Agca et al. (2017).

ANNEXE IV

CLASSIFICATION DES MOTS-CLÉS DANS LES DIMENSIONS ET LES SOUS-DIMENSIONS

L'étape d'attribution de mots-clés pour les 13 modèles d'évaluation de la maturité numérique retenus permet de créer une matrice qui contient alors tous les concepts identifiés par les experts. Cette matrice, notée *MCmat*, permet de structurer le travail de comparaison et de synthèse des KPI de la littérature (sous-section 4.4.2).

À la fin du travail de synthèse des KPI de la littérature, la liste de KPI de l'équipe allemande du projet DIMLA, notée KPI GER, a été intégrée à l'outil de comparaison. Cette nouvelle liste a été comparée aux 13 modèles de maturité numérique retenus pour l'étude et à la liste de KPI CAN. Cette nouvelle liste n'a pas ajouté de nouveaux concepts, mais 21 mots-clés ont été insérés dans la matrice *MCmat* (sous-section 5.3.1). Ces mots-clés sont repérés dans le Tableau-A IV-1 par la couleur bleue.

Dans un premier temps, les experts classent les mots-clés en considérant que chaque ligne ne peut contenir qu'un seul concept. Dans un second temps, chaque ligne est désignée par un nom qui correspond à celui de la sous-dimension. Dans un troisième temps, les lignes sont réorganisées pour réunir les sous-dimensions à l'intérieur de concepts plus larges, appelés dimensions.

Cette annexe représente cette matrice, nommée *MCmat*, dans le Tableau-A IV-1. La comparaison automatique des 15 listes de KPI (KPI de la littérature, KPI CAN et KPI GER) permettant l'évaluation de la maturité numérique repose ensuite sur cette matrice. Ce tableau reprend donc les 284 mots-clés (263 + 21) utilisés par les experts de l'équipe canadienne qui sont classés à l'aide des dimensions et des sous-dimensions.

Tableau-A IV-1 Matrice de mots-clés *MCmat* incluant les dimensions et les sous-dimensions

Dimension	Sous-dimension	Mots-clés
Business, strategy & governance	Business model & strategy	business model, business operations, business outcomes, business requirements, commercial activity, core competencies , economic benefits, revenues, strategic plan, strategic vision, value creation.
	Digital awareness	i4.0 awareness, i4.0 knowledge, i4.0 openness
	Digital strategy	digital strategy, digital strategy communication, digital strategy documentation , digital strategy review, external audit, i4.0 strategy, i4.0 strategy indicators.
	Digital plan & roadmap	digital plan, digital plan review, digital transformation, roadmap.
	Digital leadership	changing requirements , Chief Digital Officer, competence requirements , digital leader, digital leadership culture , digitalization requirements, future requirements, i4.0 requirements.
	Implementation & deployment	business resources allocation, competence gap , decision-making process, digital activities governance, i4.0 implementation, i4.0 projects, implementation status, IT steering process, last digital initiative, operational processes , organization's i4.0 resources, project management, selection process.
	Societal factors	energetic consumption, environmental benefits, social benefits.
	Performance management	KPI, dashboard, decision-making monitoring, forecast monitoring, performance management, time-to-market monitoring..
	Digital risk management	mitigation plan, risk management.
	IP management	contracting models, external IP, IP protection.
Smart portfolio & customer service	Organization's portfolio	organization's portfolio, organization's products.
	Smart products & services	add-on functionalities, data-driven services, digital features, digital product portfolio, smart product, smart service, tracking.
	Customization	product customization, service customization.
	Configuration tools	product configuration tools, service configuration tools.
	Dynamic pricing	dynamic pricing.
	After-sales services	after-sales, customers assistance, products guarantee.
Human resources	Management modes	collective intelligence, corporate culture, employee efficiency monitoring, employee workload monitoring, employees well-being , management modes, managers-

Dimension	Sous-dimension	Mots-clés
		employees interactions, right to disconnect.
	Managers involvement	managers involvement, managers support, role model .
	Hiring	hiring process, human resources.
	Working modes	extranet , Internet, intranet, remote working, resources mobility, working modes .
	Change management	adaptation capacity, change management.
	Skills & expertise	digital skills , employees skills, i4.0 expertise, i4.0 expertise organization, i4.0 organization's capabilities, managers expertise.
	Training	continous training , digital training, employees training, skills acquisition.
Digital security & compliance	Digital security	access control, cybersecurity, data protection, encryption, IT security, passwords management.
	Digital compliance	compliance management, digital charter, digital compliance policy, ethical issues .
Finance	Investment	future investment, i4.0 investment, past investment.
	Funding	funding sources.
	Finance	accounting tool, cash flow, cost analysis, financial management, profitability analysis.
Innovation & knowledge management	Innovation management	innovation management, patents , R&D .
	Technological watch	benchmarking, competitive intelligence, technological watch.
	Knowledge	knowledge capitalization, knowledge management.
	Traceability	order fulfillment rate traceability, traceability means.
IT & software tools	IT technologies	AM, digital technologies, HMI , IoT, IT technologies, M2M, new technologies, RFID.
	Infrastructure	equipment infrastructure, facility equipment, IT architecture, IT organization, leading system.
	IT integration	communication functionality, connectivity , interoperability functionality, IT integration, tools interfacing.
	Cloud services	cloud computing, cloud services, cloud-based software.
	Software tools	CAD, CAE, CAM, CAPM, CMMS, CRM, EDM, ERP, HRIS, HRMS, EAI, MES, software tools, software tools use.
	Upgradability & maintenance	maintenance, upgradability.
Digital data	Digital twin	digital factory, digital twin.

Dimension	Sous-dimension	Mots-clés
	Data as an asset	customer data, customer insight, digital assets, digital data, financial data, marketing data, massive data, operations data, product data, production data, usage phase data.
	Data acquisition & processing	data aggregation, data analysis, data architecture, data collection, data gathering, data interpretation, data processing, data quality check, data storage, data structuring.
	Data usage	data-based decision-making, data monitoring, data usage.
	Data sharing	data communication, data sharing, data sharing with partners, external data sharing, external information sharing, internal data sharing, internal information sharing.
	Data recovery	data backup, data recovery.
Smart manufacturing	Autonomous workpiece	autonomous workpiece, self-guiding capacities.
	Production digitalization	autonomous response, closed-loop systems, control functionality, manufacturing processes, production, production automation, production control, production environment , production equipment digitalization, production monitoring, production processes, quality control checks, self-diagnosing, system uptime monitoring, working instructions digitalization.
	Agility	agility, dynamic response, flexibility, just-in-time production, lead times, production changes, real-time response.
	Inventory	inventory digitalization, inventory management.
Internal value chain digitalization	Internal activities integration	internal activities integration, internal processes, internal value chain digitalization, organization's sectors.
	Internal collaboration	internal collaboration, internal exchanges.
	Lifecycle simulation	product development phase, product lifecycle phases, product lifecycle simulation, production phase, simulation phase.
	Development process	product development process, product improvement process, service development process.
External value chain digitalization	External activities integration	customers integration, end-to-end integration, external activities integration, external processes, external value chain digitalization, partners integration, suppliers integration.
	Customer experience	client interactions, customer experience, customer feedbacks, customer interactions.
	External collaboration	external collaboration, external exchanges.
	Supply chain & logistics	logistics, supplier interactions , supply chain.

Dimension	Sous-dimension	Mots-clés
Sales & marketing	Selling & purchasing	billing tool, e-commerce , ordering process, quoting process, sales channels, sales forces, sales tools, selling.
	Communication & marketing	communication channels, digital footprint, marketing channels, marketing tools, promotion campaign, responsiveness, social media, social networks, trend analysis, website.

