

**UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES**

**INTEROPÉRABILITÉ DES SYSTÈMES DU MANUFACTURIER  
INTELLIGENT À L'ÈRE DE L'INDUSTRIE 4.0 DANS LE CONTEXTE DES  
PME MANUFACTURIÈRES**

**MÉMOIRE PRÉSENTÉ  
COMME EXIGENCE PARTIELLE DE LA  
MAÎTRISE EN INGÉNIERIE, CONCENTRATION GÉNIE INDUSTRIEL**

**PAR  
JONATHAN SIMARD**

**NOVEMBRE 2025**

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire, de cette thèse ou de cet essai a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire, de sa thèse ou de son essai.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire, cette thèse ou cet essai. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire, de cette thèse et de son essai requiert son autorisation.

**UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES**

**MAÎTRISE EN INGÉNIERIE, CONCENTRATION GÉNIE INDUSTRIEL  
(M.SC.A.)**

**Direction de recherche :**

---

Sébastien Gamache Université du Québec à Trois-Rivières	directeur de recherche
--	------------------------

---

Marc-André Gaudreau Université du Québec à Trois-Rivières	codirecteur de recherche
--	--------------------------

**Jury d'évaluation**

---

Sébastien Gamache Université du Québec à Trois-Rivières	Directeur de recherche
--	------------------------

---

Ambre Dupuis Université du Québec à Trois-Rivières	Membre du jury interne
---	------------------------

---

Christophe Danjou École Polytechnique de Montréal	Membre du jury externe
--	------------------------

## REMERCIEMENTS

Je souhaite d'abord sincèrement remercier Sébastien Gamache, mon directeur de maîtrise. D'abord pour ton implication et ta rigueur, qui m'ont permis d'acquérir de solides compétences de chercheur. J'ai acquis avec ton aide une rigueur qui a permis non seulement de faire de moi un bon chercheur, mais aussi d'enrichir la personne que je suis devenu aujourd'hui. Ensuite, pour nos nombreuses conversations et débats, qui ont enrichi la démarche en raffinant ma capacité à remettre en question et à voir le monde d'une façon plus lucide. Mais surtout pour avoir vu mon potentiel à un moment où je n'aurais pas pu le voir moi-même. D'avoir eu confiance au chercheur en devenir que j'étais et dont je suis fier aujourd'hui.

Un grand merci à Marc-André Gaudreau, mon codirecteur de maîtrise. Tu as aussi pris le pari de faire confiance au potentiel chercheur que Sébastien t'a présenté. Tout au long de ma démarche, ton expérience et ton humanité ont été une main rassurante sur mon épaule. Tu as enrichi ma démarche en faisant de moi non seulement un chercheur, mais aussi un auteur. J'ai grandi avec toi, non seulement en tant que chercheur, mais aussi en tant qu'être humain. Il y en a qui font de la recherche. Il y en a qui deviennent chercheurs. Avec ta contribution, j'ai appris à vivre ma recherche.

Je me permets un petit mot pour Jean-Sébastien Dessureault, qui m'a donné l'occasion de choisir la pilule rouge de la recherche. Je suis maintenant au Pays des Merveilles, descendu avec le lapin blanc au fond du gouffre.

J'aimerais remercier de tout mon cœur mes collègues, amis et amies qui m'ont accompagné, inspiré, supporté, encouragé. De parcourir ce long chemin avec vous a été un bonheur partagé que j'espère faire durer au-delà de la fin de cette démarche. Merci de m'avoir aidé à grandir.

À Justin, Filip, Émile et Alexis,

Le seul véritable accomplissement est de tendre à devenir un peu plus soi-même.

## RÉSUMÉ

Le contexte d'affaires a poussé les PME manufacturières à être de plus en plus compétitives pour assurer leur place dans leur marché. La technologie s'avère un moyen reconnu pour renforcer la compétitivité. La prolifération des systèmes d'information s'est faite rapidement, sans vision quant à l'architecture logicielle et l'interopérabilité des systèmes, de sorte que les PME manufacturières sont prises avec des architectures logicielles incohérentes, qui ne répondent pas adéquatement à leurs besoins. Au point où cela amène des pertes de temps, des erreurs, des augmentations des coûts et de la perte de performance.

La littérature permet d'obtenir une vue d'ensemble de l'interopérabilité des systèmes, en incluant les différents concepts associés à l'interopérabilité ainsi que les outils, tels que les architectures de référence, les modèles d'interopérabilité et les standards applicables. L'élément central de la revue est le standard ISA- 95, car il propose un modèle de données uniformisé et une architecture logicielle. La proposition d'ISA- 95 est présentée comme une solution d'interconnectivité pouvant permettre d'atteindre un haut niveau d'interopérabilité. Cependant, le modèle de données et l'architecture logicielle proposés par ISA- 95 ne semblent pas mis en œuvre chez les PME manufacturières. Il s'impose donc de se demander est-ce que la solution proposée par le standard ISA- 95 est exploitable dans le contexte des PME manufacturières? Pour la présente recherche, cela mène à 4 sous-questions : i) est-ce que la solution proposée par ISA- 95 ou ses dérivés a été validée par la littérature dans un contexte de PME? ii) Existe-t-il des solutions alternatives à ISA- 95 dans la littérature? iii) Est-ce que les alternatives proposées ont été évaluées par la littérature en contexte de PME? iv) Est-ce qu'il serait d'intérêt pour la PME manufacturière de mettre en œuvre la proposition d'ISA- 95?

Une étude bibliométrique permet de répondre aux trois premières questions en validant l'hypothèse qu'il y a peu ou pas de recherche sur la mise en place du standard ISA- 95 ou de ses alternatives chez les PME manufacturières.

Afin de répondre à la 4<sup>e</sup> sous-question, dans le cadre des activités du Centre National Intégré du Manufacturier Intelligent (CNIMI), une entreprise avec une situation apparentée à la problématique a accepté de participer à une démarche de recherche-intervention. L'objectif de cette recherche-intervention est d'observer l'intérêt pour l'implémentation de la proposition du standard ISA-95. L'entreprise a été accompagnée dans la sélection d'un intergiciel. À travers l'accompagnement, la mise en œuvre de la proposition d'ISA-95 a été proposée. Si l'entreprise a d'abord démontré de l'intérêt, la démarche de sélection d'un outil d'interconnectivité a amené une baisse d'intérêt pour le modèle de données du standard ISA-95, puisque les outils offerts sur le marché couvrent les besoins de la PME manufacturière. De plus, l'entreprise a souhaité être accompagnée dans le déploiement de la solution et a accordé de l'importance à la relation d'affaires avec le fournisseur de services. Ces constats apparaissent cohérents avec les modèles d'interopérabilité comme celui de l'EIF, qui mettent de l'avant les aspects d'affaires et juridiques de l'interopérabilité, en plus des aspects techniques et fonctionnels, alors que la proposition d'ISA-95 ne s'intéresse qu'à l'aspect technique de l'interopérabilité.

Le constat général qui émane de cette recherche-intervention est que l'implémentation du modèle de données d'ISA-95 ne semble pas présenter d'avantages notables dans le contexte de la PME manufacturière. Les outils présentement offerts par l'industrie apparaissent comme adaptés à la PME manufacturière et comblent les besoins techniques d'interconnectivité sans la nécessité d'un modèle standard de données tel qu'offert par ISA-95. Cela amène même à se demander s'il est toujours d'intérêt d'avoir des standards qui définissent des modèles communs de données pour l'interconnectivité. Par ailleurs, il est constaté que la proposition d'architecture logicielle présentée par ISA-95 apparaît comme reconnue et déjà implantée dans les outils sur le marché.

## TABLE DES MATIERES

CHAPITRE 1 - INTRODUCTION.....	1
1.1. - Contexte de la PME manufacturière .....	2
1.2. - Problématique .....	3
CHAPITRE 2 - REVUE EXPLORATOIRE ET OBJECTIFS DE RECHERCHE.....	5
2.1. - Revue exploratoire et cadre conceptuel .....	5
2.1.1. - Petites et moyennes entreprises (PME) manufacturières .....	7
2.1.2. - Industrie 4.0.....	7
2.1.3. - Architecture .....	8
2.1.4. - Interconnectivité, interopérabilité et intégration de systèmes .....	9
2.1.5. - Modèle d'interopérabilité .....	9
2.1.6. - Architectures de références .....	10
2.1.7. - ISA-88 .....	14
2.1.8. - ISA- 95 .....	15
2.1.9. - Business to Manufacturing Markup Language (B2MML).....	17
2.1.10. - Synthèse de la revue exploratoire.....	18
2.2. - Questions, hypothèses et objectifs .....	19
2.2.1. - Questions et hypothèses .....	19
2.2.2. - Objectifs de recherche .....	21
CHAPITRE 3 - MÉTHODOLOGIE.....	22
3.1. - Méthodologie de l'étude bibliométrique.....	22
3.1.1. - Étape 1 : Recherche d'ISA- 95 et ses dérivés.....	23
3.1.2. - Étape 2 : Recherche de PME parmi la littérature sur ISA- 95.....	24
3.1.3. - Étape 3 : Analyse bibliométrique de co-occurrence des mots-clés dans la littérature sur ISA- 95 .....	25
3.1.4. - Étape 4 : Recherche des alternatives avec les mots-clés identifiés .....	26
3.1.5. - Étape 5 : Recherche de PME parmi la littérature sur les alternatives à ISA- 95 .....	26
3.1.6. - Étape 6 : Filtrage des résultats.....	26
3.2. - Méthodologie de l'étude de cas .....	27

3.2.1. - Recherche-intervention.....	27
3.2.2. - Contexte d'accompagnement .....	28
3.2.3. - Présentation du cas d'accompagnement.....	28
3.2.4. - Considérations éthiques.....	29
3.2.5. - Problématique du cas d'accompagnement .....	29
3.2.6. - Collecte de données.....	30
CHAPITRE 4 - ÉTUDE BIBLIOMÉTRIQUE.....	33
4.1. - Résultats de la revue de littérature .....	33
4.1.1. - Étape 1 : Recherche d'ISA- 95 et ses dérivés.....	33
4.1.2. - Étape 2 Recherche de PME parmi la littérature sur ISA- 95.....	34
4.1.3. - Étape 3 Analyse bibliométrique de co-occurrence dans la littérature sur ISA- 95.....	36
4.1.4. - Étape 4 Recherche des alternatives avec les mots-clés identifiés .....	40
4.1.5. - Étape 5 Recherche de PME parmi la littérature sur les alternatives à ISA- 95 .....	41
4.1.6. - Étape 6 Filtrage des résultats.....	42
4.2. - Analyse des résultats et constats .....	43
4.3. - Conclusion de la revue de littérature.....	47
CHAPITRE 5 - ÉTUDE DE CAS.....	49
5.1. - Résultats.....	49
5.1.1. - Cartographie des systèmes .....	49
5.1.2. - Définition des besoins et des exigences de l'entreprise .....	62
5.1.3. - Veille technologique.....	65
5.1.4. - Présentation des fournisseurs .....	68
5.1.5. - Action de l'entreprise .....	71
5.2. - Analyse des résultats.....	72
5.2.1. - Correspondance du cas avec la problématique.....	72
5.2.2. - Analyse des observations .....	77
5.2.3. - Réflexion sur la partie 6 d'ISA- 95 .....	79
CHAPITRE 6 - DISCUSSION .....	80

6.1. - Étude bibliométrique.....	80
6.2. - Étude de cas .....	81
6.3. - Suggestions pour les PME manufacturières.....	84
CHAPITRE 7 - CONCLUSION.....	87
7.1. - Limites .....	88
7.2. - Contribution .....	89
7.3. - Perspectives.....	90
BIBLIOGRAPHIE .....	91
ANNEXE 1- MATRICE D'ANALYSE DES PUBLICATIONS.....	105

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 4.1 Nombre de résultats de la recherche ISA-95 par ajout de mots clés.....	33
Tableau 4.2 - Nombre de publications par année portant sur ISA- 95 depuis 1995 .....	34
Tableau 4.3 - Nombre de résultats de la recherche PME par ajout de mots clés .....	35
Tableau 4.4 - Synonymes utilisés pour la deuxième analyse de co-occurrence.....	39
Tableau 5.1 - Recensement des méthodes de connexion .....	60
Tableau 5.2 - Évaluations des solutions des fournisseurs de la veille technologique.....	67
Tableau 5.3 - Sommaire des modèles de facturation .....	69
Tableau 5.4 - Évaluations en fonction des exigences des solutions des fournisseurs ayant présenté leur solution .....	70
Tableau 5.5 - Liste des logiciels avec leur niveau dans le modèle PERA .....	73
Tableau 5.6 - Recensement des connexions dans l'environnement informationnel .....	75
Tableau 7.1 - Matrice d'analyse des publications recensées .....	105

## LISTE DES FIGURES

Figure 2.1 – Cadre conceptuel de la recherche .....	6
Figure 2.2 - Pyramide du Purdue Enterprise Reference Architecture (PERA).....	11
Figure 2.3 - Représentation des trois axes de RAMI 4.0 .....	13
Figure 2.4 - Portée d’ISA- 95 et ISA-88 .....	15
Figure 2.5 - Modèle de service de messagerie .....	17
Figure 3.1 - Plan global des étapes de la revue de littérature.....	23
Figure 4.1 - Analyse de la qualité des métadonnées .....	37
Figure 4.2 - Nombre d'occurrences des mots-clés dans la littérature sur ISA- 95 .....	38
Figure 4.3 - Nombre d'occurrences des mots-clés dans la 2e analyse de co-occurrence.	40
Figure 4.4 – Filtrage inspirée de PRISMA des publications recensées .....	43
Figure 5.1 - Modélisation de l’architecture logicielle de l’entreprise accompagnée .....	59
Figure 5.2 - Lien entre les besoins et les exigences. ....	65
Figure 6.1 – Vue simplifiée de l’architecture souhaitée dans la PME manufacturière accompagnée. ....	85
Figure 6.2 – Exemple d’architecture en cours de transition.....	86

## LISTE DES ABRÉVIATIONS

AIF	L'ATHENA Interoperability Framework
API	Application Programming Interface
ATHENA	Advanced Technologies for interoperability of Heterogeneous Enterprise Networks and their Applications
B2MML	Business To Manufacturing Markup Language
BMBF	Ministère fédéral Allemand de l'Éducation et de la Recherche
C4ISR	Command, Control, Communications, Computers, Intelligence, Surveillance and Reconnaissance
CÉGEP	Collège d'Enseignement Général et Professionnel
CNIMI	Centre National Intégré du Manufacturier Intelligent
CPS	Cyber-Physical System
EIF	European Interoperability Framework
ERP	Enterprise resource planning
GFB	General Function Block
IEC	International Electrotechnical Commission
IIC	Industrial Internet Consortium
IIRA	Industrial Internet Reference Architecture
IMSA	Intelligent Manufacturing System Architecture
IoT	Internet of Things
IP	Internet Protocol
ISA	International Society of Automation
ISO	International Organization for Standardization
ISQ	Institut de la Statistique du Québec
IT	Informational Technology
IVRA	Industrial Value Chain Reference Architecture
JSON	JavaScript Object Notation

MES	Manufacturing Execution System
MESA	Manufacturing Enterprise Solutions Association
OAGIS	Open Applications Group Integration Specification
OECD	Organisation de coopération et de développement économiques
OSI	Open Systems Interconnection
OT	Operational technology
PERA	Purdue Enterprise Reference Architecture
PME	Petites et moyennes entreprises
PRISMA	Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses
RAMI 4.0	Reference Architectural Model Industrie 4.0
SCIAN	Système de classification des industries de l'Amérique du Nord
SMU	Smart Manufacturing Unit
ULIM	Usine-Laboratoire d'intelligence Manufacturière
UQTR	Université du Québec à Trois-Rivières
VDE	Association de l'électrotechnique, de l'électronique et des technologies de l'information
VDI	Association des ingénieurs Allemands
XML	Extensible Markup Language
XSD	XML Schema Definition
ZVEI	German Electrical and Electronic Manufacturers' Association

## CHAPITRE 1 - INTRODUCTION

L'essor des technologies numériques et de l'industrie 4.0 amène de nouveaux enjeux au sein de l'industrie. Les technologies numériques sont souvent mises à l'avant-plan comme moyen pour maintenir ou améliorer la performance et l'avantage concurrentiel (Da Xu, Xu et Li 2018). Les contextes externes et internes des entreprises, incluant les pressions économiques et concurrentielles ainsi que les besoins croissants en efficacité opérationnelle, sont venus faire pression pour accélérer l'adoption des technologies. De l'externe, les entreprises sont confrontées à de nombreux défis, tels que la variabilité de l'environnement d'affaires, la démographie, les besoins changeant des clients et la coordination avec les fournisseurs externes (Bauer et al. 2015; Horváth et Szabó 2019; Wadhwa 2012). De l'interne, il est possible de citer comme facteurs les ressources limitées, le manque de compétence numérique, la maturité numérique de l'entreprise, le faible taux de succès des projets technologiques et la résistance aux changements (Bauer et al. 2015; Brunswicker et Vanhaverbeke 2015; European Commission 2022; Ghobakhloo et Iranmanesh 2021; Frank, Dalenogare et Ayala 2019; Horváth et Szabó 2019; Mittal et al. 2018; Moeuf et al. 2018; Stentoft et al. 2019; Won et Park 2020; Wuest et Thoben 2012).