LISTE DES ACRONYMES DE L'ANNEXE IV

AM	Additive Manufacturing
CAD	Computer-Aided Design
CAE	Computer-Aided Engineering
CAM	Computer-Aided Manufacturing
CAPM	Computer-Aided Production Management
CMMS	Computer-Aided Maintenance Management Systems
CRM	Customer Relationship Management
EDM	Electronic Document Management
ERP	Enterprise Resource Planning
HMI	Human-Machine Interface
HRIS	Human Resource Information System
HRMS	Human Resource Management Systems
EAI	Enterprise Application Integration
IP	Intellectual Property
MES	Manufacturing Execution Systems
R&D	Research and Development
RFID	Radio-Frequency Identification

ANNEXE V

EXEMPLE DE CALCUL D'UNE CORRESPONDANCE ENTRE DEUX KPI DE LA LITTÉRATURE AVEC LA MÉTHODE DE COMPARAISON SEMI-AUTOMATIQUE

Le développement de la démarche de comparaison des modèles de maturité conduit à l'élaboration d'un outil informatique capable d'identifier semi-automatiquement les correspondances entre les KPI de la littérature. En effet, la méthode de comparaison semi-automatique s'appuie sur les mots-clés attribués à chacun des KPI de la littérature pour comparer les modèles de maturité retenus.

Ainsi, la sous-section 3.3.3 présente deux fonctions (3.4) et (3.5) qui permettent de calculer un score entre deux KPI de la littérature. Lorsque ce score est différent de 0, il indique le nombre de mots-clés identiques ou similaires (appartenant à la même sous-dimension) entre ces deux KPI et, par conséquent, il existe une possible correspondance pour ce couple de KPI. Lorsque ce score est de 0, il montre qu'il n'y a aucune correspondance entre les deux KPI de la littérature.

Cette annexe présente alors un exemple pour comprendre les différentes opérations effectuées par l'outil informatique. Ainsi, les 2 KPI de la littérature suivants ont été sélectionnés dans les modèles IMPULS et PwC :

- IMP 22 → Share of revenues derived from data-driven services,
- PwC 2 → Degree of digitization of the organization's products and/or services.

Chacun de ces KPI est caractérisé par les mots-clés suivants :

- IMP 22 → data-driven services - revenues - business model,
- PwC 2 → smart product - smart service.

Pour les 5 mots-clés des 2 KPI de la littérature, la fonction (3.4) est employée. Ainsi, les mots-clés du KPI IMP 22 sont comparés avec les mots-clés du KPI PwC 2 et inversement.

La fonction (3.4) utilise la matrice $MCmat$ présentée dans l'annexe précédente et donne les résultats suivants :

- $\mathcal{F}_{MC}(\text{data-driven services}) = 1$, car « data-driven services » appartient à la même sous-dimension que « smart product » ;
- $\mathcal{F}_{MC}(\text{revenues}) = 0$, car aucun des mots-clés de PWC 2 n'est identique ou n'appartient à la même sous-dimension que celui-ci ;
- $\mathcal{F}_{MC}(\text{business model}) = 0$, car ce mot-clé est sur la même ligne que « revenues », si un KPI possède plusieurs mots-clés d'un même concept, ce concept est pris en compte une seule fois ;
- $\mathcal{F}_{MC}(\text{smart product}) = 1$, car « smart product » appartient à la même sous-dimension que « data-driven services » ;
- $\mathcal{F}_{MC}(\text{smart service}) = 0$, car ce mot-clé est sur la même ligne que « smart product ».

Pendant le calcul de la fonction (3.4), il est possible d'observer que des KPI sont caractérisés par plusieurs mots-clés appartenant à une même sous-dimension. Ainsi, la fonction (3.5) est la division entre la somme des fonctions (3.4), calculées précédemment, et la somme des mots-clés distincts par KPI, c'est-à-dire qu'il faut compter le nombre de concepts que représente chacun des KPI.

Ainsi, le KPI IMP 22 possède 3 mots-clés et le KPI PWC 2 en possède 2, mais le nombre de mots-clés distincts est différent :

- $n_{MC, distinct}^{IMP\ 22} = 2$, car « revenues » et « business model » appartiennent à la même sous-dimension ;
- $n_{MC, distinct}^{PWC\ 2} = 1$, car « smart product » et « smart service » appartiennent à la même sous-dimension.

Après avoir calculé toutes ces valeurs, il est possible de calculer le score entre les KPI IMP 22 et PWC 2 à l'aide de la fonction (3.5) :

$$\begin{aligned}
& \mathcal{F}_{MSA}(IMP\ 22, PWC\ 2) \\
&= \frac{\sum_{m_1=1}^{n_{MC}^{IMP\ 22}} \mathcal{F}_{MC}(\mathcal{MC}_{m_1}^{IMP\ 22}) + \sum_{m_2=1}^{n_{MC}^{PWC\ 2}} \mathcal{F}_{MC}(\mathcal{MC}_2^{PWC\ 2})}{n_{MC, distinct}^{1, j_1} + n_{MC, distinct}^{2, j_2}} * 10 \quad (A\ V-1) \\
&= \frac{(1 + 0 + 0) + (1 + 0)}{2 + 1} * 10 = 6,7.
\end{aligned}$$

Cette valeur est ensuite arrondie à l'unité la plus proche et enregistrée dans la matrice de comparaison $MSA mat^{IMP, PWC}$. Dans cet exemple, la valeur retenue est donc de 7.

En conclusion, les KPI IMP 22 et PWC 2 ont des mots-clés similaires et la méthode de comparaison semi-automatique identifie alors une correspondance. À la lecture de ces 2 KPI de la littérature, il est possible de noter qu'ils ne traitent pas des mêmes notions. IMP 22 cherche à évaluer la part des gains provenant des services alors que PWC 2 s'intéresse à la numérisation des produits et des services d'une entreprise.

Les modèles IMPULS et PwC ont été comparés avec les méthodes manuelle et semi-automatique. Lors de la comparaison manuelle, les experts n'ont pas identifié de correspondance entre ces deux KPI. Il s'agit donc d'une fausse correspondance (« faux positif »). Cette observation résulte de l'analyse de la matrice $SPmat$ présentée sur la Figure 4.8 (sous-section 4.4.4) sur laquelle le couple (IMP 22 ; PWC 2) est un élément violet de la matrice (correspondance identifiée par la méthode semi-automatique, mais pas par la méthode manuelle).

ANNEXE VI

COUVERTURE DES DIMENSIONS PAR LES MODÈLES DE MATURITÉ RETENUS

L'étude des modèles de maturité dans le chapitre 1 montre que les modèles de maturité numérique retenus se concentrent chacun sur différents concepts. Un indicateur statistique, nommé couverture des dimensions par les modèles et noté $\chi_{\text{couverture}, \mathcal{D}}^{i,k}$, permet de caractériser la portée de chacun des modèles. Il indique la capacité, pour un modèle, d'évaluer chacune des sous-dimensions dans leur questionnaire. Cet indicateur doit aider les experts lors de la démarche de synthèse des KPI de la littérature.

Cette annexe présente tous les graphiques représentant la couverture des dimensions, définies par les experts, par chacun des modèles de maturité (sous-section 4.5.1). Sur chacun de ces graphiques, il est rappelé le nombre de KPI rédigés pour le modèle de maturité en question. En plus des modèles de maturité retenus, la couverture des dimensions par la liste de KPI réalisée par l'équipe allemande du projet DIMLA, notée KPI GER, est proposé.