Dans cette optique, les défis internes et externes ont poussé à l'exploitation de la technologie, menant à la prolifération des logiciels manufacturiers (Horváth et Szabó 2019; Müller et Voigt 2018). Les logiciels du manufacturier intelligent se sont multipliés et leur intégration sont devenus de plus en plus complexes. À ce sujet, tant Horváth que Müller (Horváth et Szabó 2019; Müller et Voigt 2018) exposent les conséquences de ce déploiement rapide. Selon ces auteurs, les entreprises se retrouvent aujourd'hui avec :

- 1) des environnements informationnels dépareillés, hétérogènes et mal organisés;
- 2) des systèmes obsolètes ou dépassés
- 3) des infrastructures technologiques de plus en plus coûteuses pour répondre aux besoins de stockage de données
- 4) des structures de données et des interfaces d'intégration qui ne sont pas uniformes;

- 5) des systèmes qui ont été implantés en silo sans une vision globale des données que les différents systèmes manipulent;
- 6) une interopérabilité entre les différents systèmes faible ou inexistante;
- 7) un manque de standardisation, ou d'application de la standardisation.

Dans tous les cas, les conséquences liées à l'exploitation rapide des technologies semblent plus problématiques pour la PME manufacturière (Horváth et Szabó 2019; Müller et Voigt 2018).

### **1.1. - Contexte de la PME manufacturière**

Mais pourquoi s'intéresser particulièrement à la PME? D'abord, parce qu'elles subissent les mêmes obligations de performance et de compétitivité, mais elles ont souvent des ressources limitées par rapport à la grande entreprise (Bauer et al. 2015; Brunswicker et Vanhaverbeke 2015; Horváth et Szabó 2019; Mittal et al. 2018; Wadhwa 2012), ainsi qu'un taux de succès et d'adoption technologique plus faible (European Commission 2022; Frank, Dalenogare et Ayala 2019; Ghobakhloo et Iranmanesh 2021; Won et Park 2020). Dès 2008, tel que démontré par (Poba-Nzaou 2008), le taux d'échec de l'implantation d'un système de type Enterprise Resources Planning (ERP) dans une PME manufacturière est de l'ordre de 70 %. Et il est question ici d'un seul type de logiciel. Ce constat d'échec semble toujours d'actualité, et surtout avec une plus grande portée, comme le présente une étude du Boston Consulting Group, qui estime un taux de succès de transformation numérique de l'ordre de 30 % (Forth et al. 2020). De plus, comme introduit par (Genest et Gamache 2020), les PME manufacturières ne sont pas équipées pour acquérir et maîtriser les technologies associées à l'industrie 4.0. Les PME manufacturières n'ont pas les ressources ni financières ni humaines pour accomplir une transformation numérique.

Ensuite au niveau mondial, les PME constituent 99 % des entreprises et sont composées des 2/3 de tous les employés. Pourtant, elles ne génèrent que 50 à 60 % de la valeur ajoutée (Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) 2019, 2023). Au niveau européen, les PME représentent 90 % des entreprises avec le 2/3 du total des

emplois. Mais en plus, 85 % des nouveaux emplois sont générés dans les PME (European Commission 2020). Au Canada, en 2021, les PME représentaient 99.8 % des entreprises, et les employés des PME représentent aussi le 2/3 des emplois totaux (Innovation, Sciences et Développement économique Canada (ISDEC) 2022). Considérant la proportion de PME parmi l'ensemble des entreprises, il est légitime que la PME soit présente en conséquence dans la littérature.

Il y a un décalage entre la présence des PME et la présence de recherche la concernant déjà identifié dans la littérature (Brunswick et Vanhaverbeke 2015; Mittal et al. 2018; Moeuf et al. 2018; Müller et Voigt 2018). Cette lacune est d'autant plus critique que les solutions proposées sont souvent reconnues comme non adaptées, ou difficilement adoptées par les PME (Li, Mantravadi et Moller 2020; Masood et Sonntag 2020).

Cette section a permis de distinguer les PME, tant par leurs enjeux que par leur nombre, tout en mettant en évidence le décalage déjà relevé dans la littérature. Ainsi, cela appuie le choix de formuler une problématique portant spécifiquement sur les PME manufacturières.

## **1.2. - Problématique**

Le déploiement rapide des logiciels du manufacturier intelligent et le contexte spécifique de la PME manufacturière mènent à la problématique du présent mémoire. Soit que les PME manufacturières sont prises avec des architectures logicielles incohérentes, qui ne répondent pas adéquatement à leurs besoins, ce qui semble impacter leur performance. En effet, il est reconnu depuis longtemps que les architectures logicielles incohérentes et faiblement interconnectées impactent négativement les performances et la compétitivité des entreprises manufacturières (Williams et Smith 1998; Allen et Bryan 1986; Banker, Davis et Slaughter 1998; Jones, Barkmeyer et Davis 1989). De plus, la littérature reconnaît que les solutions proposées sont souvent non adaptées, ou difficilement adoptées par les PME manufacturières (Li, Mantravadi et Moller 2020; Masood et Sonntag 2020). Aussi, les PME possèdent moins ressources, de savoir-faire et de temps (Bauer et al. 2015; Brunswick et Vanhaverbeke 2015; Horváth et Szabó 2019; Mittal et al. 2018; Wadhwa

2012), ce qui limite leur capacité à mettre en place une architecture logicielle cohérente qui s'appuie sur l'état de l'art. À ce sujet, il est d'intérêt d'aller constater quel est l'état de l'art.

Ce mémoire s'interroge donc sur l'état de l'art de l'intégration des logiciels dans les PME manufacturières. Le chapitre suivant présente une revue de littérature exploratoire à ce sujet, pour ensuite définir les questions, hypothèses et objectifs de recherche.

## **CHAPITRE 2 - REVUE EXPLORATOIRE ET OBJECTIFS DE RECHERCHE**

Afin de définir les concepts qui entrent en jeu au sujet de la problématique, une revue exploratoire est présentée. Par la suite, les questions, les hypothèses et les objectifs de recherche sont définis.

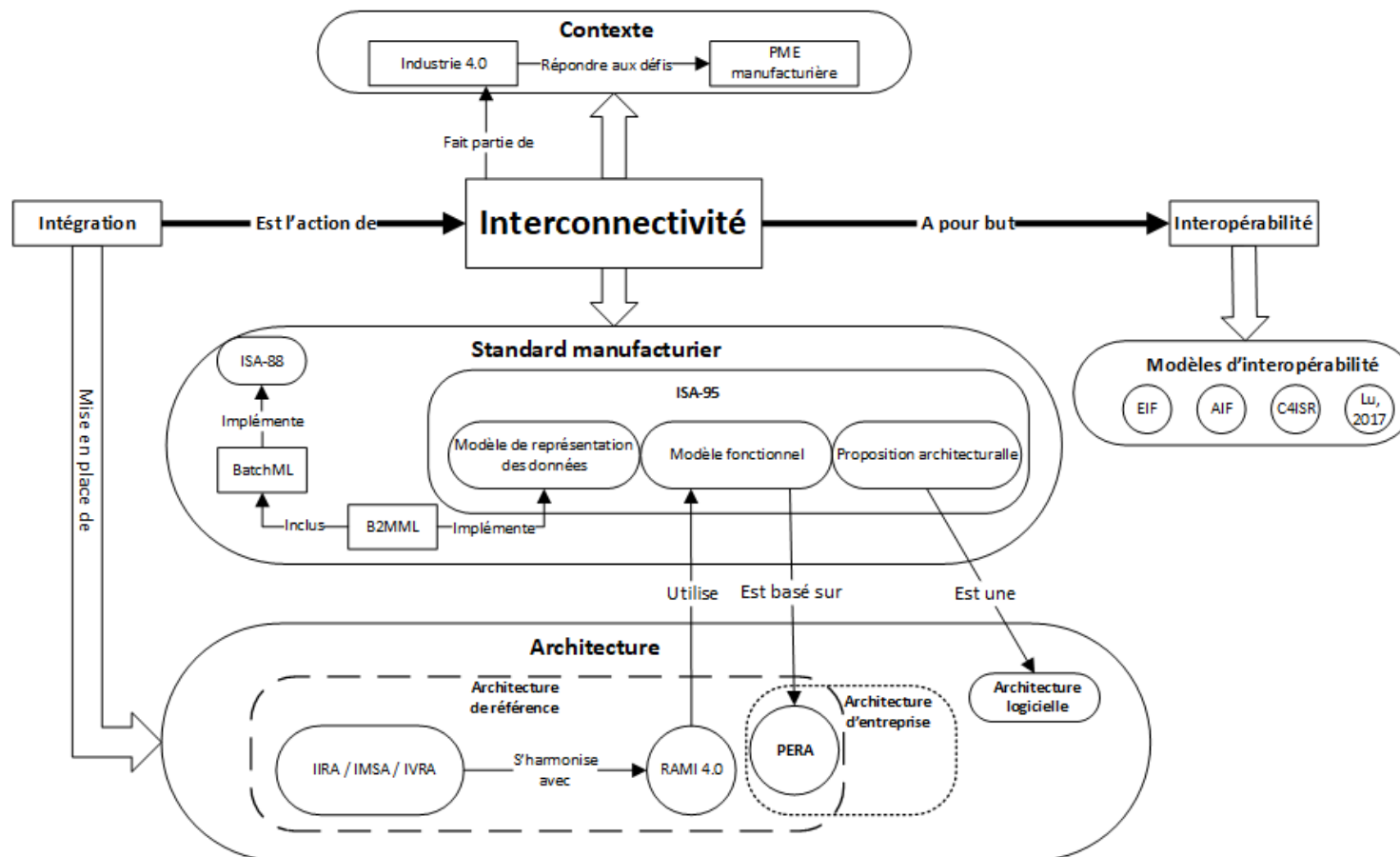
### **2.1. - Revue exploratoire et cadre conceptuel**

La revue exploratoire permet de mettre en place les différents concepts importants. Autant pour permettre de définir chacun d'entre eux, que pour expliquer leur rôle dans la présente recherche. Cette revue facilite la lecture de l'ensemble du présent mémoire.

D'abord, plusieurs concepts sont définis afin de clarifier les définitions employées dans la présente recherche. Les concepts définis sont : 1) la PME manufacturière; 2) l'industrie 4.0; 3 ) l'architecture logicielle; 4) l'architecture de références; 5) l'interconnectivité; 6) l'interopérabilité; 7) l'intégration.

Ensuite, la revue explore les différents modèles et standards relatifs à l'interconnectivité et l'interopérabilité. En commençant par les différents modèles d'interopérabilité, puis les architectures de référence. En poursuivant avec les différents standards, soit ISA-88, ISA-95 et le B2MML.

La figure 2.1 ci-dessous fournit un plan des concepts et leurs liens.



### Légende

**PME** = Petites et moyennes entreprises

**BatchML** = Batch Markup Language

**B2MML** = Business To Manufacturing Markup Language

**EIF** = European Interoperability Framework

**C4ISR** = Command, Control, Communications, Computers, Intelligence, Surveillance, and Reconnaissance

**AIF** = ATHENA Interoperability Framework

**ISA** = International Society of Automation

**IIRA** = Industrial Internet Reference Architecture

**IMSA** = Intelligent Manufacturing System Architecture

**IVRA** = Industrial Value Chain Reference Architecture

**RAMI 4.0** = Reference Architectural Model for Industrie 4.0

**PERA** = Purdue Enterprise Reference Architecture

*Figure 2.1 – Cadre conceptuel de la recherche*

### **2.1.1. - Petites et moyennes entreprises (PME) manufacturières**

Pour la définition de petites et moyennes entreprises (PME), il existe plusieurs façons de caractériser la PME, que ce soit par le chiffre d'affaires ou le nombre d'employés. De plus, selon les sources et les pays, ces limites peuvent différer. Pour la présente recherche, c'est la définition du gouvernement du Canada qui est utilisée, qui définit comme PME les sociétés entre 10 et 499 employés (Innovation, Sciences et Développement économique Canada (ISDEC) 2023). C'est cette définition qui est employée pour sélectionner l'entreprise à l'étude de cas.

Dans le contexte de recherche documentaire, le principal outil utilisé est Scopus. Scopus recense les publications scientifiques de plusieurs centaines de pays (Scimago Lab 2023). La recherche documentaire s'effectue à travers les métadonnées bibliographiques. Il serait difficile de considérer les différentes définitions en fonction des origines des publications. Considérant cette limitation, uniquement les métadonnées bibliographiques sont utilisées pour recenser les publications qui concernent la PME dans la littérature. La chaîne de recherche ci-dessous est exploitée pour les recherches bibliographiques concernant les PME. Cela permet aussi une consistance dans les différentes recherches documentaires.

*sme OR "Small and medium-sized enterprises" OR "small sized companies" OR smes OR "small-sized companies" OR "Small and medium sized enterprises" OR msme OR "micro, small and medium enterprises" OR "Micro, small and medium-sized enterprises" OR msmes OR "Micro, small and medium sized enterprises"*

Maintenant que la façon de considérer la PME est clarifiée, il serait aussi d'intérêt de définir l'Industrie 4.0, et comment la présente recherche s'y inscrit.

### **2.1.2. - Industrie 4.0**

En premier lieu, l'industrie 4.0 est un programme gouvernemental allemand lancé en 2011 et présenté lors de la foire d'Hanovre de la même année (Kagermann, Lukas et Wahlster 2011; Philbeck et Davis 2024; Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 2016).

L'Industrie 4.0, en tant que 4<sup>e</sup> révolution industrielle, peut aussi se définir comme l'implantation de technologies numériques permettant de rendre les systèmes de production plus autonomes, plus dynamiques, plus connectés et plus contrôlés (Tortorella et Fettermann 2018). Cela peut aussi être présenté comme le traitement et le partage des données en temps réel via l'interconnexion et l'intégration des systèmes (Kohler, Weisz et Ehrhart 2016). C'est en s'intéressant à l'interconnexion des systèmes que ce mémoire se positionne dans l'industrie 4.0.

L'interconnexion de systèmes amène à prendre en considération l'architecture logicielle, qui est présentée dans la section suivante.

### ***2.1.3. - Architecture***

L'architecture logicielle, de système ou d'entreprise est définie par l'International Organization for Standardization (ISO) comme étant les concepts ou les propriétés d'un élément dans son environnement, avec les principes qui gouvernent sa réalisation et son évolution (International Organization for Standardization (ISO) 2019, 2022). Du côté de Clements, l'architecture est définie comme la structure formée par l'ensemble des éléments, les relations entre les éléments ainsi que les caractéristiques de ces relations et de ces éléments (Clements 2011). Dans certains contextes, la présentation des parties prenantes avec leurs intérêts et leurs rôles peut être incluse (Bass, Clements et Kazman 2013). Dans ce mémoire, l'architecture est définie comme la structure organisée d'un ensemble de composants d'un système, avec leurs rôles et leurs interactions.

L'architecture d'entreprise concerne l'organisation des différentes fonctions de l'entreprise. Tandis que l'architecture logicielle, l'architecture numérique ou l'architecture informationnelle sont des synonymes qui concernent l'organisation des logiciels. C'est le terme architecture logicielle qui est utilisé tout au long de ce mémoire.

Une architecture de référence se définit comme un ensemble de conventions, de pratiques et de principes pour définir une architecture dans un domaine d'application ou au sein d'une communauté de pratique (International Organization for Standardization (ISO) 2022).

Autrement dit, une architecture est l'organisation effective des composantes d'un système, et une architecture de référence est un guide pour concevoir et mettre en œuvre une architecture dans un contexte donné. L'intégration, l'interconnectivité et l'interopérabilité sont définies dans la section suivante.

#### ***2.1.4. - Interconnectivité, interopérabilité et intégration de systèmes***

L'interconnectivité est la capacité de plusieurs systèmes d'être connectés entre eux pour échanger de l'information sous différentes formes (Zhu et al. 2021). L'interopérabilité est une qualité recherchée par une architecture logicielle. Une architecture logicielle avec un haut niveau d'interopérabilité en est une où les usagers et les sous-systèmes sont en mesure d'exploiter mutuellement et simultanément de l'information (International Organization for Standardization (ISO) 2023a, 2023b). L'intégration de système peut être défini comme étant le processus de combiner des sous-systèmes dans le but d'obtenir un système global qui fonctionne de manière cohérente et coordonnée (Printz 2020; International Organization for Standardization (ISO) 2017).

Autrement dit, l'intégration de système consiste à interconnecter des logiciels dans une architecture organisée, où les logiciels sont interconnectés pour interopérer en échangeant et en exploitant mutuellement de l'information, formant ainsi un système global cohérent et coordonné.

Du côté de l'interopérabilité, plusieurs modèles existent et sont présentés à la suite.

#### ***2.1.5. - Modèle d'interopérabilité***

L'interopérabilité peut être considérée à plusieurs niveaux, selon la proximité avec le processus ou avec le niveau système. Il existe plusieurs cadres de références définissant différents niveaux d'interopérabilité. La revue de (Lu 2017) résume les niveaux d'interopérabilité avec quatre niveaux : opérationnel, systémique, technique et sémantique. Afin d'arriver à ce résumé, trois cadres de référence sont révisés, soit l'EIF, le C4ISR et l'AIF.

Le European Interoperability Framework (EIF) a été développé par l'Union européenne. La version 1.0 a été présentée en 2004, et celle-ci présentait un modèle à trois niveaux, soit organisationnel, sémantique et technique (European Commission 2004). La nouvelle version de l'EIF, publié en 2017, a ajouté le niveau juridique au-dessus du niveau organisationnel (European Commission 2017).

Le Command, Control, Communications, Computers, Intelligence, Surveillance and Reconnaissance (C4ISR) provient quant à lui du département de la défense. Le C4ISR présente trois niveaux : Opérationnel, systémique et technique (Sowell 2006).

Le projet Advanced Technologies for interoperability of Heterogeneous Enterprise Networks and their Applications (ATHENA) est une initiative de la Commission européenne. Cette initiative a développé l'ATHENA Interoperability Framework (AIF). L'AIF présente une vue à trois niveaux, soit Conceptuel, Applicatif et Technique (Berre et al. 2007; Anastasiou et al. 2006).

Pour discuter de l'interopérabilité dans la présente recherche, l'EIF est employé. L'EIF est une recommandation toujours en place de l'Union européenne. La version de 2017 de l'EIF demeure d'actualité.

Afin de structurer et comprendre l'organisation des logiciels et des technologies, plusieurs architectures de références ont aussi été développées.

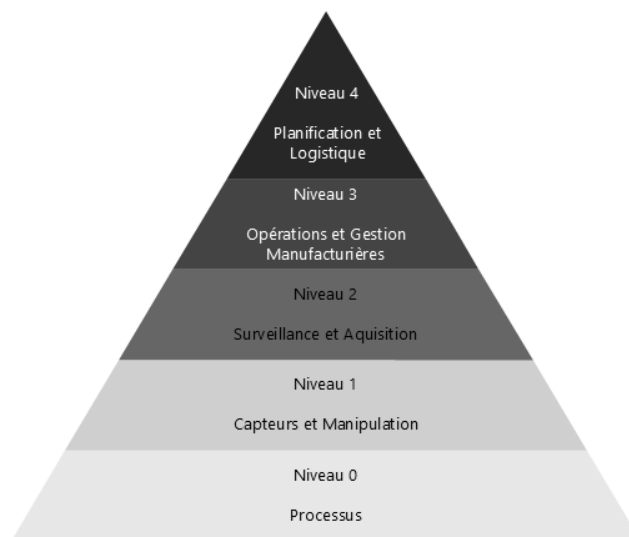
### ***2.1.6. - Architectures de références***

Plusieurs architectures de références sont employées afin d'expliquer et représenter l'utilisation des technologies dans le contexte de l'industrie 4.0. Cette section présente d'abord le Purdue Enterprise Reference Architecture (PERA). Ensuite, quatre architectures de référence de l'industrie 4.0 sont présentées.

#### ***2.1.6.1. Purdue Enterprise Reference Architecture (PERA)***

Le Purdue Enterprise Reference Architecture (PERA), ou le modèle Purdue, présente une vision verticale en cinq couches de l'organisation et des activités d'une entreprise manufacturière. Chacune des couches représente un ensemble de fonctions de l'entreprise

manufacturière, qui sont hiérarchisées en fonction de la proximité du processus. Chaque niveau peut être utilisé pour situer des positionnements physiques, des exigences de temps ainsi que des fonctionnalités de systèmes numériques (Williams 1993; Li et Williams 1997). La figure 2.2 présente les cinq niveaux du PERA.



**Figure 2.2 - Pyramide du Purdue Enterprise Reference Architecture (PERA)**

#### 2.1.6.2. Architectures de référence de l'industrie 4.0

Nakagawa a présenté que le Reference Architectural Model Industrie 4.0 (RAMI 4.0) semble être, avec l'Industrial Internet Reference Architecture (IIRA), le modèle d'interconnectivité le plus cité dans la littérature (Nakagawa et al. 2021). De côté du Standardization Council Industrie 4.0, il est avancé que des démarches d'alignement vers le modèle RAMI 4.0 sont faites par les principaux modèles d'architecture de référence du 4.0. Ces démarches d'harmonisation sont en cours pour l'IIRA, l'Intelligent Manufacturing System Architecture (IMSA) et l'Industrial Value Chain Reference Architecture (IVRA) (Heidel et al. 2017). Le modèle RAMI 4.0 fait aussi l'objet du standard international IEC PAS 63088 de l'International Electrotechnical Commission (IEC) 2017). Sa forte présence dans la littérature, les démarches d'alignement ainsi que la publication d'un standard IEC sont des éléments qui permettent d'observer un début de consensus vers le modèle de RAMI 4.0. Cette section présente les principales architectures

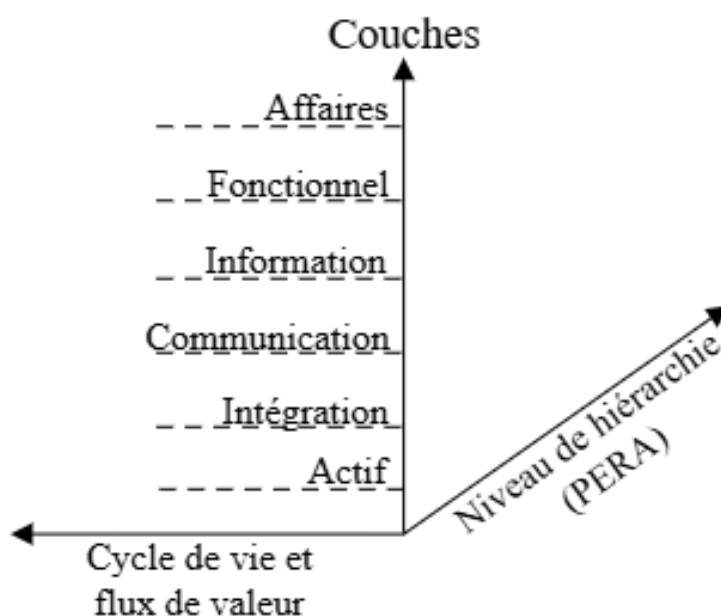
de référence de l'industrie 4.0, avec une emphase sur RAMI4.0, considérant que celui-ci tend à faire consensus.

L'Industrial Internet Reference Architecture (IIRA) est une architecture de référence développée par l'Industrial Internet Consortium (IIC). L'IIRA est basée sur quatre niveaux de point de vue. La vue d'affaires (Business), la vue de la fonctionnalité (Usage), la vue de la mise en œuvre (Functional) ainsi que la vue du déploiement (Implementation) (Murphy, Lin et Martin 2023).

L'Intelligent Manufacturing System Architecture (IMSA) est une architecture de référence développée par le gouvernement chinois dans le cadre de leur stratégie China Manufacturing 2025. Le modèle du IMSA est un modèle en trois dimensions, dont les trois axes sont la hiérarchie physique des systèmes, le cycle de vie ainsi que les fonctions d'intelligence (S. Wei et al. 2017).

L'Industrial Value Chain Reference Architecture (IVRA) est une architecture de référence développée par l'Industrial Value Chain Initiative au Japon. L'IVRA définit une unité du manufacturier intelligent (Smart Manufacturing Unit, SMU). Chaque unité est définie selon trois dimensions : les actifs, la gestion et les activités de projet. Par la suite, les SMU sont réparties en tant que bloc de fonction (GFB) dans une deuxième vue. Cette deuxième vue répartit les SMU aussi selon trois dimensions : la hiérarchie physique, le flux du cycle de vie ainsi que le flux de la demande (Industrial Value Chain Initiative (IVI) 2016, 2018; Nishioka 2017).

Le modèle Reference Architectural Model Industrie 4.0 (RAMI 4.0) provient de la German Electrical and Electronic Manufacturers' Association (ZVEI). L'architecture de référence de RAMI 4.0 est employée dans la littérature afin de positionner et d'expliquer des projets de l'industrie 4.0. RAMI 4.0 est un modèle en trois dimensions composées de trois axes. La figure 2.4 présente les trois axes de RAMI 4.0, qui sont décrits à la suite.



**Figure 2.3 - Représentation des trois axes de RAMI 4.0**  
*Inspiré de : (Martin et Rexroth 2015)*

L'axe des abscisses correspond au cycle de vie des systèmes et des composantes. Le standard IEC 62890 est utilisé pour positionner en fonction du cycle de vie d'un produit (Plattform Industrie 4.0 2018).

L'axe des ordonnées correspond au niveau hiérarchique physique par rapport au produit. Le modèle du PERA est utilisé pour définir les différents niveaux (Plattform Industrie 4.0 2018). La première partie de la norme ISA 95, aussi publiée par l'IEC avec l'identification 62264-1, est citée comme référence pour la définition de l'axe pour localiser physiquement en fonction du produit.

Sur l'axe des cotes, RAMI ajoute six couches d'interopérabilité. La couche *Business* inclut tout ce qui touche aux différents processus d'affaires, tels que l'alignement avec les objectifs d'affaires, la définition de la génération de valeur et l'orchestration des solutions. La couche *Functional* inclut la définition des fonctions, incluant autant les exigences de fonctionnalités que les exigences de qualité. La couche *Information* inclut tout ce qui concerne la gestion des données, les modèles de données et les exigences liées à la qualité des données. La couche *Communication* définit de quelle façon les différents systèmes

intégrés communiquent. La couche *Integration* inclut l'ensemble des dispositifs mis en place pour utiliser ou présenter l'information à partir des actifs physiques. La couche *Asset* comprend les actifs physiques de l'entreprise (German Electrical and Electronic Manufacturers' Association (ZVEI), Verein Deutscher Ingenieure (VDI) et Verband der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik (VDE) 2015).

Maintenant qu'une vue d'ensemble sur les modèles d'architecture est complétée, les standards ISA-88 et ISA-95, qui portent sur l'interconnectivité des systèmes du manufacturier, sont revus.

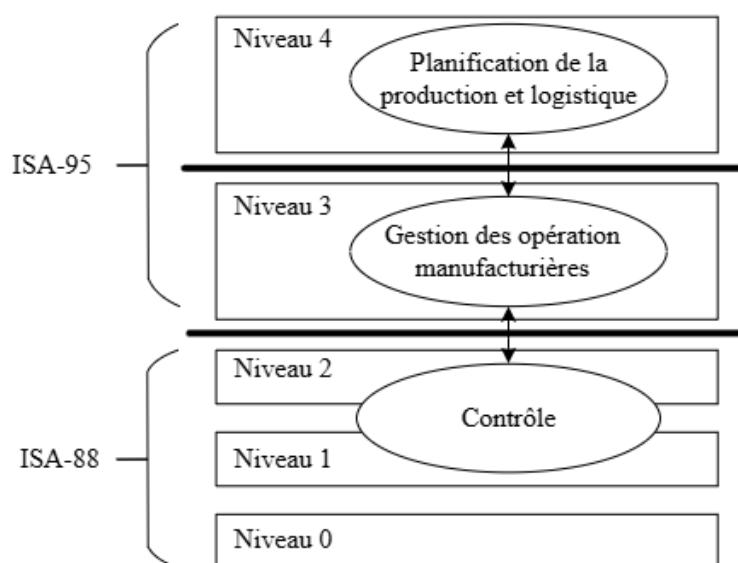
### **2.1.7. - ISA-88**

Le standard ISA-88 est publié par l'International Society of Automation, ainsi que par l'International Electrotechnical Commission (IEC) sous le code IEC-61512. Celui-ci est présenté, car il est employé dans un contexte d'interconnectivité des systèmes de contrôle. Le standard fournit une représentation normalisée de la sémantique associée à la gestion de la production par lot en définissant plusieurs modèles de données (International Society of Automation (ISA) 2010b). Le standard est composé de quatre parties. La première partie définit les modèles et la terminologie (International Society of Automation (ISA) 2010b). La deuxième partie présente la conception des structures de données et de leurs relations. Et ce, dans le but de fournir des indications pour formaliser les structures de données dans un langage numérique (International Society of Automation (ISA) 2001). La troisième partie définit un modèle pour la gestion des recettes dans un contexte de production par lot, incluant la description la représentation et la structure des données (International Society of Automation (ISA) 2003). La quatrième partie fournit un modèle de référence de données pour l'enregistrement d'historique de production de lot (International Society of Automation (ISA) 2006).

À la suite d'ISA-88, le standard ISA-95 vient couvrir les activités de gestion des opérations manufacturières, de la planification de la production et de la logistique.

### 2.1.8. - ISA- 95

Le standard ISA- 95, nommé Enterprise-Control System Integration est publié par l'International Society of Automation. Les cinq premières parties sont également publiées par l'International Electrotechnical Commission (IEC) et l'International Organization for Standardization (ISO) avec le standard ISO/IEC 62264 (International Society of Automation (ISA) 2013a). Le standard fournit une représentation normalisée de la sémantique associée à la gestion d'une entreprise manufacturière. Celui-ci est présenté, car il prétend s'attaquer à plusieurs obstacles auxquels sont confrontées les PME manufacturières. La proposition d'ISA- 95 promet d'offrir une plus grande portabilité, de mettre en œuvre efficacement une architecture informationnelle interconnectée ainsi que de faciliter le maintien de la cohérence des données. La solution d'ISA- 95 a pour portée les systèmes offrant des fonctionnalités pour la gestion des opérations de production, des inventaires, de la qualité et de la maintenance (International Society of Automation (ISA) 2010a). ISA- 95 utilise le PERA pour définir sa portée. ISA- 95 se limite aux systèmes des niveaux trois et quatre, ainsi qu'aux interactions entre eux. La figure 2.4 ci-dessous présente la portée d'ISA- 95 et d'ISA-88.



**Figure 2.4 - Portée d'ISA- 95 et ISA-88  
(International Society of Automation (ISA) 2010a)**

Le standard propose trois éléments en tant que solution d'interconnectivité : i) un modèle fonctionnel pour les activités des niveaux trois et quatre du PERA, ii) un modèle de représentation des données pour l'échange d'information entre les logiciels des niveaux trois et quatre du PERA, iii) un modèle d'architecture logicielle pour organiser les interconnexions entre les logiciels des niveaux trois et quatre du PERA.

#### *2.1.8.1. Modèle fonctionnel*

La première partie d'ISA- 95 présente un modèle fonctionnel des systèmes de contrôle impliqués dans la gestion manufacturière. Ce modèle définit les entités et les fonctionnalités des systèmes informationnels impliqués dans l'industrie manufacturière (International Society of Automation (ISA) 2010a). Le modèle présenté dans la première partie concerne les niveaux trois et quatre du PERA. La troisième partie complète le modèle fonctionnel en offrant un découpage fonctionnel plus pointu pour le niveau trois du PERA. ISA- 95 ne fournit pas de définition des systèmes courants, tels que l'ERP et le MES. Ce sont plutôt ces systèmes qui réalisent des fonctionnalités décrites dans le modèle fonctionnel d'ISA- 95. Le modèle fonctionnel est la base de la définition du modèle de données.

#### *2.1.8.2. Modèle de représentation des données*

Les parties deux, trois et quatre d'ISA- 95 fournissent un modèle de données permettant de représenter les entités physiques et logiques pour gérer les fonctions couvertes par le standard (International Society of Automation (ISA) 2018a, 2013b, 2018b).