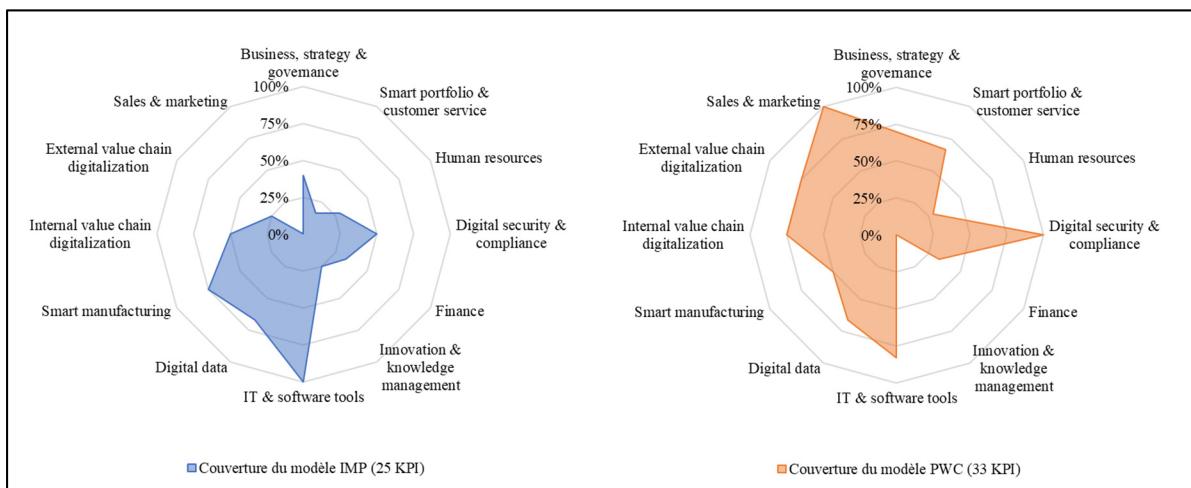


Figure-A VI-1 Couverture des modèles IMPULS et PwC selon les dimensions définies par les experts

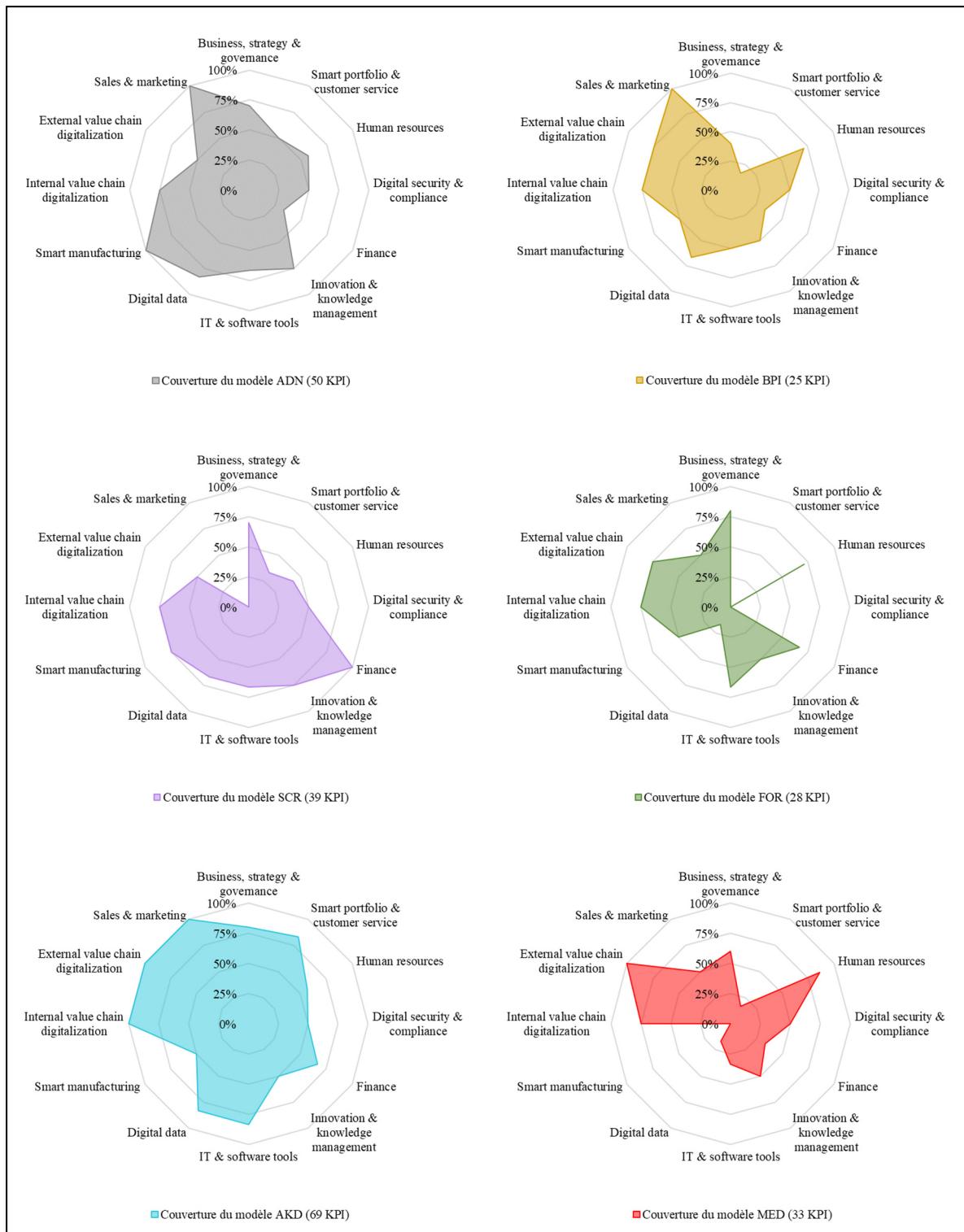


Figure-A VI-2 Couverture des modèles ADN, BPI, SCR, FOR, AKD et MED selon les dimensions définies par les experts

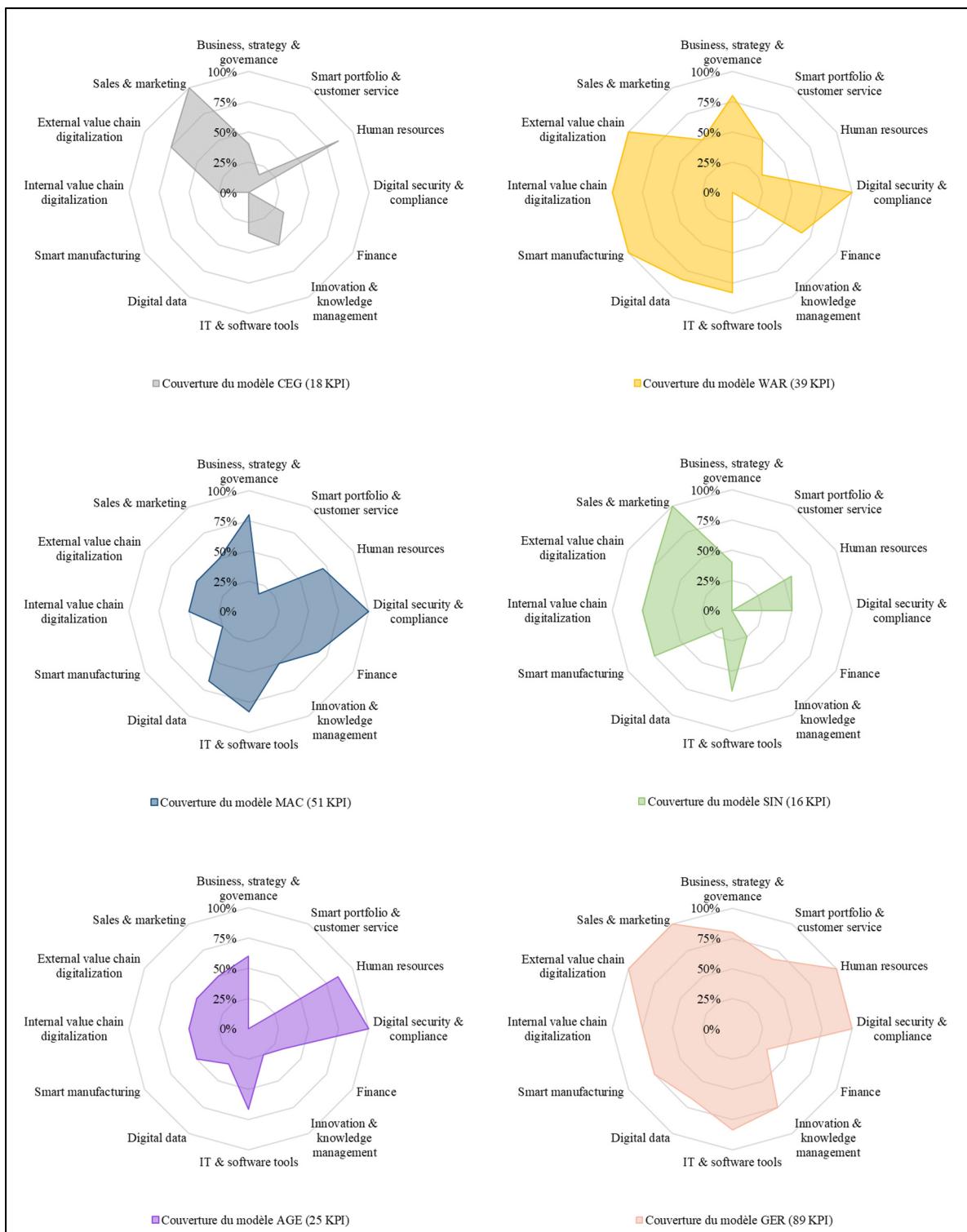


Figure-A VI-3 Couverture des modèles de CEG, WAR, MAC, SIN, AGE et de la liste de KPI GER selon les dimensions définies par les experts