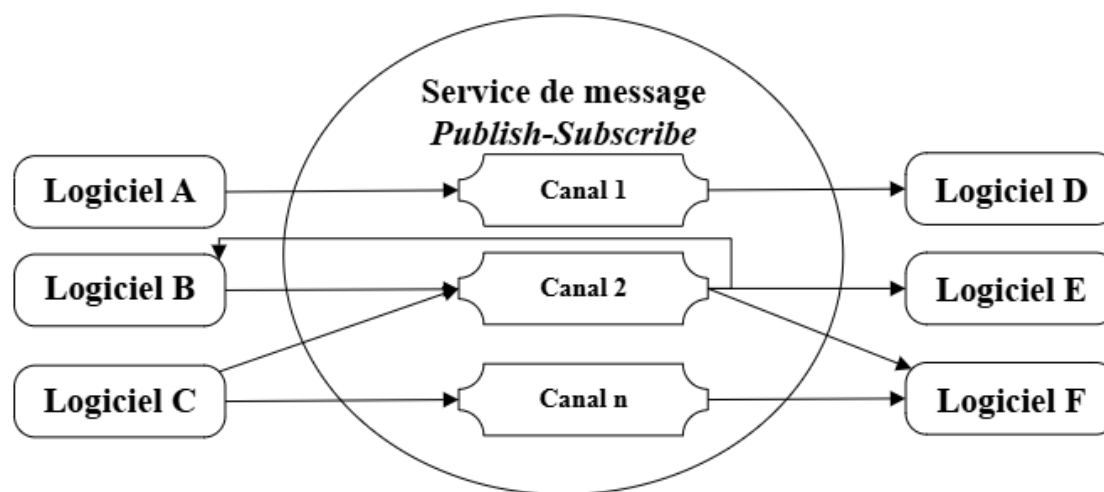
La partie cinq d'ISA- 95 (International Society of Automation, 2013b) fournit les transactions pouvant être faites dans une intégration avec les autres systèmes manufacturiers et les systèmes d'affaires (International Society of Automation (ISA) 2018c). La partie cinq est inspirée des transactions définies dans la version 10.6 du standard Open Application Group Integration Specification (OAGIS).

#### *2.1.8.3. Modèle d'architecture*

La sixième partie d'ISA- 95 fournit un modèle d'architecture de communication. En extension, les parties sept et huit définissent des profils et des alias de communication

pour la gestion des échanges d'information (International Society of Automation (ISA) 2017, 2020).

Le modèle de communication d'ISA-95 est basé sur le patron *Publish-Subscribe*. Le patron *Publish-Subscribe* consiste à définir un ensemble de canaux de communication. Les sous-systèmes s'enregistrent ensuite comme fournisseur (*Provider*), comme abonné (*Consumer*) ou les deux. Lorsqu'un fournisseur transmet de l'information sur un canal, les abonnés sont notifiés du changement d'information, et peuvent agir selon leurs règles d'affaires. L'implémentation de ce patron implique généralement un intermédiaire central nommé médiateur, qui gère les canaux, les abonnements et les échanges (Hohpe et Woolf 2003). La figure 2.6 ci-dessous présente un exemple avec six logiciels qui échangent de l'information à travers trois canaux.



**Figure 2.5 - Modèle de service de messagerie  
(International Society of Automation (ISA) 2014)**

### **2.1.9. - Business to Manufacturing Markup Language (B2MML)**

Le Manufacturing Enterprise Solutions Association (MESA) a développé deux outils de représentation des données basés sur ISA-88 et ISA-95, soit le BatchML et le B2MML. Ces deux outils fournissent une base pour mettre en place les modèles de données d'ISA-88 et ISA-95 dans un langage de programmation. Le BatchML et le B2MML ont pour but d'exploiter un modèle commun de données en interconnectant différents systèmes. Ce

sont les outils qui devraient permettre d'exploiter un modèle unique de données dans une architecture.

Le Batch Modeling Language (BatchML) est une représentation formelle du standard ISA-88. Il fournit un schéma de données XML (Extensible Markup Language) en format XSD (XML Schema). Il permet de structurer l'instanciation des concepts d'ISA-88 en format XML, pour permettre l'échange d'information à travers différentes interfaces. Le format XSD permet aussi de s'assurer de la validité d'un fichier de données.

Le Business To Manufacturing Markup Language (B2MML) est une représentation du schéma de données du standard ISA- 95 en format XSD/XML. Le B2MML supprime le BatchML en incluant l'entièreté du modèle d'ISA-88. La MESA a aussi développé récemment une version JSON du B2MML. Ce qui permet à B2MML de fournir les outils pour l'instanciation complète des concepts d'ISA-88 et ISA- 95.

#### ***2.1.10. - Synthèse de la revue exploratoire***

La revue a permis de positionner la présente recherche dans l'Industrie 4.0, et de présenter les arguments pour prendre en considération, de manière distinctive, la PME manufacturière.

Les modèles d'interopérabilité amènent la réflexion que l'interopérabilité des systèmes ne se limite pas à l'aspect technique. Il faut aussi prendre en compte les aspects sémantiques, d'affaires et d'opérations.

Les architectures de références sont des outils permettant de positionner les différents outils, logiciels et fonctionnalités dans différentes vues. Le PERA fournit une hiérarchisation des fonctions de l'entreprise manufacturière par rapport au processus. Le PERA est employé autant par RAMI 4.0 comme un de ses axes que par ISA- 95 pour définir sa portée.

Les standards ISA-88 et ISA- 95 fournissent des modèles fonctionnels et de données pour représenter les informations nécessaires aux fonctionnalités de l'entreprise manufacturière des 4 niveaux du PERA. D'une part, ISA-88 agit aux niveaux un et 2, tandis qu'ISA- 95

agit aux niveaux trois et quatre. De plus, ISA-95 fournit aussi une proposition d'architecture pour interconnecter les logiciels du manufacturier intelligent.

Le B2MML fournit les outils techniques pour mettre en place les modèles de données proposés par ISA-88 et ISA-95.

Somme toute, cette exploration amène un élément intéressant : il existe un standard qui est une solution technique pour interconnecter des logiciels. Donc, s'il existe une solution technique standard pour l'interconnectivité des systèmes, est-ce qu'elle est appliquée pour la PME manufacturière?

## **2.2. - Questions, hypothèses et objectifs**

Pour donner suite à la revue exploratoire, plusieurs questions et hypothèses peuvent être soulevées. Ces questions et hypothèses mèneront à définir l'objectif de la présente recherche.

### **2.2.1. - Questions et hypothèses**

D'une part, il est reconnu dans la littérature que les PME manufacturières ont une problématique d'architecture technologique faiblement interconnectée (Horváth et Szabó 2019; Sous-traitance industrielle Québec (STIQ) 2023). La littérature reconnaît aussi que les solutions technologiques proposées ne sont pas adaptées ou adoptées dans le contexte des PME. ISA-95 est une solution technologique qui ne semble pas adoptée dans la PME (Masood et Sonntag 2020; Li, Mantravadi et Moller 2020). C'est à partir de ce constat que la présente recherche a été démarrée.

Avant d'aller plus loin, il est important de clarifier ce qui est considéré comme étant la solution proposée par ISA-95 dans le cadre de la présente recherche. La présente recherche s'intéresse principalement au modèle de données ainsi qu'à la proposition architecturale avec le patron *Publish-Subscribe*. Le modèle fonctionnel de la partie 1 d'ISA-95, basé sur le PERA, est d'ores et déjà reconnu dans l'industrie et est d'ailleurs employé par le modèle RAMI 4.0 (Plattform Industrie 4.0 2018).

Donc, la question principale à poser est : est-ce que la solution proposée par le standard ISA- 95 est exploitable dans le contexte des PME manufacturières? Cela mène à quatre sous-questions.

Premièrement, pour reconnaître que la solution d'ISA- 95 est adaptée pour la PME manufacturière, il faudrait que la solution soit expérimentée en contexte de PME. Par conséquent, est-ce que la solution proposée par ISA- 95 ou ses dérivés a été validée par la littérature dans un contexte de PME? L'hypothèse avancée est que la proposition d'ISA- 95 n'a peu ou pas été évaluée par la littérature dans le contexte de la PME.

Deuxièmement, la solution d'ISA- 95 a pour objectif d'interconnecter les systèmes du manufacturier intelligent. Il se peut qu'il existe des solutions alternatives à ISA- 95 qui répondent au même objectif. Et si elles existent, il se pourrait qu'elles soient employées en remplacement d'ISA-95. Il devient donc pertinent de se demander : est-ce qu'il existe des solutions alternatives à ISA- 95 dans la littérature? L'hypothèse à valider est qu'il existe des alternatives, ou du moins des solutions complémentaires.

Troisièmement, si des alternatives sont identifiées, elles doivent être mises en pratique dans le contexte de la PME manufacturière pour cadrer dans la présente recherche. Tout comme pour ISA- 95, il est pertinent de se demander : est-ce que les alternatives proposées ont été évaluées par la littérature en contexte de PME? Cette fois-ci, l'hypothèse avancée est que les alternatives sont également peu ou pas évaluées par la littérature dans le contexte de la PME.

Finalement, si la littérature n'a pas évalué ISA- 95 ou des alternatives dans le contexte de la PME, est-ce qu'il serait d'intérêt pour la PME manufacturière de mettre en œuvre la proposition d'ISA- 95? L'hypothèse amenée ici est qu'il serait intéressant de mettre en œuvre la proposition d'ISA- 95 en considérant le contexte des PME.

Les objectifs de recherche sont donc déterminés dans la prochaine section afin de répondre à ces questions en validant les hypothèses avancées.

### ***2.2.2. - Objectifs de recherche***

L'objectif principal de la recherche est de déterminer si la proposition du standard ISA- 95 peut être mise en œuvre dans les PME manufacturières. Et ce, en rappel, pour répondre à la problématique que les PME manufacturières sont prises avec des architectures logicielles incohérentes qui ne répondent pas adéquatement à leurs besoins, impactant ainsi leur performance. L'objectif principal répond directement à la question principale de la recherche, qui est : est-ce que la solution proposée par le standard ISA- 95 est exploitable dans le contexte des PME manufacturières?

Quatre sous-objectifs peuvent être tirés à la fois de l'objectif principal que des questions et des hypothèses de recherche.

- SO1 - Déterminer si ISA- 95 a été évaluée en contexte de PME en examinant la présence de la combinaison ISA- 95 et PME dans la littérature;
- SO2 - Identifier les alternatives et les concepts associés à ISA- 95;
- SO3 - Déterminer si des alternatives à ISA- 95 ont été évaluées en contexte de PME par une recension dans la littérature de la combinaison entre la PME avec les alternatives à ISA- 95;
- SO4 - Observer l'intérêt pour l'implémentation de la proposition d'ISA- 95 chez les PME manufacturières.

La méthodologie qui suit permettra de répondre aux objectifs de la recherche.

## CHAPITRE 3 - MÉTHODOLOGIE

La méthodologie vise à répondre à l'objectif principal de la recherche, soit déterminer si la proposition du standard ISA- 95 peut être mise en œuvre dans les PME manufacturières. La méthodologie tient compte de la problématique soulevée précédemment, selon laquelle les PME manufacturières sont prises avec des architectures logicielles incohérentes qui ne répondent pas adéquatement à leurs besoins, ce qui engendre des impacts négatifs sur leur performance.

La méthodologie du présent mémoire est divisée en deux parties. La première est une étude bibliométrique pour sonder la littérature. La deuxième partie est une étude de cas basé sur l'approche de recherche-intervention.

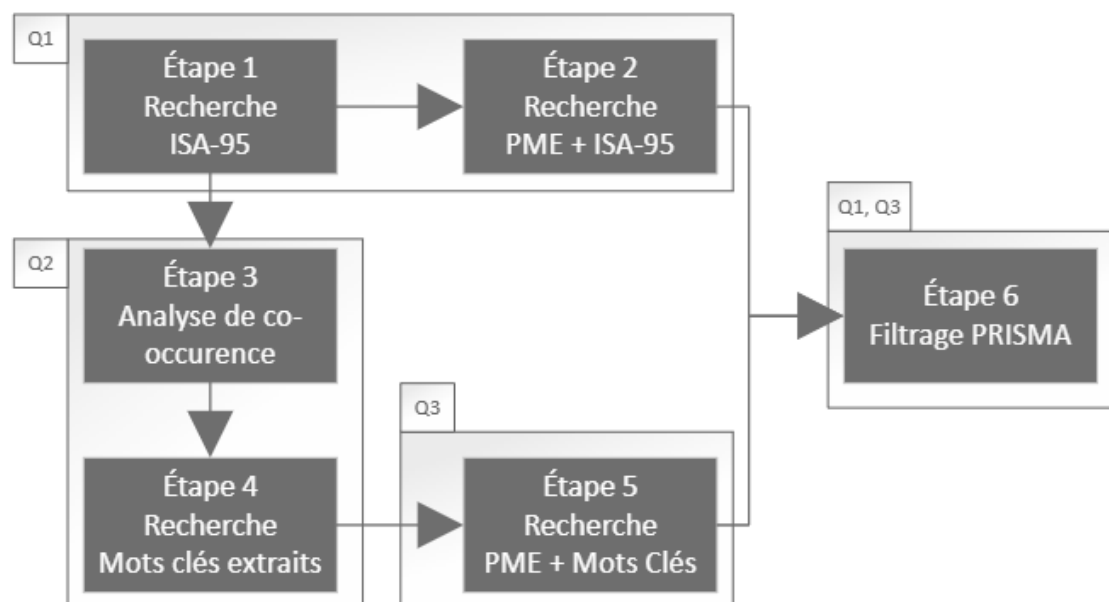
### 3.1. - Méthodologie de l'étude bibliométrique

L'étude bibliométrique utilise plusieurs stratégies d'analyse documentaire pour structurer et systématiser la démarche. Une description globale de la méthodologie est faite en présentant chacune des six étapes de la revue de littérature.

Il est d'abord important de souligner qu'afin de maintenir une cohérence au niveau des métadonnées nécessaires à l'étude bibliométrique, une seule base de données a été employée. L'ensemble des recherches sont effectuées avec la base de données de Scopus (Elsevier 2023). Scopus offre une couverture large de la littérature dans les domaines des sciences informatiques, des sciences de l'administration et de l'ingénierie (Elsevier 2022). De plus, Scopus présente plusieurs métadonnées de qualité, dont des champs de mots-clés normalisés. Ces métadonnées sont essentielles pour l'analyse bibliométrique de la troisième étape.

La figure 3.1 présente une vue d'ensemble des étapes de la méthodologie et de la question à laquelle elles répondent parmi les trois premières sous-questions de recherche. La figure montre également les relations entre les étapes, en particulier la manière dont les résultats d'une étape sont utilisés par la suivante. Chacune des étapes décrites ci-dessous fait appel

à différentes techniques classiques d'analyse de la littérature ou à des outils bibliométriques.



**Figure 3.1 - Plan global des étapes de la revue de littérature**

### **3.1.1. - Étape 1 : Recherche d'ISA- 95 et ses dérivés**

Avant de répondre à la première question concernant la relation entre la norme ISA- 95 et les PME, il convient de répondre à la question suivante : existe-t-il de la littérature portant le standard ISA- 95 et ses dérivés? Afin d'inclure le plus grand nombre possible de publications concernant le standard ISA- 95, ses dérivés sont également pris en considération. Le principal dérivé est le standard ISO/IEC 62264. ISO/IEC 62264 est le portage d'ISA- 95 en tant que standard international (International Society of Automation (ISA) 2013a). Le Business To Manufacturing Markup Language (B2MML) de la Manufacturing Enterprise Solutions Association (MESA) est aussi pris en considération. Le B2MML est la matérialisation du modèle de données d'ISA- 95. Il inclut aussi le BatchML, qui est lui-même la matérialisation du modèle de données d'ISA-88 (Manufacturing Enterprise Solutions Association (MESA) 2020; International Society of Automation (ISA) 2010b). Par ailleurs, la norme ISA- 95 est parfois désignée par le comité qui en est responsable, le comité SP95. La chaîne utilisée est donc la suivante :

*TITLE-ABS-KEY ( b2mml OR ( "Business" AND "Manufacturing Markup Language" ) OR ( "isa 95" ) OR ( ISA- 95 ) OR ( "enterprise-control system integration" ) OR ( isa AND sp95 ) OR ( isa95 ) OR ( 62264 ) )*

Cette chaîne est utilisée à l'étape suivante, ainsi que pour l'analyse de co-occurrence de l'étape 3.