ANNEXE VII

APPUI DES SOUS-DIMENSIONS SUR LES MODÈLES DE MATURITÉ NUMÉRIQUE RETENUS

Cette annexe présente le classement de chacune des sous-dimensions définies par les experts en fonction de leurs appuis sur les modèles de maturité retenus avec l'indicateur statistique $\chi_{Appui,SD}^{k,l}$ (sous-section 4.5.2). Le tableau suivant présente toutes les sous-dimensions par ordre décroissant d'appui sur les modèles de maturité retenus. L'appui d'une sous-dimension est calculé en comptant le nombre de modèles de maturité retenus possédant au moins un KPI en lien avec la sous-dimension. Ce lien est caractérisé par l'attribution d'un mot-clé de la sous-dimension sur les KPI de la littérature. La dernière colonne donne le nombre de KPI de la littérature qui possèdent au moins un mot-clé en lien avec la sous-dimension et donc la longueur de la liste de KPI que les experts devront synthétiser.

Tableau-A VII-1 Classement des sous-dimensions en fonction de leur appui sur les modèles de maturités retenus

Dimension	Sous-dimension	Appui de la sous-dimension	Nombre de KPI de la littérature
Human resources	Skills & expertise	100 %	45
IT & software tools	IT technologies	100 %	59
Business, strategy & governance	Business model & strategy	92 %	42
Business, strategy & governance	Implementation & deployment	92 %	59
IT & software tools	Software tools	92 %	63
Internal value chain digitalization	Internal activities integration	92 %	45
External value chain digitalization	External activities integration	92 %	59
Business, strategy & governance	Digital plan & roadmap	85 %	29
Human resources	Training	85 %	15
Digital security & compliance	Digital security	85 %	35
Smart manufacturing	Production digitalization	85 %	38

Dimension	Sous-dimension	Appui de la sous-dimension	Nombre de KPI de la littérature
Business, strategy & governance	Digital strategy	77 %	51
Business, strategy & governance	Digital leadership	77 %	16
IT & software tools	IT integration	77 %	22
Internal value chain digitalization	Internal collaboration	77 %	25
Business, strategy & governance	Digital awareness	69 %	22
Human resources	Hiring	69 %	20
Finance	Finance	69 %	16
IT & software tools	Infrastructure	69 %	22
Digital data	Data as an asset	69 %	58
Digital data	Data acquisition & processing	69 %	52
Digital data	Data sharing	69 %	18
Smart manufacturing	Agility	69 %	17
External value chain digitalization	Customer experience	69 %	36
External value chain digitalization	External collaboration	69 %	20
Sales & marketing	Communication & marketing	69 %	26
Business, strategy & governance	Performance management	62 %	29
Internal value chain digitalization	Development process	62 %	12
Sales & marketing	Selling & purchasing	62 %	17
Smart portfolio & customer service	Organization's portfolio	54 %	11
Finance	Investment	54 %	15
Innovation & knowledge management	Knowledge	54 %	17
Digital data	Data usage	54 %	22
Human resources	Management modes	46 %	11
Human resources	Managers involvement	46 %	7
Innovation & knowledge management	Technological watch	46 %	14
Internal value chain digitalization	Lifecycle simulation	46 %	17
External value chain digitalization	Supply chain & logistics	46 %	11

Dimension	Sous-dimension	Appui de la sous-dimension	Nombre de KPI de la littérature
Business, strategy & governance	Digital risk management	38 %	6
Smart portfolio & customer service	Smart products & services	38 %	21
Human resources	Working modes	38 %	8
Innovation & knowledge management	Innovation management	38 %	8
IT & software tools	Cloud services	38 %	8
Smart portfolio & customer service	Customization	31 %	6
Human resources	Change management	31 %	5
Digital security & compliance	Digital compliance	31 %	6
IT & software tools	Upgradability & maintenance	31 %	10
Digital data	Digital twin	31 %	4
Smart manufacturing	Autonomous workpiece	31 %	4
Smart manufacturing	Inventory	31 %	5
Smart portfolio & customer service	After-sales services	23 %	9
Innovation & knowledge management	Traceability	23 %	7
Business, strategy & governance	Societal factors	15 %	6
Business, strategy & governance	IP management	15 %	4
Smart portfolio & customer service	Dynamic pricing	15 %	2
Finance	Funding	15 %	3
Digital data	Data recovery	15 %	4
Smart portfolio & customer service	Configuration tools	8 %	1

ANNEXE VIII

LISTE DES KPI CAN OBTENUS AVEC LA SYNTHÈSE DES MODÈLES DE MATURETÉ RETENUS

La synthèse des 451 KPI, rédigés à partir des modèles de maturité retenus, a permis aux experts d'établir une liste de 74 KPI CAN pour évaluer la maturité numérique des entreprises (sous-section 5.2.1). Cette liste d'indicateurs de maturité repose sur une structure composée de 12 dimensions et de 58 sous-dimensions.

Dans la suite de cette annexe, la liste des indicateurs de maturité numérique obtenue à l'aide de la démarche de synthèse, notée KPI CAN, est présentée. Les dimensions, notées \mathcal{D}_k (avec $k \in [1..N_{\mathcal{D}}]$ et $N_{\mathcal{D}}$ le nombre de dimensions), et les sous-dimensions, notées \mathcal{SD}_l^k (avec $l \in [1..n_{\mathcal{SD}}^k]$ et $n_{\mathcal{SD}}^k$ le nombre de sous-dimensions de la dimension k), sont rappelées pour lier chacun des KPI CAN à ces dernières.

L'ordre dans lequel sont présentés les KPI CAN ne correspond pas à l'ordre de rédaction chronologique, mais à l'ordre dans lequel les experts ont jugé pertinent de classer les dimensions et les sous-dimensions. Ce classement n'a aucun impact sur le résultat.

Dans cette liste, certains KPI CAN sont colorés, car ils sont l'objet d'un résultat discuté dans le chapitre 5 de ce mémoire (sous-section 5.3.2). Ainsi, les KPI CAN en verts sont les 13 KPI CAN prioritaires qui correspondent parfaitement à des KPI GER considérés comme prioritaires. Ensuite, les 3 KPI CAN en gris correspondent à des KPI CAN qui ont un appui sur un seul des modèles de maturité retenus pour l'étude (sous-section 5.2.3).

LISTE D'INDICATEURS DE LA MATURITÉ NUMÉRIQUE

1. Business, strategy & governance

1.1. Business model & strategy

CAN 1 Ability of the organization to integrate digitalization aspects into its business model and strategy.

CAN 2 Ability of the organization's IT resources to support its business model and strategy.

CAN 3 Ability of the organization to generate revenues from data-driven services.

CAN 4 Availability of indicators to assess value creation and economic benefits related to the organization's investments in its digital transformation.

1.2. Digital awareness

CAN 5 Awareness of the strengths, weaknesses, opportunities and threats associated with digital transformation initiatives on the organization's business model.

1.3. Digital strategy

CAN 6 Availability of a documented, reviewed and communicated digital strategy integrating the organization's digital transformation objectives (and which will be divided in a roadmap and associated projects, timelines and leaders).

CAN 7 Availability and updating process of Key Performance Indicators (KPIs) to monitor the organization's progress in implementing its digital transformation.

1.4. Digital plan & roadmap

CAN 8 Availability of a documented, reviewed and communicated digital plan/roadmap to support the digital strategy.

CAN 9 Ability of the organization to integrate contributions and expertise from all sectors into the development of its digital plan/roadmap.

1.5. Digital leadership

CAN 10 Availability of skilled digital leaders to inspire and drive the digital transformation day-to-day.

1.6. Implementation & deployment

CAN 11 Availability and formalization of the processes to select, manage and track the implementation and deployment of digital projects as part of the organization's digital strategy.

CAN 12 Ability of the organization to identify and manage the obstacles to the deployment of the digital strategy.

1.7. Societal factors

CAN 13 Availability of Key Performance Indicators (KPIs) to monitor the environmental and social impacts of the organization's digital strategy.

1.8. Performance management

CAN 14 Availability and update process of Key Performance Indicators (KPIs) to monitor the organization's operational efficiency.

1.9. Digital risk management

CAN 15 Awareness of the risks and responsibilities associated to digital products/services portfolio and availability of a mitigation plan.

1.10. IP management

CAN 16 Ability of the organization to take into account the new needs of IP protection rules arising from the deployment of the organization's digital transformation (e.g. impact on contract models).

2. Smart portfolio & customer service

2.1. Organization's portfolio

CAN 17 Ability of the organization to drive the evolution of its products/services portfolio and create new business opportunities by means of digital initiatives.

2.2. Smart products & services

CAN 18 Ability of the organization to develop smart products incorporating add-on functionalities (e.g. memorization, localization, self-reporting, tracking, self-analysis) based on data acquisition and exploitation.

CAN 19 Ability of the organization to develop data-driven services that exploit data gathered during the production or usage phases.

2.3. Customization

CAN 20 Ability of the organization to enhance customer experience by means of products/services customization.

2.4. Configuration tools

CAN 21 Availability of products/services configuration tools.

2.5. Dynamic pricing

CAN 22 Ability of the organization to dynamically determine the prices of products/services using customer data analytics.

2.6. After-sales services

CAN 23 Ability of the organization to exploit the data collected during the use and after-sales phases to capitalize on knowledge, improve products/services and the organization's functioning.

CAN 24 Ability of the organization to exploit the data collected during the use and after-sales phases in order to improve customer after-sales experience and satisfaction.

3. Human resources

3.1. Management modes

CAN 25 Ability of the organization to monitor the efficiency and workload of the employees.

CAN 26 Ability of the organization to take advantage of the latest management practices across the organization to promote collaborative versus hierarchical practice.

3.2. Managers involvement

CAN 27 Availability and involvement of the managers to support the organization's digital transformation.

3.3. Hiring

CAN 28 Adequacy of the human resources hiring strategy to support the organization's digital transformation.

3.4. Working modes

CAN 29 Ability of the organization to leverage digital devices and alternative working modes to work remotely and promote mobility.

3.5. Change management

CAN 30 Ability of the organization to exploit leading-edge change management processes to support the organization's digital transformation.

3.6. Skills & expertise

CAN 31 Ability of the organization to evaluate and exploit the competencies of the employees and collaborators to meet the requirements of the organization's digital transformation.

CAN 32 Availability of the digital competencies required to carry out upcoming digital transformation projects.

CAN 33 Availability of an appropriate structuring of the digital competencies to support the organization's digital transformation.

3.7. Training

CAN 34 Adequacy of the resources for the employees to train and acquire the digital competencies required for the organization's digital transformation.

4. Digital security & compliance

4.1. Digital security

CAN 35 Ability of the organization to consider the IT security dimension as part of the organization's strategy and upcoming digital transformation projects.

CAN 36 Ability of the organization to implement IT security solutions for data integrity, confidentiality and availability throughout the organization.

4.2. Digital compliance

CAN 37 Ability of the organization to communicate and to ensure that the digital compliance policy is understood and respected by the employees.

5. Finance

5.1. Investment

CAN 38 Adequacy of financial investments to support the organization's digital strategy and the digital transformation projects.

5.2. Funding

CAN 39 Ability of the organization to understand and leverage available funding sources to support the organization's digital transformation.

5.3. Finance

CAN 40 Ability of the organization to conduct real-time profitability analysis for its financial monitoring and management.

6. Innovation & knowledge management

6.1. Innovation management

CAN 41 Ability of the organization to allocate/mobilize internal and external resources in order to promote and foster innovation (e.g. corporate culture, risk management, organization structure).

6.2. Technological watch

CAN 42 Ability of the organization to leverage the results of technological watch and benchmarking processes for decision-making.

6.3. Knowledge

CAN 43 Availability and use of knowledge management systems for knowledge capitalization throughout the organization.

6.4. Traceability

CAN 44 Availability of traceability means for real-time monitoring of the organization's internal and external processes.

7. IT & software tools

7.1. IT technologies

CAN 45 Availability of a documented, reviewed and communicated digital technology selection process.

CAN 46 Ability of the organization to integrate and use IT and digital technologies among the organization's activities to support the organization's digital transformation.

7.2. Infrastructure

CAN 47 Adequacy and upgradability of the IT architecture when compared to the digitalization requirements.

7.3. IT integration

CAN 48 Ability of the organization to integrate and upgrade communication, control and interoperability functionalities of the equipment infrastructure.

7.4. Cloud services

CAN 49 Ability of the organization to leverage cloud-based software and cloud services for data analysis and storage across the organization.

7.5. Software tools

CAN 50 Ability of the organization to connect software tools, machines and systems to ensure the availability of data for monitoring and decision-making.

CAN 51 Ability of the organization to leverage software tools and systems to foster collaboration and collective intelligence.

CAN 52 Ability of the organization to leverage software tools and systems to enhance customer relationship management and to drive the organization's commercial activity.

CAN 53 Ability of the organization to leverage software tools, machines and systems to locally or globally improve the organization's practices and processes (e.g. hiring, selling, manufacturing, inventorying processes).

7.6. Upgradability & maintenance

CAN 54 Ability of the organization to specify, plan and communicate to the stakeholders the actions, frequencies and budgets for the maintenance of digital assets.

8. Digital data

8.1. Digital twin

CAN 55 Ability of the organization to track in real-time and to simulate the production equipment to enable a virtual representation of the factory as a digital twin.

8.2. Data as an asset

CAN 56 Ability of the organization to consider data as an asset throughout the internal and external processes (e.g. production, logistics, supply chain, customers, products, services, inventory, human resources management, usage phase).

8.3. Data acquisition & processing

CAN 57 Ability of the organization to efficiently collect and process digital data (e.g. collect, aggregation, structuring, analysis, quality check).

8.4. Data usage

CAN 58 Ability of the organization to leverage digital data to support its activities (e.g. predictive maintenance, automatic production, risk management, performances analysis, production campaign adaptation, services, decision-making, product development and improvement, changes, services creation, dashboard creation, self-diagnosing, self-scheduling).

8.5. Data sharing

CAN 59 Ability of the organization to share digital data throughout the internal and external processes.

8.6. Data recovery

CAN 60 Availability of digital data recovery and backup test processes.

9. Smart manufacturing

9.1. Autonomous workpiece

CAN 61 Ability of the organization to implement workpiece's autonomous and self-guiding capacities through production.

9.2. Production digitalization

CAN 62 Ability of the organization to digitalize equipment and processes in order to monitor, control, optimize and automate production (e.g. loading/unloading, operation, transportation, quality checks).

9.3. Agility

CAN 63 Ability of the organization to efficiently manage small batch sizes and dynamically adapt the production to varying requests and manufacturing conditions.

9.4. Inventory

CAN 64 Ability of the organization to leverage digital technologies and software tools for inventory management.

10. Internal value chain digitalization

10.1. Internal activities integration

CAN 65 Ability of the organization to digitalize processes and integrate systems across the internal activities.

10.2. Internal collaboration

CAN 66 Ability of the organization to foster and leverage cross-functional collaboration among the organization's sectors using appropriate working environments and software tools.

10.3. Lifecycle simulation

CAN 67 Ability of the organization to model and simulate the entire product lifecycle from early design to recycling.