### **3.1.2. - Étape 2 : Recherche de PME parmi la littérature sur ISA- 95**

En utilisant la littérature d'ISA- 95 trouvée à l'étape précédente, il est possible de répondre à la première question de recherche : est-ce que la solution proposée par ISA- 95, ou ses dérivés, a été validée par la littérature dans un contexte de PME? Pour assurer une couverture maximale, un ensemble de synonymes représentant les PME est utilisé. La chaîne utilisée pour la recherche de PME est donc la suivante :

*TITLE-ABS-KEY ( sme OR "Small and medium-sized enterprises" OR "small sized companies" OR smes OR "small-sized companies" OR "Small and medium sized enterprises" OR msme OR "micro, small and medium enterprises" OR "Micro, small and medium-sized enterprises" OR msmes OR "Micro, small and medium sized enterprises" )*

Tout d'abord, la chaîne de requête pour la recherche de PME est exécutée seule, afin de valider l'existence de la littérature sur les PME dans la base de données Scopus. Ensuite, elle est combinée avec la chaîne de l'étape 1. Cette chaîne combinée fournit les publications traitant des PME parmi la littérature ISA- 95. Les résultats sont réservés pour le filtrage à l'étape 6. Voici le résultat de la chaîne combinée :

*(TITLE-ABS-KEY ( sme OR "Small and medium-sized enterprises" OR "small sized companies" OR smes OR "small-sized companies" OR "Small and medium sized enterprises" OR msme OR "micro, small and medium enterprises" OR "Micro, small and medium-sized enterprises" OR msmes OR "Micro, small and medium sized enterprises" )) AND (TITLE-ABS-KEY(b2mml OR ( "Business" AND "Manufacturing Markup Language" ) OR*

*( "isa 95" ) OR ( ISA- 95 ) OR ( "enterprise-control system integration" ) OR  
( isa AND sp95 ) OR ( isa95 ) OR ( 62264 )))*

### ***3.1.3. - Étape 3 : Analyse bibliométrique de co-occurrence des mots-clés dans la littérature sur ISA- 95***

Afin d'effectuer une analyse plus large des alternatives à ISA- 95 et de leur expérimentation en contexte de PME dans la littérature, une analyse de co-occurrence des mots-clés est réalisée. Cette étape est préliminaire pour répondre à la question s'il existe des solutions alternatives à la proposition d'ISA- 95.

L'analyse de co-occurrence des mots-clés permet d'identifier les concepts les plus fréquents parmi les résultats de l'étape 1. L'analyse de co-occurrence des mots-clés est une stratégie bibliométrique employée dans plusieurs études (Donthu et al. 2021; Ferreira et Stéfani 2021; Macaskill et Grobbelaar 2021; Zyoud et al. 2017). Concrètement, l'étape fournit les mots-clés plus fréquemment utilisés en combinaison avec ISA- 95 et ses dérivés.

Pour exécuter l'analyse, les outils Bibliometrix et Biblioshiny ont été exploités (Aria et Cuccurullo 2017). Bibliometrix est une librairie d'analyse bibliométrique pour le langage de programmation R. Biblioshiny quant à lui, est une couche graphique supplémentaire offerte avec la librairie Bibliometrix. Biblioshiny est une application web qui permet d'exploiter de nombreux outils de base de Bibliometrix pour exécuter des analyses bibliométriques.

Un biais possible identifié est qu'il n'y a pas de filtrage effectué sur les résultats de l'étape 1. Toutefois, étant donné que l'analyse de co-occurrence recherche les concepts dominants, et que l'application spécifique du standard ISA- 95 limite les résultats, il est assumé que cela ne devrait pas avoir d'impact significatif sur les mots-clés les plus fréquents. Une autre source d'erreur possible réside dans le fait que le même concept peut être représenté par des mots-clés différents, par exemple pour ERP et Entreprise Ressources Planning. Pour s'assurer de la qualité des résultats, une deuxième analyse est effectuée en utilisant des synonymes pour les mots-clés identiques ou fortement corrélés.

Cette deuxième analyse aura aussi des biais possibles, notamment dans la définition des synonymes. L'opération de définition des synonymes étant faite manuellement, l'erreur humaine est donc possible. Plusieurs éléments concernant la qualité des mots-clés peuvent aussi rendre plus difficile l'analyse des synonymes. Par exemple, il peut être difficile de distinguer une confusion entre des termes ayant une sémantique similaire, mais qui ne sont pas des synonymes. C'est le cas de Manufacturing Executive System au lieu de Manufacturing Execution System qui porte à confusion. En revanche, les termes Manufacturing Process et Manufacturing Process Management ne sont pas nécessairement synonymes.

Les mots-clés identifiés au cours de cette étape sont utilisés comme données initiales dans la recherche d'alternatives au cours de l'étape suivante.

#### ***3.1.4. - Étape 4 : Recherche des alternatives avec les mots-clés identifiés***

Cette étape permet de répondre à la deuxième question : existe-t-il des solutions alternatives à ISA- 95 dans la littérature? Pour ce faire, une ou plusieurs chaînes de recherche sont construites à partir des mots-clés identifiés par l'analyse de co-occurrence. Une ou plusieurs recherches supplémentaires sont effectuées dans Scopus avec les chaînes de requête construites. La ou les chaînes obtenues sont utilisées à l'étape suivante.

#### ***3.1.5. - Étape 5 : Recherche de PME parmi la littérature sur les alternatives à ISA- 95***

Cette étape permet de répondre à la question : est-ce que les alternatives proposées ont été évaluées par la littérature en contexte de PME? La chaîne utilisée pour la recherche de PME est la même que l'étape 2. La chaîne de recherche des PME est combinée avec les chaînes de recherche des alternatives identifiées à l'étape 4. Les résultats sont combinés aux résultats de la deuxième étape pour être filtrés à l'étape suivante.

#### ***3.1.6. - Étape 6 : Filtrage des résultats***

Les résultats des recherches dans le contexte des PME sont combinés, soit les résultats des étapes deux et quatre. Sans faire une revue systématique complète, le flux d'exécution de la méthode Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA) est utilisée afin de filtrer les résultats obtenus (Page et al. 2021). Le filtrage

des publications est effectué à la sixième étape afin de minimiser le nombre de résultats à évaluer. Les publications conservées doivent : 1) avoir moins de 20 ans ; 2) concerner le manufacturier ; 3) être un article de conférences ou de journal, ou être un chapitre de livre. Les publications conservées par le filtrage sont celles qui font l'objet d'une revue approfondie à l'analyse des résultats.

Après avoir atteint les 3 premiers sous-objectifs avec l'étude bibliométrique, l'étape suivante est une étude de cas.

### **3.2. - Méthodologie de l'étude de cas**

L'étude de cas permet d'explorer les solutions offertes aux PME manufacturières dans la mise en place d'une architecture logicielle interconnectée, tout en observant l'intérêt de l'entreprise pour le standard ISA- 95.

La méthodologie employée est celle de la recherche-intervention dans un contexte d'accompagnement en entreprise. La démarche est détaillée, avec une présentation de la recherche-intervention, le contexte d'accompagnement de l'entreprise, la présentation du cas d'accompagnement, la problématique du cas et la démarche de collecte de données.

#### **3.2.1. - Recherche-intervention**

La recherche-intervention est une méthodologie issue de la recherche-action. Dans le cadre de la recherche-action, des actions sont mises en œuvre par les chercheurs, afin de mesurer l'impact des actions proposées. Dans le cas de la recherche-intervention, des interventions sont proposées afin d'influencer la démarche, sans toutefois imposer les actions (Frimousse et Peretti 2020). Dans le contexte où l'intérêt pour le standard ISA- 95 pour la PME manufacturière est à explorer, la stratégie de recherche-intervention se présente comme appropriée.

Dans la présente démarche, un biais positif envers le standard ISA- 95 est introduit par la recherche. Ce biais positif est introduit afin de favoriser l'exploration de l'intérêt de l'entreprise pour la mise en œuvre de la proposition d'ISA- 95. Concrètement, le biais est introduit d'abord par le discours initial du chercheur sur la nécessité de mettre en œuvre

ISA- 95, avec les avantages que la proposition apporte. Ensuite, le biais se matérialise par l'introduction d'éléments lors de la démarche d'accompagnement. Dans le cas présent, une exigence de conformité au standard est introduite lors de la définition des exigences. Un fournisseur qui offre une solution reconnue et conforme à ISA- 95 est aussi ajouté parmi les fournisseurs évalués dans la veille technologique.

### ***3.2.2. - Contexte d'accompagnement***

L'entreprise faisant l'objet de l'expérimentation a initialement contacté le Centre National Intégré du Manufacturier Intelligent (CNIMI) pour un accompagnement pour l'exploitation de leurs données avec des outils d'intelligence d'affaires. Le CNIMI a pour mission d'accompagner les entreprises manufacturières du Québec dans leur transformation numérique. Le CNIMI est issu de la collaboration entre l'Université du Québec à Trois-Rivières (UQTR) et le Collège d'Enseignement Général et Professionnel (CÉGEP) de Drummondville (CNIMI 2025).

Les activités de la présente recherche sont effectuées dans le contexte de la chaire de recherche de l'Usine-Laboratoire d'intelligence Manufacturière (ULIM), de l'UQTR.

### ***3.2.3. - Présentation du cas d'accompagnement***

L'entreprise est une PME (entre 100 et 249 employés) spécialisée dans la transformation de caoutchouc qui prépare des mélanges personnalisés pour répondre à différents besoins. Elle fait partie d'un groupe qui est de propriété familiale. L'entreprise partenaire comporte de 11 à 25 employés. Dans son entièreté, le groupe comprend plus de 1500 employés à travers une douzaine d'unités industrielles, toutes gérées de manière indépendante. Dans le cas de l'entreprise accompagnée, son indépendance implique qu'elle est responsable de gérer les différentes fonctions de l'entreprise manufacturière. Considérant que l'unité cadre dans la définition d'une PME du gouvernement du Canada (Innovation, Sciences et Développement économique Canada (ISDEC) 2023), elle fait objet de l'étude. Une section est ajoutée dans l'analyse des résultats pour valider la correspondance du cas avec les enjeux de la PME manufacturière présentés dans la problématique.

L'objectif initial est d'accompagner l'entreprise dans la valorisation de ses données à travers des outils d'intelligence d'affaires. Pour ce faire, le besoin de rassembler et de collecter les données à travers les multiples logiciels de l'entreprise s'est imposé. Cependant, il a été constaté que l'architecture logicielle était non structurée et non intégrée. L'entreprise a reconnu que leur architecture logicielle rendait difficiles la conciliation et le regroupement des données pour l'analyse, en plus de présenter plusieurs risques d'incohérence de données. L'intégration des systèmes avec une solution d'interconnectivité a été recommandée. La recommandation a été acceptée par l'entreprise.

Une démarche de sélection d'une solution d'interconnectivité a été mise en branle. Ayant connaissance d'une démarche similaire du côté de l'entreprise partenaire, l'entreprise a souhaité y inclure une représentante. La représentante de l'entreprise partenaire a accepté de faire la démarche, en soulignant qu'elle tiendrait un rôle d'observatrice. L'entreprise partenaire veut maintenir l'indépendance des filiales, et il a été convenu que la décision de la filiale peut diverger.

L'entreprise a accepté de faire l'objet d'une recherche-intervention à travers l'accompagnement. Elle s'attend à une évaluation objective des solutions, ainsi que des recommandations neutres. La méthodologie de recherche-intervention cadre bien avec leurs attentes envers l'accompagnement. De plus, l'idée de pouvoir participer à une démarche d'évolution de la recherche cadre dans leurs valeurs.

#### ***3.2.4. - Considérations éthiques***

La démarche d'étude de cas concerne les solutions technologiques. Il n'y a pas de données collectées sur des individus. En aucun temps, les individus ne sont sujets de la présente démarche. Dans ce contexte, une demande de certification au comité d'éthique de la recherche (CER) n'est pas nécessaire.

#### ***3.2.5. - Problématique du cas d'accompagnement***

D'emblée, l'entreprise accompagnée admet avoir un environnement informationnel hétérogène et mal organisé. Il y a présence de plusieurs méthodes de connexion entre les

systèmes. Il y a reconnaissance de la part de l'entreprise de plusieurs cas de double saisie et de duplication de données. Plusieurs systèmes contiennent et maintiennent à jour la même information, sans une interopérabilité structurée et validée. De plus, plusieurs systèmes fonctionnent en silo avec aucune interconnexion avec les autres systèmes.

Cet environnement correspond au contexte de la problématique, telle que présentée au début du présent mémoire. Soit que les PME manufacturières sont prises avec des architectures informationnelles dépareillées, hétérogènes et mal organisées, avec présence de systèmes désuets, des interfaces d'intégration pas uniformes, des systèmes qui opèrent en silo, sans vision globale, une faible interopérabilité des systèmes et un manque d'utilisation de la standardisation. (Horváth et Szabó 2019; Müller et Voigt 2018).

Le lien avec la problématique du présent mémoire posé, la section suivante porte sur la collecte de données durant l'accompagnement.

### ***3.2.6. - Collecte de données***

La démarche employée est celle de l'accompagnement à la sélection d'outils numériques afin d'observer et accompagner l'entreprise dans sa sélection de solutions d'interconnectivité. Les quatre centres d'expertise industrielle (CEI) du réseau des CEI (RCEI), dont le CNIMI, ont développé une méthode robuste pour aider les entreprises dans le choix de la meilleure solution technologique pour répondre à leurs besoins. Malgré que la méthode du CNIMI n'a pas fait l'objet de publication scientifique ou qu'elle n'est pas basée sur des formalismes, l'outil a été éprouvé dans plusieurs démarches et révisé par de nombreux professionnels. Pour répondre à la problématique du présent mémoire, la standardisation et l'utilisation d'ISA-95 sont proposées parmi les solutions. La démarche se décline en cinq étapes, soit 1) la cartographie des systèmes, ii) la définition des exigences de l'entreprise, iii) la veille technologique, iv) la définition des critères d'évaluation et v) les présentations par les fournisseurs.

#### ***3.2.6.1. Cartographie des systèmes***

La cartographie des systèmes consiste à recenser les logiciels employés au sein de l'entreprise. Cette étape est exécutée au début de l'accompagnement, afin d'explicitier les

enjeux et problématiques présents. Une liste de fonctionnalités basées sur les fonctions de l'entreprise manufacturière est utilisée pour guider la recension des systèmes. La liste des fonctions de l'entreprise et des fonctionnalités est inspirée du PERA.

#### *3.2.6.2. Définition des besoins et des exigences de l'entreprise*

Dans un contexte d'intégration, la cartographie des systèmes est employée dans la définition des besoins et des exigences. La définition des besoins est accomplie en partenariat avec l'entreprise, et permet de prendre en considération le contexte et les contraintes de l'entreprise. Par la suite, les besoins sont traduits en exigences pour la sélection de l'outil d'interconnectivité. Afin d'avoir des exigences conséquentes qui permettent une démarche répétable, les modèles de Rienstra (Rienstra 2024) et de Gartner (Guttridge, Comes et Ray 2023a) sont employés. Les exigences sont sélectionnées en fonction des besoins exprimés par l'entreprise. Dans le but d'influencer la démarche dans le contexte de recherche-intervention, une exigence de conformité au standard ISA- 95 est introduite lors de la définition des exigences. Les exigences servent ensuite de base à l'étape suivante de la veille technologique.

#### *3.2.6.3. Veille technologique*

La veille technologique utilise comme point de départ la définition des exigences de l'entreprise. Au démarrage de la veille technologique, une exploration rapide est faite pour recenser les outils qui sont potentiellement en mesure de répondre aux besoins de l'entreprise. Pour cette étape, des outils de recensement des solutions technologiques sont utilisés. Les outils employés sont les trois sites de référencement Capterra (<https://fr.capterra.ca/>) , G2 (<https://www.g2.com/>) , et Gartner Peer Insights (<https://www.gartner.com/peer-insights/home>) ainsi que le Gartner Magic Quadrant (Guttridge, Comes et Ray 2023b). Dans le but d'influencer la démarche dans le contexte de recherche-intervention, un fournisseur qui offre une solution reconnue et conforme à ISA- 95 est aussi injecté parmi les fournisseurs évalués dans la veille technologique.

Par la suite, une analyse plus approfondie est effectuée pour distinguer les outils les plus intéressants pour le contexte de l'entreprise. La liste des exigences précédemment définie

sert de critères pour évaluer les solutions. L'évaluation des exigences utilise les trois mêmes sites de référencement, en plus de se référer aux sites des fournisseurs.

À la suite de la veille technologique, un premier filtrage est fait en collaboration avec l'entreprise. Le filtrage permet d'identifier une liste de fournisseurs qui sont invités à présenter leur solution dans le but de compléter l'évaluation de leur solution.