10.4. Development process

CAN 68 Ability of the organization to share digital data and to collaborate with external partners and customers to support product/service development processes.

11. External value chain digitalization

11.1. External activities integration

CAN 69 Ability of the organization to digitalize processes and integrate systems across the external activities.

11.2. Customer experience

CAN 70 Ability of the organization to leverage the customer experience as part of product and service improvement processes.

11.3. External collaboration

CAN 71 Ability of the organization to collaborate with academics, suppliers and customers in order to support the implementation and deployment of its digital transformation projects.

11.4. Supply chain & logistics

CAN 72 Ability of the organization to collaborate with suppliers and integrate the supply chain in order to reduce lead times and improve agility.

12. Sales & marketing

12.1. Selling & purchasing

CAN 73 Ability of the organization to integrate and leverage software tools and IT technologies within the selling/purchasing processes (ordering, quoting, shipping/receiving and billing/paying).

12.2. Communication & marketing

CAN 74 Ability of the organization to leverage multiple communication/marketing channels (e.g. website, social media) and software tools to interact and engage with customers, while monitoring and controlling its digital footprint.

ANNEXE IX

APPUI DES KPI CAN SUR LES MODÈLES DE MATURITÉ NUMÉRIQUE RETENUS

Après avoir établi la liste de KPI CAN, il est possible de connaître l'appui de chaque KPI CAN sur les modèles de maturité retenus avec l'indicateur statistique $\chi_{Appui, KPI CAN}^{k,l}$ (sous-section 5.2.3). Le tableau ci-dessous montre tous les KPI CAN par ordre décroissant d'appui sur les modèles de maturité retenus. L'appui d'un KPI CAN est calculé en comptant le nombre de modèles de maturité retenus contribuant à la rédaction d'un KPI CAN. Un modèle de maturité contribue à la rédaction d'un KPI CAN dès que les experts ont utilisé un des KPI du modèle, partiellement ou totalement. La dernière colonne affiche le nombre de KPI ayant permis la rédaction du KPI CAN, quel que soit le modèle d'origine.

Tableau-A IX-1 Classement des KPI CAN
en fonction de leur appui sur les modèles de maturités retenus

KPI CAN	Appui du KPI CAN	Sous-dimension	Appui de la sous-dimension	Nombre de KPI de la littérature utilisés
CAN 31	77 %	Skills & expertise	100 %	11
CAN 34	77 %	Training	85 %	13
CAN 36	77 %	Digital security	85 %	30
CAN 33	69 %	Skills & expertise	100 %	11
CAN 46	69 %	IT technologies	100 %	14
CAN 56	69 %	Data as an asset	69 %	35
CAN 58	69 %	Data usage	54 %	28
CAN 1	62 %	Business model & strategy	92 %	16
CAN 57	62 %	Data acquisition & processing	69 %	27
CAN 8	54 %	Digital plan & roadmap	85 %	7
CAN 48	54 %	IT integration	77 %	10
CAN 63	54 %	Agility	69 %	7

KPI CAN	Appui du KPI CAN	Sous-dimension	Appui de la sous-dimension	Nombre de KPI de la littérature utilisés
CAN 70	54 %	Customer experience	69 %	10
CAN 74	54 %	Communication & marketing	69 %	18
CAN 38	54 %	Investment	54 %	11
CAN 32	46 %	Skills & expertise	100 %	10
CAN 53	46 %	Software tools	92 %	24
CAN 69	46 %	External activities integration	92 %	9
CAN 62	46 %	Production digitalization	85 %	12
CAN 10	46 %	Digital leadership	77 %	10
CAN 71	46 %	External collaboration	69 %	9
CAN 5	46 %	Digital awareness	69 %	7
CAN 68	46 %	Development process	62 %	7
CAN 27	46 %	Managers involvement	46 %	7
CAN 51	38 %	Software tools	92 %	7
CAN 52	38 %	Software tools	92 %	8
CAN 66	38 %	Internal collaboration	77 %	6
CAN 47	38 %	Infrastructure	69 %	7
CAN 73	38 %	Selling & purchasing	62 %	11
CAN 17	38 %	Organization's portfolio	54 %	6
CAN 42	38 %	Technological watch	46 %	12
CAN 18	38 %	Smart products & services	38 %	8
CAN 2	31 %	Business model & strategy	92 %	6
CAN 11	31 %	Implementation & deployment	92 %	11
CAN 50	31 %	Software tools	92 %	10
CAN 65	31 %	Internal activities integration	92 %	5
CAN 7	31 %	Digital strategy	77 %	6
CAN 28	31 %	Hiring	69 %	7
CAN 40	31 %	Finance	69 %	9
CAN 59	31 %	Data sharing	69 %	8

KPI CAN	Appui du KPI CAN	Sous-dimension	Appui de la sous-dimension	Nombre de KPI de la littérature utilisés
CAN 14	31 %	Performance management	62 %	9
CAN 41	31 %	Innovation management	38 %	5
CAN 20	31 %	Customization	31 %	4
CAN 37	31 %	Digital compliance	31 %	6
CAN 55	31 %	Digital twin	31 %	4
CAN 3	23 %	Business model & strategy	92 %	3
CAN 4	23 %	Business model & strategy	92 %	3
CAN 35	23 %	Digital security	85 %	5
CAN 6	23 %	Digital strategy	77 %	5
CAN 67	23 %	Lifecycle simulation	46 %	3
CAN 72	23 %	Supply chain & logistics	46 %	6
CAN 15	23 %	Digital risk management	38 %	4
CAN 19	23 %	Smart products & services	38 %	4
CAN 29	23 %	Working modes	38 %	3
CAN 49	23 %	Cloud services	38 %	3
CAN 61	23 %	Autonomous workpiece	31 %	3
CAN 24	23 %	After-sales services	23 %	3
CAN 45	15 %	IT technologies	100 %	8
CAN 9	15 %	Digital plan & roadmap	85 %	2
CAN 43	15 %	Knowledge	54 %	2
CAN 25	15 %	Management modes	46 %	2
CAN 26	15 %	Management modes	46 %	5
CAN 30	15 %	Change management	31 %	2
CAN 64	15 %	Inventory	31 %	2
CAN 23	15 %	After-sales services	23 %	2
CAN 44	15 %	Traceability	23 %	5
CAN 13	15 %	Societal factors	15 %	3
CAN 16	15 %	IP management	15 %	3

KPI CAN	Appui du KPI CAN	Sous-dimension	Appui de la sous-dimension	Nombre de KPI de la littérature utilisés
CAN 22	15 %	Dynamic pricing	15 %	2
CAN 39	15 %	Funding	15 %	2
CAN 60	15 %	Data recovery	15 %	4
CAN 12	8 %	Implementation & deployment	92 %	1
CAN 54	8 %	Upgradability & maintenance	31 %	4
CAN 21	8 %	Configuration tools	8 %	1

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Aéro Montréal. (2011). Initiative MACH. Repéré le à <https://www.aeromontreal.ca/mach-initiative.html>
- Agca, O., Gisbson, J., Godsell, J., Ignatius, J., & Wyn Davies, C. (2017). *Industry 4 readiness assessment tool and survey*. Coventry, England : International Institute for Product and Service Innovation, University of Warwick.
- AGEFOS PME. (2018). SMART DIAG' - Diagnostic numérique. Repéré à <https://www.agefos-smartdiag.com/>
- Akdil, K. Y., Ustundag, A., & Cevikcan, E. (2017). Maturity and Readiness Model for Industry 4.0 Strategy. Dans A. Ustundag & E. Cevikcan (Éd.), *Industry 4.0: Managing The Digital Transformation* (pp. 61-94). Cham : Springer International Publishing. doi : 10.1007/978-3-319-57870-5_4
- Beaudoin, J., Lefebvre, G., Normand, M., Gouri, V., Skerlj, A., Pellerin, R., ... Danjou, C. (2016). *Prendre part à la révolution manufacturière? Du rattrapage technologique à l'Industrie 4.0 chez les PME*. Québec : Centre francophone d'informatisation des organisations (CEFARIO).
- Becker, J., Knackstedt, R., & Pöppelbuß, J. (2009). Developing Maturity Models for IT Management. *Business & Information Systems Engineering*, 1(3), 213-222. doi : 10.1007/s12599-009-0044-5
- Bédard-Maltais, P.-O. (2017). *Industrie 4.0 : la nouvelle révolution industrielle - Les fabricants canadiens sont-ils prêts ?*. Banque de développement du Canada.
- Bidot-Mayer, T. (2016). Tour d'horizon des politiques d'« Industrie du futur ». *Annales des Mines - Realites industrielles*, Novembre 2016(4), 47-50.
- Bloomberg, J. (2018). Digitization, Digitalization, And Digital Transformation: Confuse Them At Your Peril. *Forbes*. Repéré à <https://www.forbes.com/sites/jasonbloomberg/2018/04/29/digitization-digitalization-and-digital-transformation-confuse-them-at-your-peril/>