#### *3.2.6.4. Présentation des fournisseurs*

Par la suite, les fournisseurs précédemment sélectionnés sont contactés afin de présenter leur solution. Afin de répondre à l'objectif d'observer l'intérêt de la PME manufacturière, il est pertinent d'observer comment l'entreprise va interagir aux présentations des fournisseurs. Et surtout, d'observer vers où l'entreprise dirigera son intérêt lors des présentations.

Dans le contexte de cet accompagnement, l'entreprise a souhaité avoir la responsabilité de contacter les fournisseurs. L'entreprise a choisi de transmettre de manière informelle les exigences utilisées pour l'évaluation. L'intention de l'entreprise à ce stade est d'avoir une présentation générale des outils.

## CHAPITRE 4 - ÉTUDE BIBLIOMÉTRIQUE

Dans cette section, les résultats correspondants à chacune des étapes de l'étude bibliométrique sont présentés. Finalement, une analyse et une discussion des résultats sont présentées, avec les perspectives et les ouvertures apportées.

### 4.1. - Résultats de la revue de littérature

Les résultats de l'exécution de la méthodologie qui a été exécutée le 9 juin 2023 sont présentés pour chacune des étapes. Les publications retenues suite au filtrage de l'étape six sont consignées dans le tableau 7.1 - Matrice d'analyse des publications recensées en annexe.

#### 4.1.1. - Étape 1 : Recherche d'ISA- 95 et ses dérivés

La première étape consiste à rechercher les publications traitant d'ISA- 95 et de ses dérivés. La chaîne initiale est d'abord validée en ajoutant un à un les mots clés. Les nombres de résultats par mots clés sont consignés dans le tableau 4.1. Au final, la portion "isa 95" est retirée, puisqu'elle n'ajoute pas de résultats. La version finale de la chaîne de recherche est présentée à la suite du tableau.

*Tableau 4.1 Nombre de résultats de la recherche ISA-95 par ajout de mots clés*

Mots clés	Résultats	Nouveaux
Isa-95	212	212
"isa 95"	212	0
isa AND sp95	221	9
Isa95	260	39
62264	310	50
"enterprise-control system integration"	323	13
B2mml	340	17
"Business" AND "Manufacturing Markup Language"	341	1

*TITLE-ABS-KEY ( ( isa-95 ) OR ( isa AND sp95 ) OR ( isa95 ) OR ( 62264 ) OR ( "enterprise-control system integration" ) OR b2mml OR ( "Business" AND "Manufacturing Markup Language" ) )*

La recherche a fourni un total de 341 résultats sur Scopus. La présence de littérature peut être considérée comme soutenue depuis 2005. Comme le montre le tableau 4.2 , à l'exception des années 2009 et 2010, le rythme d'au moins 12 publications par année est demeuré soutenu après 2005. Les publications retrouvées par cette recherche servent de base pour l'étape suivante, ainsi que pour l'analyse de co-occurrence des mots-clés.

**Tableau 4.2 - Nombre de publications par année portant sur ISA- 95 depuis 1995**

Année	1995	1998	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Publications	3	1	1	1	4	3	3	15	17	16	12	9	6
Année	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Publications	14	15	20	16	18	30	27	18	23	20	16	23	10

#### **4.1.2. - Étape 2 Recherche de PME parmi la littérature sur ISA- 95**

La deuxième étape extrait les résultats concernant les PME parmi les publications traitant d'ISA- 95 et de ses dérivés. Pour fin de validation, des recherches sont d'abord lancées avec la chaîne de recherche pour les PME, en ajoutant un à un les mots-clés. Les nombres de résultats par mots clés sont consignés dans le tableau 4.3. Les trois chaînes de mots clés qui n'ajoutent pas de nouveaux résultats sont retirées et la version finale de la chaîne de recherche est présentée à la suite du tableau. La recherche finale dans Scopus pour les PME fournit 60 876 publications.

**Tableau 4.3 - Nombre de résultats de la recherche PME par ajout de mots clés**

<b>Mots clés</b>	<b>Résultats</b>	<b>Nouveaux</b>
<b>sme</b>	25 088	25 088
<b>smes</b>	53 261	28173
<b>msme</b>	54 157	896
<b>msmes</b>	55 064	107
<b>"Small and medium-sized enterprises"</b>	60 615	5 551
<b>"small sized companies"</b>	60 736	121
<b>"Small and medium sized enterprises"</b>	60 736	0
<b>"micro, small and medium enterprises"</b>	60 876	140
<b>"micro, small and medium-sized enterprises"</b>	60 876	0
<b>"micro, small and medium sized enterprises"</b>	60 876	0

*TITLE-ABS-KEY ( sme OR smes OR msme OR msmes OR "Small and medium-sized enterprises" OR "small sized companies" OR "micro, small and medium enterprises")*

En combinant les deux recherches, la chaîne de recherche ci-dessous est obtenue.

*(TITLE-ABS-KEY ( ( isa-95 ) OR ( isa AND sp95 ) OR ( isa95 ) OR ( 62264 ) OR ( "enterprise-control system integration" ) OR b2mml OR ( "Business" AND "Manufacturing Markup Language" ) ) )*  
*AND*

*(TITLE-ABS-KEY ( sme OR smes OR msme OR msmes OR "Small and medium-sized enterprises" OR "small sized companies" OR "micro, small and medium enterprises"))*

À partir de la chaîne unifiant les recherches sur ISA-95 et les PME, **six publications sont obtenues**. Ces six publications sont incluses dans le filtrage à l'étape 6. Elles sont

également identifiées dans la matrice d'analyse des résultats comme provenant de la requête combinée d'ISA- 95 et PME.

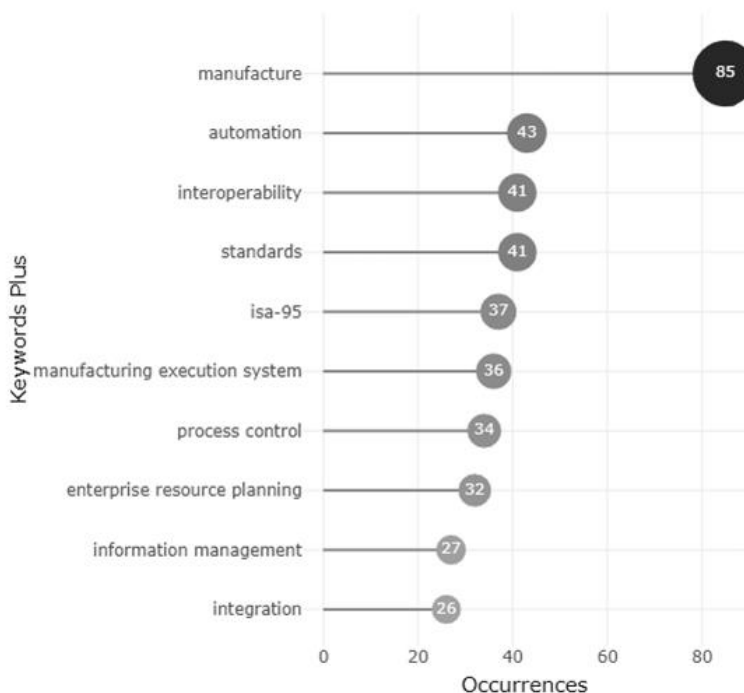
#### ***4.1.3. - Étape 3 Analyse bibliométrique de co-occurrence dans la littérature sur ISA- 95***

Une analyse de co-occurrence est réalisée avec Bibliometrix et Biblioshiny. D'abord, la qualité des métadonnées a été évaluée. Les résultats de l'analyse de la qualité des métadonnées sont présentés dans la figure 4.1. Les métadonnées intéressantes pour l'analyse de co-occurrence sont les champs « Keywords Plus » (ID) et « Keywords » (DE) (Aria 2021). Dans le contexte de Scopus, le champ ID correspond aux mots-clés indexés par Scopus, tandis que le champ DE correspond aux mots-clés de l'auteur (Aria 2021; Elsevier 2020). Pour l'analyse de co-occurrence, le champ « ID » est utilisé. Le pourcentage de valeur manquante pour ce champ est plus faible que le champ DE (21.11 % contre 29.62 %). De plus, comme les mots-clés sont indexés par Scopus, la cohérence des mots-clés est plus grande. Pour l'analyse de co-occurrence, en excluant les 72 publications dont les données sont manquantes dans le champ « Keywords Plus », 269 publications sur les 341 sont utilisées.

Metadata	Description	Missing Counts	Missing %	Status
AB	Abstract	0	0.00	Excellent
AU	Author	0	0.00	Excellent
DT	Document Type	0	0.00	Excellent
LA	Language	0	0.00	Excellent
PY	Publication Year	0	0.00	Excellent
TI	Title	0	0.00	Excellent
TC	Total Citation	0	0.00	Excellent
SO	Journal	2	0.59	Good
C1	Affiliation	19	5.57	Good
CR	Cited References	69	20.23	Poor
ID	Keywords Plus	72	21.11	Poor
DE	Keywords	101	29.62	Poor
DI	DOI	112	32.84	Poor
RP	Corresponding Author	118	34.60	Poor
NR	Number of Cited References	341	100.00	Completely missing
WC	Science Categories	341	100.00	Completely missing

**Figure 4.1 - Analyse de la qualité des métadonnées**

Parmi les 269 publications, le mot-clé le plus fréquemment utilisé est *Manufacture*, avec 85 occurrences. Ces publications sont donc très bien positionnées dans le secteur manufacturier. Cela correspond d'ailleurs à la cible du standard ISA- 95. Par la suite, les mots-clés *Automation*, *Interoperability* et *Standards* se succèdent, avec respectivement 43, 41 et 41 occurrences. Ces mots-clés sont encore plus présents que le mot-clé initial de la recherche, soit ISA- 95, qui compte 37 occurrences. Cela peut s'expliquer par le fait que l'analyse des cooccurrences a été effectuée sur les mots-clés, alors que la recherche à la première étape a été effectuée sur le titre, les mots-clés et le résumé avec le code de champ "TITLE-ABS-KEY" de Scopus. D'un point de vue sémantique, ces trois mots-clés représentent bien l'objet d'ISA- 95. La fréquence des mots-clés obtenus par l'analyse de cooccurrence est présentée dans la figure 4.2.



**Figure 4.2 - Nombre d'occurrences des mots-clés dans la littérature sur ISA- 95**

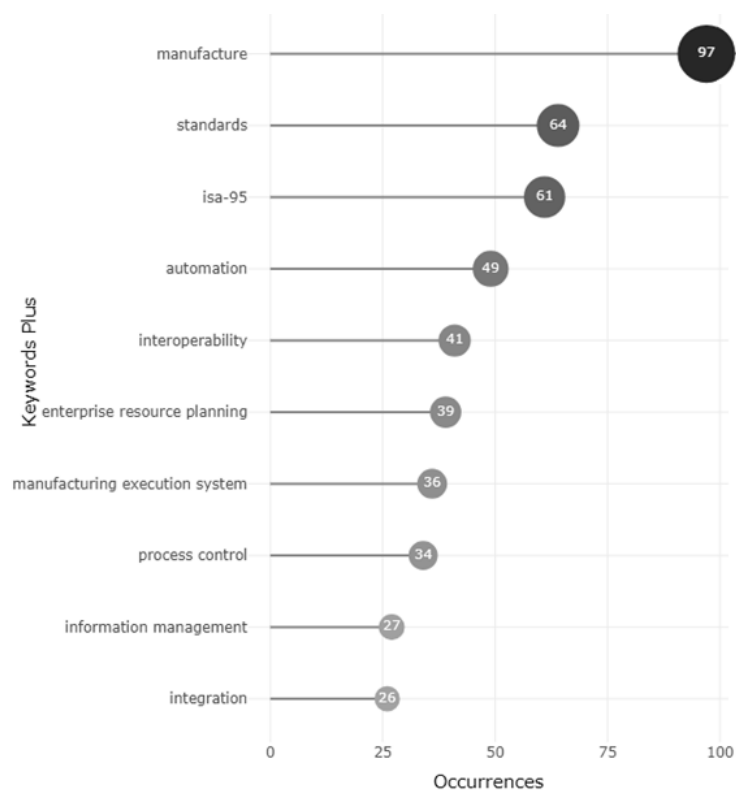
L'analyse bibliométrique présente quelques faiblesses. Elle exclut d'emblée 21 % des publications. Il serait difficile de combiner les deux champs de mots-clés, puisque l'un est normalisé par Scopus, et l'autre ne l'est pas. Il est également possible que cela n'augmente pas la couverture. Parmi les 72 publications pour lesquelles il manquait des données dans le champ « Keywords Plus », 38 manquaient également de données dans le champ « Keywords ». Par conséquent, ces 38 publications n'auraient pas pu être utilisées dans une analyse de cooccurrence de mots-clés. Parmi les 72 exclus, il y a certainement des publications pertinentes. Une revue rapide de ces 72 publications révèle que plusieurs publications semblent être d'actualité, récentes et pertinentes. Ces publications méritent d'être évaluées dans une revue de littérature plus large. Mais l'objectif de cette étape est de faire ressortir les mots-clés et les concepts les plus fréquents. D'autant plus que si ces publications entraînent dans la portée de la présente recherche, elles seraient ressorties dans la combinaison ISA- 95 + PME.

Une deuxième analyse est effectuée en spécifiant des synonymes pour certains mots-clés. La liste des mots-clés qui sont présents cinq fois ou plus a été extraite. Cela a fourni 129 mots-clés. Une révision manuelle des mots-clés est effectuée pour identifier les synonymes. Cela a fourni les synonymes présentés dans le tableau 4.4.

*Tableau 4.4 - Synonymes utilisés pour la deuxième analyse de co-occurrence*

Mots-clés	Synonymes
automation	industrial automation
cyber physical system	cyber-physical systems (cps)
enterprise resource planning	enterprise resource planning (erp)
ISA- 95	isa 95, isa95, iec 62264
manufacture	manufacturing enterprise
manufacturing execution system	mes
standards	industrial standards, industry standards, international standards

L'exécution de l'analyse de co-occurrence en tenant compte des synonymes a permis d'obtenir les mots-clés présentés dans la figure 4.3. Il est possible de constater que les cinq mots-clés les plus présents sont encore les mêmes. Cela appuie la première analyse de cooccurrence et renforce ces mots-clés en tant que concepts dominants dans le corpus formé à l'étape 1.



**Figure 4.3 - Nombre d'occurrences des mots-clés dans la 2e analyse de co-occurrence**

Donc, les mots-clés identifiés par l'analyse de co-occurrence sont **Manufacture**, **Automation**, **Interoperability** et **Standards**. Ils servent de points de départ pour la recherche des alternatives.

#### **4.1.4. - Étape 4 Recherche des alternatives avec les mots-clés identifiés**

En partant des quatre mots-clés obtenus de l'analyse de co-occurrence, il est possible d'effectuer une réflexion sémantique. Ce qui est recherché, ce sont des alternatives à ISA- 95. ISA- 95 est un standard qui fournit une solution pour interconnecter différents systèmes. Autrement dit, il faut chercher d'autres standards qui offrent le même type de solution pour connaître les alternatives.

Le mot-clé **Manufacture** permet de limiter le secteur d'activité de la recherche, pour se concentrer sur le manufacturier. Le mot-clé **Standard** permet de se concentrer sur les standards. De leur côté, les concepts **Interoperability** et **Automation** concernent plus

l'objet d'un standard. Dans ce cas, il s'agit soit de l'interopérabilité, soit de l'automatisation. Il est donc pertinent de jumeler « Manufacture » et « Standard » pour obtenir les standards applicables au manufacturier. Il faut ensuite ajouter l'objet du standard, soit l'interopérabilité ou l'automatisation. Ceci amène à proposer deux recherches. La recherche des standards du manufacturier pour l'interopérabilité (*Standards + Manufacture + Interoperability*), puis des standards du manufacturier pour l'automatisation (*Standards + Manufacture + Automation*). Formellement, les deux chaînes utilisées dans Scopus sont présentées ci-dessous. Les mots-clés ont été laissés tels quels, considérant qu'ils proviennent de la recherche bibliométrique, et qu'ils sont normalisés par Scopus.

*TITLE-ABS-KEY ( manufacture AND interoperability AND standards )*

*TITLE-ABS-KEY ( manufacture AND automation AND standards )*

L'exécution des deux recherches a fourni 410 résultats pour l'interopérabilité ainsi que 1479 résultats pour l'automatisation. Ces deux ensembles servent de base pour l'étape suivante.

#### **4.1.5. - Étape 5 Recherche de PME parmi la littérature sur les alternatives à ISA- 95**

La cinquième étape permet de retracer les résultats concernant les PME parmi les publications traitant des alternatives à ISA- 95. La chaîne de recherche sur la PME est combinée aux deux chaînes de recherches des alternatives. Les deux chaînes obtenues sont les suivantes :

- (*TITLE-ABS-KEY ( manufacture AND interoperability AND standards ) ) AND ( TITLE-ABS-KEY ( sme OR "Small and medium-sized enterprises" OR "small sized companies" OR smes OR "small-sized companies" OR "Small and medium sized enterprises" OR msme OR "micro, small and medium enterprises" OR "Micro, small and medium-sized enterprises" OR msmes OR "Micro, small and medium sized enterprises" ) )*)

- ( *TITLE-ABS-KEY (manufacture AND automation AND standards ) ) AND ( TITLE-ABS-KEY (sme OR "Small and medium-sized enterprises" OR "small sized companies" OR smes OR "small-sized companies" OR "Small and medium sized enterprises" OR msme OR "micro, small and medium enterprises" OR "Micro, small and medium-sized enterprises" OR msmes OR "Micro, small and medium sized enterprises" ) )*

L'exécution des deux recherches fournit 13 résultats pour l'interopérabilité ainsi que sept résultats pour l'automatisation. Les publications trouvées sont incluses dans le filtrage PRISMA à l'étape 6. Elles sont également identifiées dans la matrice d'analyse des résultats comme provenant de la recherche sur l'interopérabilité ou l'automatisation

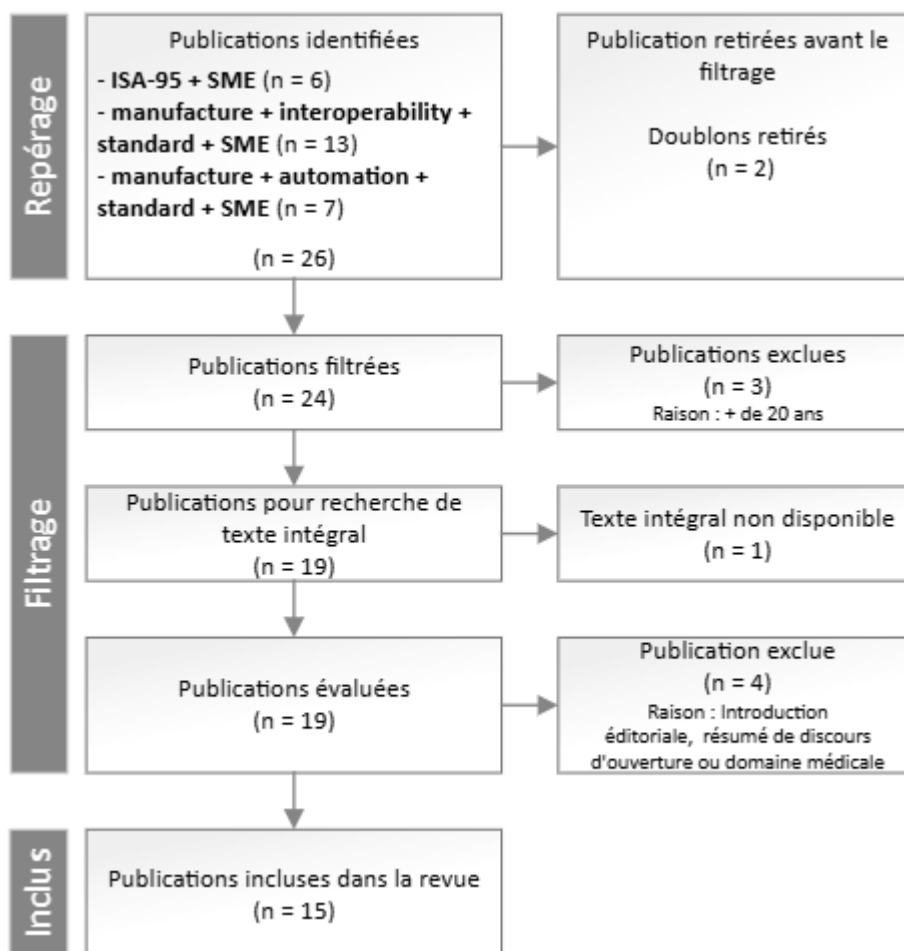
#### **4.1.6. - Étape 6 Filtrage des résultats**

Comme entrant à la démarche de filtrage inspirée de la méthode PRISMA, les résultats des étapes deux et cinq sont utilisés. Les trois combinaisons évaluées sont les suivantes :

- Étape 2 : (ISA- 95 | ISO/IEC 62264 | B2MML) + SME
- Étape 5: manufacture + interoperability + standards + SME
- Étape 5: manufacture + automation + standards + SME

Au total, 26 publications ont été trouvées. Parmi ces 26 publications, deux publications étaient en doublons, et ont donc été retirées. Au total, ce sont 24 publications qui ont passé au filtrage. Sur 24 publications, quatre publications ont été retirées, car elles sont anciennes de plus de 20 ans. Suite à la recension des textes intégraux, une publication supplémentaire a dû être retirée. Il a été impossible d'obtenir le texte complet malgré une recherche dans d'autres bases de données, notamment Google Scholar, IEEE Explore et plusieurs autres bases de données fournies par EBSCO. Puis, lors de l'évaluation des sommaires des publications, quatre autres publications ont été retirées. Deux de ces publications concernent spécifiquement le domaine médical, et non pas le manufacturier. Les deux autres constituent respectivement l'introduction éditoriale d'un numéro de revue et le résumé d'un discours d'introduction à une conférence. La démarche est résumée dans

la figure 4.4. En résultat de cette démarche, 15 publications sont donc conservées pour l'analyse des résultats.



*Figure 4.4 – Filtrage inspirée de PRISMA des publications recensées*

#### 4.2. - Analyse des résultats et constats

Les 15 publications conservées suite au filtrage sont regroupées dans le tableau 7.1 - Matrice d'analyse des publications recensées incluses en annexe. Chacune des publications est identifiée par leurs auteurs, leur requête d'origine et leur titre. Un résumé de la proposition est fourni pour chaque publication. Pour mettre en lumière la relation des publications avec ISA- 95 et la standardisation, une colonne inclut une analyse pour positionner les publications par rapport à l'utilisation de l'ISA- 95 et/ou des standards du

manufacturier. Une dernière colonne présente la façon dont la publication a pris en considération la PME.

La matrice des publications est utilisée pour l'analyse de la revue de la littérature par rapport à chacun des trois premiers sous-objectifs, ainsi que pour confirmer ou infirmer chacune des trois premières hypothèses.

Pour les besoins de l'analyse, il est pertinent de considérer la portée de la proposition d'ISA- 95, afin de comparer les publications par rapport à cette portée. Pour rappel, la portée de la proposition d'ISA- 95 concerne les systèmes logiciels qui fournissent des fonctionnalités de gestion des opérations de production, d'inventaire, de qualité et de maintenance (International Society of Automation (ISA) 2010a).

Voici un rappel des questions de recherche liées à la revue de la littérature et de leur sous-objectif associé. La première question est « est-ce que la solution proposée par ISA- 95, ou ses dérivés, a été validée par la littérature dans un contexte de PME? » Et le sous-objectif pour y répondre est de déterminer si ISA- 95 a été évaluée en contexte de PME en examinant la présence de la combinaison ISA- 95 et PME dans la littérature (SO1). La deuxième question est la suivante : « Existe-t-il des solutions alternatives à ISA- 95 dans la littérature? » Le sous-objectif pour y répondre est d'identifier les alternatives et les concepts associés à ISA- 95 (SO2). La troisième question est la suivante : « est-ce que les alternatives proposées ont été évaluées par la littérature en contexte de PME? » Le sous-objectif pour y répondre est de déterminer si des alternatives à ISA- 95 ont été évaluées en contexte de PME par une recension dans la littérature de la combinaison entre la PME avec les alternatives à ISA- 95 (SO3).

Le premier sous-objectif est de déterminer si ISA- 95 a été évaluée en contexte de PME en examinant la présence de la combinaison ISA- 95 et PME dans la littérature (SO1). Et ce dans le but de confirmer ou d'infirmer l'hypothèse que la proposition d'ISA- 95 a peu ou pas été évaluée par la littérature dans le contexte de la PME. Les résultats de la première étape ont permis de recenser six publications qui discutent à la fois d'ISA- 95 et des PME. Ces publications ont toutes été retenues pour l'analyse. Parmi celles-ci, seulement une

publication considérait la proposition entière d'ISA- 95 (Li, Mantravadi et Moller 2020). Les cinq autres publications utilisent ISA- 95 pour positionner et/ou décrire leur solution (Chohan, Xu et Lu 2022; Lazaro et al. 2019; Martell et al. 2023; Molina et al. 2017; Qureshi et al. 2017). À noter que parmi les publications recensées lors de la cinquième étape, la proposition de Ferreira de 2013 a utilisé une partie du modèle de données ISA- 95 comme base pour définir un schéma directeur pour les produits et les fournisseurs (Ferreira et al. 2013). Toutefois, ce modèle a été utilisé dans le cadre de la fonction commerciale de définition des produits, qui n'entre pas dans la portée de la norme ISA- 95 (International Society of Automation (ISA) 2010a). Ceci permet de confirmer l'hypothèse et de faire un premier constat, soit qu'**il semble y avoir peu d'évaluation de la mise en œuvre du modèle de données et de l'architecture logicielle d'ISA- 95 dans les PME manufacturières, et ce malgré un rythme soutenu de publication depuis 2005.**

Le deuxième sous-objectif est d'identifier les alternatives et les concepts associés à ISA- 95 (SO2). L'hypothèse est qu'il existe des alternatives, ou du moins des solutions complémentaires. À l'aide de l'analyse bibliométrique de co-occurrence des mots-clés, quatre mots-clés ont été identifiés et sélectionnés. Il s'agit des mots-clés *Manufacture*, *Interoperability*, *Standards* et *Automation*. Les quatre mots-clés ont été interprétés pour former deux combinaisons logiques, soit *Manufacture + Interoperability + Standards* et *Manufacture + Automation + Standards*. Le recensement dans la littérature de ces deux chaînes a permis de lister 410 résultats pour *Interoperability* et 1479 pour *Automation*. Il apparaît qu'**il existe non seulement des alternatives ou des solutions complémentaires, mais aussi de la recherche active à leur sujet.** L'examen de ces alternatives pourrait faire l'objet d'une tout autre recherche, offrant une vision plus large des solutions d'interconnectivité.

Le troisième sous-objectif est de déterminer si des alternatives à ISA- 95 ont été évaluées en contexte de PME par une recension dans la littérature de la combinaison entre la PME avec les alternatives à ISA- 95 (SO3). Après exécution de la méthodologie incluant le filtrage, 10 publications distinctes ont été évaluées. Parmi ces publications, six utilisent la

normalisation ou offrent une proposition dans un contexte d'interconnectivité. Cependant, aucune de ces six publications n'entre dans la portée d'ISA- 95 (Agostinho et al. 2009; Ferreira et al. 2013; Jardim-Gonçalves et al. 2013; Mourad et al. 2017; Mourad et al. 2020; Park, Woo et Choi 2020). La publication de Ferreira en 2018 examine la rentabilité de l'exploitation d'un système cyber-physique pour les PME (Ferreira et al. 2018). Deux publications utilisent la proposition d'ISA- 95, à savoir Ferreira en 2013 et Li en 2020 (Ferreira et al. 2013; Li, Mantravadi et Moller 2020). Il convient de noter que la publication de Li est déjà incluse dans la combinaison ISA- 95 + PME. Cinq publications utilisent la standardisation pour des objectifs similaires, mais pas dans la même portée (Agostinho et al. 2009; Ferreira et al. 2013; Jardim-Gonçalves et al. 2013; Mourad et al. 2017; Mourad et al. 2020; Park, Woo et Choi 2020). Une publication utilise ISA- 95 uniquement pour expliquer et positionner leur proposition (Ding et Fan 2022). Aucune d'entre elles ne couvre une portion de la portée d'ISA- 95.

Cela permet d'abord de poser un troisième constat qui confirme l'hypothèse initiale, soit **qu'il semble y avoir peu d'évaluation de la mise en œuvre d'alternative à ISA- 95 dans les PME manufacturières**. Comme 4<sup>e</sup> constat, il est aussi possible de remarquer que parmi les alternatives évaluées en PME, **il y a peu d'évaluation de solution qui couvre la même portée qu'ISA- 95**.

Malgré que les alternatives évaluées en PME ne couvrent pas la même portée qu'ISA- 95, cinq des alternatives recensées emploient soit la normalisation ou offrent une proposition dans un contexte d'interconnectivité. Cela permet d'affirmer comme 5<sup>e</sup> constat **qu'il existe des expérimentations en PME pour des standards complémentaires ou qui couvrent d'autres portées**.

L'objectif de la revue de littérature était de recenser la présence dans la littérature scientifique de la mise en œuvre du standard ISA- 95, ou de ses alternatives, chez les PME manufacturières. Force est de constater que la mise en œuvre du standard ISA- 95 ou de potentielles alternatives semblent très peu présentes dans la littérature. La prochaine section discute de l'implication de ces résultats.

### **4.3. - Conclusion de la revue de littérature**

La revue de littérature a comme objectif de recenser la présence dans la littérature scientifique de la mise en œuvre du standard ISA- 95, ou de ses alternatives, chez les PME manufacturières. Cette revue a mené à cinq constats, soit :

1. Il y a peu d'évaluation du modèle de données et de l'architecture logicielle d'ISA- 95 chez les PME manufacturières malgré un rythme soutenu de publications au sujet d'ISA- 95 depuis 2005 ;
2. Il existe des alternatives à ISA- 95, et de la recherche à leur sujet;
3. Il y a peu d'évaluation des alternatives à ISA- 95 dans les PME manufacturières;
4. Il y a peu d'évaluation d'alternatives avec la même portée qu'ISA- 95 dans les PME manufacturières;
5. Il existe des expérimentations en PME pour des standards complémentaires ou qui couvrent d'autres portées.

Cela amène à soulever qu'il devrait y avoir plus de recherche sur l'utilisation d'ISA- 95, ses dérivés ou ses alternatives chez les PME manufacturières. Cela afin de déterminer dans quelle mesure la proposition d'ISA- 95 est adaptée ou non pour la PME. Éventuellement, si ce n'est pas le cas, il faudrait déterminer ce qui fait en sorte que la solution n'est pas adaptée à la PME. Afin de potentiellement fournir des recommandations à savoir si ISA- 95 devrait être adaptée pour la PME. Ultimement, cela pourrait mener la littérature à déterminer si ISA- 95 devrait être adoptée par la PME, ou simplement si la PME devrait se tourner vers des alternatives. Mais avant de se lancer dans une telle démarche, il faut se questionner sur l'intérêt que pourraient avoir les PME manufacturières à exploiter la solution d'ISA- 95.

La méthodologie a permis de soulever quand même quelques lacunes sur l'analyse bibliométrique de co-occurrence. Pour améliorer éventuellement la qualité des analyses bibliométriques utilisant les métadonnées, et aussi de la recherche classique dans les bases de données, il serait intéressant de favoriser le déploiement systématique de mots-clés normalisés dans les publications. Il serait aussi intéressant d'encourager la normalisation

des mots-clés sémantiquement corrélés (*Interconnectivity / interconnection*), ou synonymes (ISA- 95, ISA95, ISA 95).

À noter qu'autant dans les revues exploratoires que dans la méthodologie de la présente recherche, rien n'a été trouvé dans la littérature se rapportant à la sixième partie d'ISA- 95. La partie six propose d'utiliser le patron *Publish-Subscribe* comme modèle d'échange de données (*Messaging service*) pour interconnecter plusieurs systèmes. Il serait intéressant de faire une revue sur les modèles d'architecture d'échange de données (*Messaging service*) et les alternatives proposées. Et éventuellement, évaluer leur faisabilité en contexte de PME.

Parmi les 15 publications filtrées, il est possible de constater que six des publications citent ISA- 95 pour positionner leur solution à travers la pyramide de l'automatisation. La pyramide de l'automatisation provient du modèle *Purdue Enterprise Reference Architecture (PERA)*, souvent nommé le modèle *Purdue*. ISA- 95 utilise lui-même le PERA pour positionner sa portée. Il serait intéressant d'effectuer une revue à partir des résultats de la première étape. Pour identifier une potentielle confusion entre la proposition d'ISA- 95 et le PERA. L'hypothèse à valider serait qu'il y a confusion entre le PERA et ISA- 95 dans la littérature, ce qui occulte la proposition complète d'ISA- 95.