Bpi France. (2018). Evaluatez votre maturité digitale avec le « Digitalomètre » ! | Bpifrance servir l'avenir. Repéré à <https://www.bpifrance.fr/A-la-une/Dossiers/Bpifrance-accompagne-la-transformation-digitale-des-entreprises/Evaluez-votre-maturite-digitale-avec-le-Digitalometre-!-39136>

Cegos. (2017). Transformation digitale : vos équipes sont-elles dans la course ? Repéré à <https://www.cegos.fr/actualites/news/transformation-digitale-vos-equipes-sont-elles-dans-la-course>

Cognet, B., Pernot, J.-P., Rivest, L., Danjou, C., Wuest, T., Kärkkäinen, H., & Lafleur, M. (2019). Towards a Novel Comparison Framework of Digital Maturity Assessment Models. Dans C. Fortin, L. Rivest, A. Bernard, & A. Bouras (Éd.), *Product Lifecycle Management in the Digital Twin Era* (pp. 58-71). Cham, Switzerland : Springer International Publishing. doi : 10.1007/978-3-030-42250-9_6

Danjou, C., Rivest, L., & Pellerin, R. (2017). *Industrie 4.0 : des pistes pour aborder l'ère du numérique et de la connectivité*. Québec : Centre francophone d'informatisation des organisations (CEFARIO).

De Carolis, A., Macchi, M., Negri, E., & Terzi, S. (2018). *Guiding manufacturing companies towards digitalization a methodology for supporting manufacturing companies in defining their digitalization roadmap*. Communication présentée au 2017 International Conference on Engineering, Technology and Innovation: Engineering, Technology and Innovation Management Beyond 2020: New Challenges, New Approaches, ICE/ITMC, Funchal, Portugal (pp. 487-495). doi : 10.1109/ICE.2017.8279925

De Carolis, A., Macchi, M., Negri, E., & Terzi, S. (2017). A Maturity Model for Assessing the Digital Readiness of Manufacturing Companies. Dans H. Lödding, R. Riedel, K.-D. Thoben, G. von Cieminski, & D. Kiritsis (Éd.), *Advances in Production Management Systems. The Path to Intelligent, Collaborative and Sustainable Manufacturing* (pp. 13-20). Cham, Switzerland : Springer International Publishing. doi : 10.1007/978-3-319-66923-6_2

Felch, V., Asdecker, B., & Sucky, E. (2019). Maturity Models in the Age of Industry 4.0 – Do the Available Models Correspond to the Needs of Business Practice? (pp. 5165-5174). Communication présentée au 52nd Hawaii International Conference on System Sciences. doi : 10.24251/HICSS.2019.620

Geissbauer, R., Vedso, J., & Schrauf, S. (2016). *Industry 4.0: Building the digital enterprise - Engineering and Construction Key Findings*. Munich, Germany : PricewaterhouseCoopers (PwC).

- Gill, M., & VanBoskirk, S. (2016). *The Digital Maturity Model 4.0*. Cambridge, USA : Forrester.
- Gouvernement du Canada. (2009a). Plan stratégique [5 fiches]. Dans *TERMIUM Plus®*. Repéré à https://www.btb.termiumplus.gc.ca/tpv2alpha/alpha-fra.html?lang=fra&i=1&srchtxt=plan+strat%C3%A9gique&index=alt&codom2nd_wwe=1#resultrecs
- Gouvernement du Canada. (2009b). Stratégie numérique [1 fiche]. Dans *TERMIUM Plus®*. Repéré à https://www.btb.termiumplus.gc.ca/tpv2alpha/alpha-fra.html?lang=fra&i=1&srchtxt=STRATEGIE+NUMERIQUE&index=alt&codom2nd_wet=1#resultrecs
- Gouvernement du Québec. (s.d.). Fiche du terme : Plan numérique. Dans *Thésaurus de l'activité gouvernementale*. Repéré à <http://www.thesaurus.gouv.qc.ca/tag/terme.do?id=15579>
- Hankel, M., & Rexroth, B. (2015). *Industrie 4.0: The Reference Architectural Model Industrie 4.0 (RAMI 4.0)*. Frankfurt am Main, Germany : ZVEI, Die Elektroindustrie.
- Hermann, M., Pentek, T., & Otto, B. (2015). *Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios: A Literature Review*. Dortmund, Germany : Technische Universität Dortmund. doi : 10.13140/RG.2.2.29269.22248
- Hermann, M., Pentek, T., & Otto, B. (2016). Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios. *2016 49th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS)*, 3928-3937. doi : 10.1109/HICSS.2016.488
- i-SCOOP. (s.d.). Digitization, digitalization and digital transformation: the differences. Repéré à <https://www.i-scoop.eu/digital-transformation/digitization-digitalization-digital-transformation-disruption/>
- IMPULS. (2015). Industry 4.0 Readiness Online Self-Check for Businesses. Repéré à <https://www.industrie40-readiness.de/?lang=en>
- Kagermann, H., Wahlster, W., & Helbig, J. (2013). *Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0*. Berlin, Germany : acatech - National Academy of Science and Engineering.
- Kohler, D., & Weisz, J.-D. (2013). Industrie 4.0, ou l'avenir de l'industrie en Allemagne : vision, enjeux, méthode. KOHLER CONSULTING & COACHING.

Kohler, D., & Weisz, J.-D. (2016). Industrie 4.0 : comment caractériser cette quatrième révolution industrielle et ses enjeux ?, *Annales des Mines - Réalités industrielles*, Novembre 2016(4), 51-56.

Lichtblau, K., Stich, V., Bertenrath, R., Blum, M., Bleider, M., Millack, A., ... Schröter, M. (2015). *IMPULS - Industrie 4.0 readiness*. Aachen-Köln, Germany : Impuls-Stiftung des VDMA.

MEDEF France. (2016). Évaluez la maturité numérique de votre entreprise !. Repéré à <http://www.diag-numerique.fr/quiz>

Ministère de l'Économie et de l'Innovation Québec. (2017). ADN 4.0 – Autodiagnostic. Repéré à <https://sondage.economie.gouv.qc.ca/index.php/159143?lang=fr>

Ministère de l'Économie et de l'Innovation Québec. (2018). Guides et outils / Industrie 4.0 : les défis de la quatrième révolution industrielle - MEI. Repéré à <https://www.economie.gouv.qc.ca/bibliotheques/outils/gestion-dune-entreprise/industrie-40/industrie-40-les-defis-de-la-quatrieme-revolution-industrielle/>

Ministère de l'Économie et de l'Innovation Québec. (2019). S'améliorer / Industrie 4.0 - MEI. Repéré à https://www.economie.gouv.qc.ca/objectifs/ameliorer/industrie-40/page/guides-et-outils-22006/?no_cache=1&tx_igaffichagepages_pi1%5Bmode%5D=single&tx_igaffichagepages_pi1%5BbackPid%5D=22951&tx_igaffichagepages_pi1%5BcurrentCat%5D=&cHash=66ebbc44180e216f168497b638469871

Mittal, S., Khan, M. A., Romero, D., & Wuest, T. (2018b). A critical review of smart manufacturing & Industry 4.0 maturity models: Implications for small and medium-sized enterprises (SMEs). *Journal of Manufacturing Systems*, 49, 194-214. doi : 10.1016/j.jmsy.2018.10.005

Mittal, S., Romero, D., & Wuest, T. (2018a). Towards a Smart Manufacturing Maturity Model for SMEs (SM3E). Dans I. Moon, G. M. Lee, J. Park, D. Kirlitsis, & G. von Cieminski (Éd.), *Advances in Production Management Systems. Smart Manufacturing for Industry 4.0* (pp. 155-163). Cham, Switzerland : Springer International Publishing. doi : 10.1007/978-3-319-99707-0_20

Moeuf, A. (2018). Identification des risques, opportunités et facteurs critiques de succès de l'industrie 4.0 pour la performance industrielle des PME. (Thèse de doctorat, Université Paris-Saclay, Saint-Aubin, France). Repéré à : <https://www.theses.fr/2018SACL025>

Nilsson, N. J. (2009). *The Quest for Artificial Intelligence: A History of Ideas and Achievements*. [Version Cambridge University Press]. doi : 10.1017/CBO9780511819346

Office québécois de la langue française. (2006). Définition : intégration verticale. Dans *Grand Dictionnaire Terminologique*. Repéré à http://gdt.oqlf.gouv.qc.ca/ficheOqlf.aspx?Id_Fiche=505806

Office québécois de la langue française. (2008). Définition : plan stratégique. Dans *Grand Dictionnaire Terminologique*. Repéré à http://www.granddictionnaire.com/ficheOqlf.aspx?Id_Fiche=8403171

Office québécois de la langue française. (2016). Définition : modèle d'entreprise. Dans *Grand Dictionnaire Terminologique*. Repéré à http://www.granddictionnaire.com/ficheOqlf.aspx?Id_Fiche=8370875

Office québécois de la langue française. (2018a). Définition : feuille de route. Dans *Grand Dictionnaire Terminologique*. Repéré à http://www.granddictionnaire.com/ficheOqlf.aspx?Id_Fiche=8366051

Office québécois de la langue française. (2018b). Industrie 4.0. Dans *Grand Dictionnaire Terminologique*. Repéré à http://www.granddictionnaire.com/ficheOqlf.aspx?Id_Fiche=26545033

Oztemel, E., & Gursev, S. (2020). Literature review of Industry 4.0 and related technologies. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 31(1), 127-182. doi : 10.1007/s10845-018-1433-8

PricewaterhouseCoopers. (2015). Industry 4.0 - Self Assessment. Repéré à <https://i40-self-assessment.pwc.de/i40/landing/>

PricewaterhouseCoopers. (2016). L'Industrie 4.0 : l'occasion de briller pour le secteur manufacturier canadien. Repéré à <https://www.pwc.com/ca/fr/industries/industry-4-0.html>

PricewaterhouseCoopers. (2019). Digital - Reimagining what's possible, with an unwavering commitment to getting it right. Repéré à <https://www.strategyand.pwc.com/gx/en/digital.html>

Révolution industrielle (s.d.). Dans *Encyclopédie Larousse en ligne*. Repéré à https://www.larousse.fr/encyclopedie/divers/révolution_industrielle/61047

Rossi, M., & Terzi, S. (2016). CLIMB Model: Toward a Maturity Assessment Model for Product Development. Dans A. Bouras, B. Eynard, S. Foufou, & K.-D. Thoben (Éd.), *Product Lifecycle Management in the Era of Internet of Things* (pp. 103-111). Cham, Switzerland : Springer International Publishing. doi : 10.1007/978-3-319-33111-9_10

Rossmann, A. (2018). Digital Maturity: Conceptualization and Measurement Model (p. 9). Communication présentée à *2018 39th International Conference on Information Systems*, San Francisco, USA.

Rüßmann, M., Lorenz, M., Gerbert, P., Waldner, M., Justus, J., Engel, P., & Harnisch, M. (2015). *Industry 4.0: The Future of Productivity and Growth in Manufacturing* (Rapport n°4). The Boston Consulting Group (BCG).

Salkin, C., Oner, M., Ustundag, A., & Cevikcan, E. (2018). A Conceptual Framework for Industry 4.0. Dans A. Ustundag & E. Cevikcan (Éd.), *Industry 4.0: Managing The Digital Transformation* (pp. 3-23). Cham, Switzerland : Springer International Publishing. doi : 10.1007/978-3-319-57870-5_1

Samaranayake, P., Ramanathan, K., & Laosirihongthong, T. (2017). Implementing industry 4.0 — A technological readiness perspective. Dans *2017 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)* (pp. 529-533). doi : 10.1109/IEEM.2017.8289947

Sassanelli, C., Rossi, M., & Terzi, S. (2019). Evaluating the Smart Readiness and Maturity of Manufacturing Companies Along the Product Development Process. Dans C. Fortin, L. Rivest, A. Bernard, & A. Bouras (Éd.), *Product Lifecycle Management in the Digital Twin Era* (pp. 72-81). Cham, Switzerland : Springer International Publishing. doi : 10.1007/978-3-030-42250-9_7

Schaeffer, E. (2017). *Industry X.0: Realizing Digital Value in Industrial Sectors*. [Version Kogan Page]. Repéré à <https://library.books24x7.com/toc.aspx?bookid=128172>

Schumacher, A., Erol, S., & Sihn, W. (2016). A Maturity Model for Assessing Industry 4.0 Readiness and Maturity of Manufacturing Enterprises. *Procedia CIRP*, 52, 161-166. doi : 10.1016/j.procir.2016.07.040

Schwab, K. (2016). *The Fourth Industrial Revolution*. World Economic Forum.

- Schwer, K., Hitz, C., Wyss, R., Wirz, D., & Minonne, C. (2018). Digital maturity variables and their impact on the enterprise architecture layers. *Problems & Perspectives in Management*, 16(4), 141-154. doi : 10.21256/zhaw-3303
- Scremin, L., Armellini, F., Brun, A., Solar-Pelletier, L., & Beaudry, C. (2018). Towards a Framework for Assessing the Maturity of Manufacturing Companies in Industry 4.0 Adoption. Dans R. Brunet-Thornton & F. Martinez (Éd.), *Analyzing the Impacts of Industry 4.0 in Modern Business Environments* (pp. 224-254). IGI-Global.
- Simpson, J. A., & Weiner, E. S. C. (1989). *The Oxford English dictionary*. (Vol. 17). Oxford England : Clarendon Press.
- Singapore Economic Development Board. (2017). *The Singapore Smart Industry Readiness Index*. Singapore, Republic of Singapore : Singapore Economic Development Board.
- Taisch, M., Arena, D. N., Gorobtcova, P., Kiritsis, D., Luglietti, R., May, G., Morin, T. R., & Wuest, T. (2018). *The 2018 World Manufacturing Forum Report, «Recommendations for the Future of Manufacturing»*. Cernobbio, Italy : World Manufacturing Foundation.
- The Open Group. (2018a). Architecture Deliverables. Dans *TOGAF® Standard, Version 9.2*. Repéré à https://pubs.opengroup.org/architecture/togaf92-doc/arch/chap32.html#tag_32_02_07
- The Open Group. (2018b). Phase A: Architecture Vision. Dans *TOGAF® Standard, Version 9.2*. Repéré à https://pubs.opengroup.org/architecture/togaf92-doc/arch/chap06.html#tag_06_03_04
- University of Warwick. (2017). Industry 4 self-assessment tool. Repéré à https://warwickwmg.eu.qualtrics.com/jfe/form/SV_7O3ovIWITCu90uF.
- Walia, J. S., Hämmäinen, H., Kilkki, K., & Yrjölä, S. (2019). 5G network slicing strategies for a smart factory. *Computers in Industry*, 111, 108-120. doi : 10.1016/j.compind.2019.07.006
- Wendler, R. (2012). The maturity of maturity model research: A systematic mapping study. *Information and Software Technology*, 54(12), 1317-1339. doi : 10.1016/j.infsof.2012.07.007

Westerman, G., Bonnet, D., & McAfee, A. (2014). *Leading Digital -Turning technology into business transformation*. Boston, USA : Harvard Business Publishing.