À la lumière des constats de la revue de la littérature, la quatrième sous-question demeure en suspens. Soit est-ce qu'il serait d'intérêt pour la PME manufacturière de mettre en œuvre la proposition d'ISA- 95? L'hypothèse amenée ici est qu'il serait intéressant de mettre en œuvre la proposition d'ISA- 95 en considérant le contexte des PME. C'est cette hypothèse que l'étude de cas présenté au chapitre suivant cherche à valider.

## CHAPITRE 5 - ÉTUDE DE CAS

L'étude bibliométrique a permis de constater qu'il y a peu ou pas de littérature sur la mise en œuvre de standard d'interconnectivité tel qu'ISA- 95 chez les PME manufacturières. À cette étape, il est pertinent d'observer l'intérêt pour l'implémentation de la proposition d'ISA- 95 chez les PME manufacturières (SO4).

D'abord, les résultats de la collecte de données sont présentés. Puis, les résultats sont ensuite analysés. Et finalement, une discussion est faite à propos des résultats de l'étude de cas.

### 5.1. - Résultats

#### 5.1.1. - Cartographie des systèmes

Au démarrage de la démarche de sélection d'un outil d'interconnectivité, l'environnement informationnel avait déjà fait l'objet d'un recensement des logiciels et de la modélisation de l'architecture logicielle. Dans le cadre de l'accompagnement, une révision de la liste des logiciels et de la modélisation a été effectuée. Au total, 29 logiciels ont été recensés. Dans la section suivante, l'inventaire des logiciels et la modélisation de l'architecture logicielle sont présentés.

##### 5.1.1.1. Inventaire des logiciels

Les 29 logiciels recensés sont listés et décrits dans le tableau 5. Chacun des logiciels est identifié avec un numéro séquentiel débutant par L. Pour chacun des logiciels, une description sommaire du rôle est présentée. Ensuite, il est indiqué s'il est développé à l'interne dans la colonne *Int.*, s'il est déployé dans le nuage (N) ou sur site (S) dans la colonne *Depl.*, ainsi que son niveau de fonctionnalité dans le modèle PERA dans la colonne *PERA*.

*Tableau 5.1 : Inventaire des logiciels*

<b>Logiciels</b>	<b>Description du rôle</b>	<b>Int.</b>	<b>Depl.</b>	<b>PERA</b>
<b>L1 – Répertoire de données BI</b>	Annuaire de données d'intelligence d'affaires. Il recense les rapports existants et les vues de données disponibles.		N	4
<b>L2 – Visualisation BI</b>	Outil de création et d'affichage de rapport d'intelligence d'affaires. Il exploite les vues de données afin de pouvoir créer des rapports et des tableaux de bord.		N	4
<b>L3 – Répertoire des vues de données</b>	Gestionnaire d'accès aux données. Il permet de recenser des vues de données disponibles provenant de plusieurs applications. Il gère aussi l'extraction de données sur demande.		N	4
<b>L4 – Accès aux équipements EPI</b>	Gestionnaire de distribution des équipements de protection individuelle (EPI). Il permet de gérer les EPI consommés par chaque employé.		N	3

*Tableau 5.1 : Inventaire des logiciels (suite)*

<b>Logiciels</b>	<b>Description du rôle</b>	<b>Int.</b>	<b>Depl.</b>	<b>PERA</b>
<b>L5 – Analyse de risque SST</b>	Outil de gestion et d'analyse de risque d'incident de santé et sécurité au travail (SST).		N	3
<b>L6 – CRM</b>	Outil de gestion de la relation avec les clients (CRM – Client Relation Manager). Il est utilisé entre autres pour le suivi des communications avec les clients, des opportunités d'affaires et des commandes.		N	4
<b>L7 – Plateforme RH – SST</b>	Outil de formation interne pour la santé et la sécurité au travail (SST). Les employés l'utilisent pour suivre différentes formations spécifiques à l'entreprise.		N	3
<b>L8 – Plateforme RH – Dossiers employés</b>	Outil de gestion des dossiers employés. Il permet de faire la gestion de la prospection, la gestion des compétences, le suivi des évaluations et la gestion de la formation. Dans l'entreprise accompagnée, il est en cours d'adoption, et est encore peu utilisé.		N	3
<b>L9 – Portail client</b>	Outil permettant aux clients d'accéder en ligne à plusieurs fonctionnalités. L'outil permet à certains clients de consulter des listes de prix, leur historique de commande, un inventaire de produit disponible, des fiches de sécurité du matériel, etc. L'outil peut aussi servir à la création des commandes.	X	N	4

*Tableau 5.1 : Inventaire des logiciels (suite)*

<b>Logiciels</b>	<b>Description du rôle</b>	<b>Int.</b>	<b>Depl.</b>	<b>PERA</b>
<b>L10 – Test qualité et formulation</b>	Outil qui permet de gérer une liste de recette (formulation) pour les différents mélanges de caoutchouc. Il permet aussi de définir des exigences pour des tests de qualité, et de consigner des résultats de test pour les recettes.		S	3
<b>L11 – ERP</b>	Outil permet la gestion et la planification des ressources de l'entreprise (Enterprise Resources Planning – ERP). Dans le contexte de l'entreprise accompagnée, il est principalement exploité pour gérer les ordres de fabrication, l'horaire de production, la gestion des matières premières et l'inventaire des produits finis.		S	4
<b>L12 – Logistique machine</b>	Logiciel qui permet de faire la planification de la production en fonction des ordres de fabrication, du flux de production et des spécifications des machines. Il est en mesure de définir les besoins de main-d'œuvre selon la planification de la production.	X	S	3

**Tableau 5.1 : Inventaire des logiciels (suite)**

<b>Logiciels</b>	<b>Description du rôle</b>	<b>Int.</b>	<b>Depl.</b>	<b>PERA</b>
<b>L13 – Paie</b>	Logiciel qui permet de gérer le traitement salarial des employés en fonction des temps travaillés par poste. Il permet aussi de gérer les avantages sociaux liés aux vacances, aux banques de temps et aux congés sociaux. Il gère aussi les dépôts et les informations bancaires des employés.		N	4
<b>L14 – Temps et présence</b>	Logiciel qui permet de gérer les horaires en fonction des exigences de la production et des postes des employés. Il maintient la liste des postes, la liste de compétences des employés et la liste d’ancienneté. Il gère l’affichage et l’attribution des heures supplémentaires.		N	3
<b>L15 – Équipement physique</b>	C’est un ensemble de logiciels développés à l’interne pour des équipements physiques. Ceux-ci ont été développés pour intégrer des informations nécessitant des intégrations spécifiques.	X	S	2
<b>L16 – Entrepôt de données</b>	Logiciel d’interconnectivité développé à l’interne. Il tient le rôle de médiateur entre plusieurs logiciels. Il maintient une base de données, qui est mise à jour par plusieurs logiciels. Dans certains cas, l’information à jour est aussi transférée vers d’autres logiciels.	X	S	N/A  Comme il n’a pas de rôle fonctionnel en soi, il ne correspond pas à un niveau de fonctionnalité du PERA.

*Tableau 5.1 : Inventaire des logiciels (suite)*

<b>Logiciels</b>	<b>Description du rôle</b>	<b>Int.</b>	<b>Depl.</b>	<b>PERA</b>
<b>L17 – SCADA</b>	Logiciel de contrôle et d'acquisition de données (SCADA) qui permet d'interconnecter les machines physiques. Il interagit avec les machines en fonction des spécifications de production, des temps de production, de la planification, des ingrédients des recettes en production et de l'état des machines.		S	2 et 3
<b>L18 – Gestion Fiche Données Sécurité Matériel</b>	Logiciel qui permet la gestion et l'impression des fiches de données de sécurité (Material Safety Data Sheet - MSDS) pour les matières dangereuses.	X	S	3
<b>L19 – Gestion matières dangereuses</b>	Logiciel qui permet de faire la gestion des matières dangereuses employées. Il gère la provenance des matières dangereuses, les informations de sécurité des matières dangereuses, l'historique et la traçabilité des achats ainsi que les fournisseurs de matières dangereuses.		N	3
<b>L20 – Module formation</b>	Logiciel qui permet de faire la gestion des qualifications des employés. Il maintient la liste des qualifications par poste, les dates de disqualification et les informations de requalification.		N	3

*Tableau 5.1 : Inventaire des logiciels (suite)*

<b>Logiciels</b>	<b>Description du rôle</b>	<b>Int.</b>	<b>Depl.</b>	<b>PERA</b>
<b>L21 – Spécification RH</b>	Logiciel qui permet de maintenir les informations des employés sur les postes, les compétences, les compétences et l'ancienneté.	X	S	3
<b>L22 – Licence - suite bureautique</b>	Logiciel qui permet la gestion des licences de la suite bureautique sur le nuage. Il est aussi un fournisseur d'authentification unique (Single Sign On – SSO) pour des logiciels dans le nuage.		N	4
<b>L23 – Courriel</b>	Logiciel qui permet aux employés de gérer leur courriel, leur agenda et leurs contacts.		N	4
<b>L24 – Formation Cybersécurité</b>	Logiciel qui fournit une formation en cybersécurité, qui est obligatoire pour tous les employés.		N	3
<b>L25 – Besoin Machine - spécification</b>	Logiciel qui permet de définir les besoins de machines en fonction des recettes produites, des qualifications nécessaires, des compétences requises et du nombre d'employés nécessaires. Il convertit la planification en besoin main-d'œuvre pour manœuvrer les machines de production.	X	S	3

*Tableau 5.1 : Inventaire des logiciels (suite)*

<b>Logiciels</b>	<b>Description du rôle</b>	<b>Int.</b>	<b>Depl.</b>	<b>PERA</b>
<b>L26 – Besoin Machine - Planification</b>	Logiciel qui permet la planification de la main-d'œuvre et les attributions des quarts de travail aux employés en fonction des besoins de main-d'œuvre et des spécifications des ressources humaines	X	S	3
<b>L27 – Gestion des incidents SST</b>	Logiciel qui permet la gestion des incidents et accidents de santé et sécurité au travail (SST).		S	3
<b>L28 – Droit accès / SSO</b>	Logiciel qui maintient des droits d'accès à plusieurs logiciels de l'entreprise. Il est fournisseur d'authentification unique (Single Sign On – SSO) pour des logiciels sur site.		S	4
<b>L29 – Gestion de droit d'accès physique</b>	Logiciel qui permet de faire la gestion des accès physiques au lieu de l'entreprise. Il maintient les droits d'accès des employés, et l'information de leur carte magnétique. Il autorise le déverrouillage des portes selon la carte utilisée et les droits d'accès.		S	4

#### *5.1.1.2. Modélisation de l'architecture logicielle*

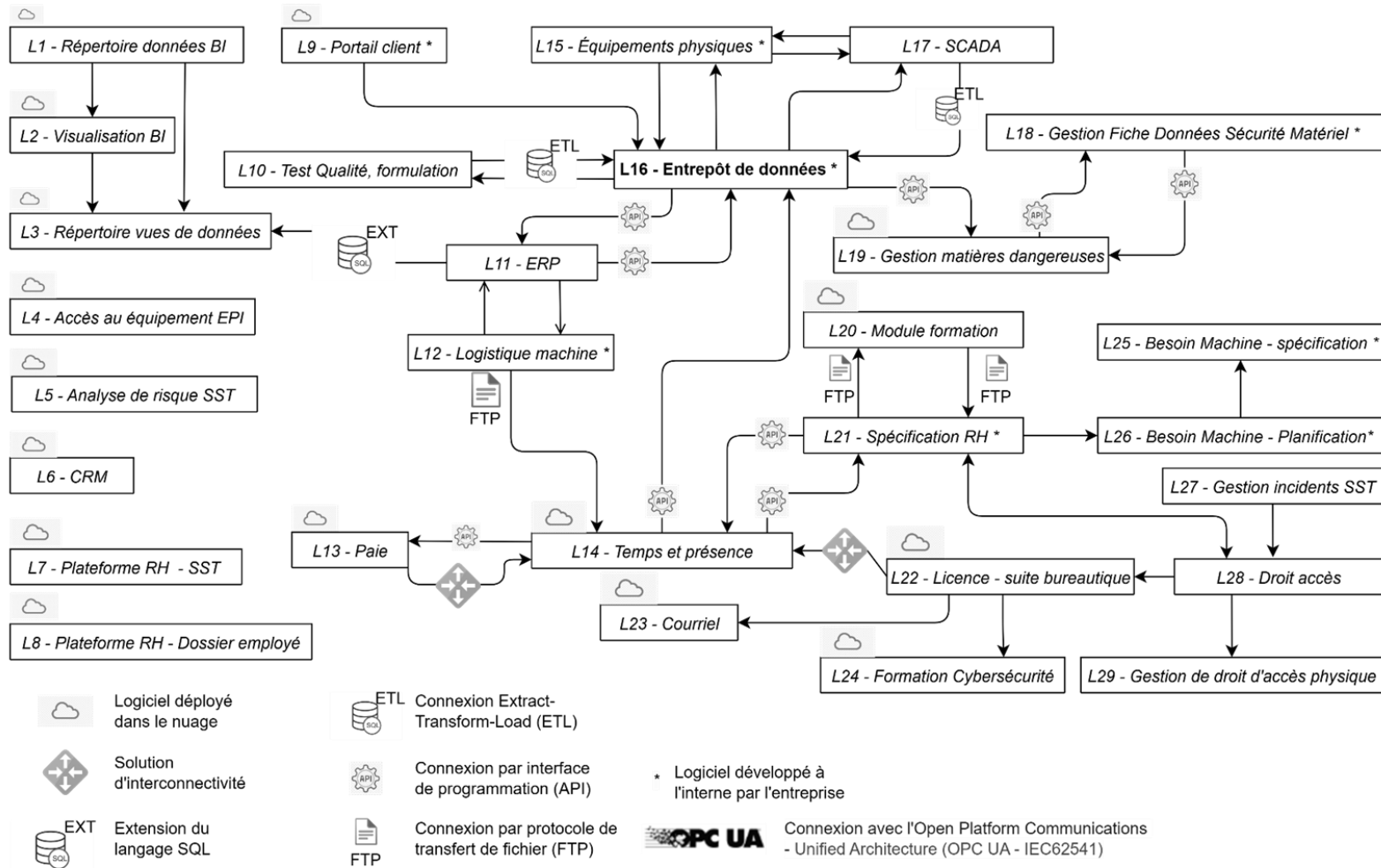
Après avoir produit l'inventaire des logiciels, il est possible de modéliser l'architecture logicielle et de recenser les connexions qu'ont les logiciels entre eux. La figure 5.1 représente la modélisation de l'architecture logicielle de l'environnement de l'entreprise accompagnée.

Il est à noter que pour fin de compréhension, le diagramme de la modélisation se limite à un lien par sens de communication entre deux logiciels. Cependant, plusieurs logiciels ont plusieurs liens de communication différents entre eux.

La modélisation permet d'abord d'identifier l'utilisation de neuf méthodes de connectivité. Les différentes méthodes identifiées pour interconnecter les logiciels dans l'architecture logicielle de l'entreprise sont :

- M1 - Le connecteur propriétaire ou de plateforme. Il s'agit d'outils spécifiques au logiciel ou à la plateforme de développement;
- M2 - La synchronisation de base de données en Extract-Transform-Load (ETL). L'ETL est une méthode de connexion entre deux bases de données, où les données sont passées d'une base à l'autre en trois étapes : l'extraction, la transformation et le chargement;
- M3 - L'exploitation directe de base de données avec le System Query Language (SQL). Il s'agit de connexion entre les bases de données de deux logiciels. Que ce soit par l'utilisation de vues, de procédures stockées ou de sélection directe;
- M4 - La création de vue de données avec un langage propriétaire en extension du Structured Query Language (SQL EXT). Il s'agit d'une extension propriétaire du SQL, spécifique pour un logiciel;
- M5 - L'échange de fichier via File Transfer Protocol (FTP). Il s'agit d'une connexion Web qui permet d'échanger des fichiers;
- M6 - L'utilisation d'une plateforme d'interconnectivité en tant que service (IPaaS – Web). Il s'agit d'un médiateur qui gère les échanges d'information. Dans l'architecture logicielle de l'entreprise, les logiciels y sont connectés avec des API web pour se connecter au médiateur;
- M7 - L'interface de programmation web (Application Programming Interface – API). C'est une interface qui permet à un logiciel tiers d'exécuter un certain nombre d'opérations tel que la sélection, la manipulation de données ou l'exécution de fonction;

- M8 - La communication par l'Open Platform Communications - Unified Architecture (OPC UA). C'est un standard d'échange d'information, utilisé principalement pour interagir avec des actifs physiques tels que de la machinerie;
- M9 - L'exploitation de l'authentification unique (Single Signed On – SSO). C'est une méthode d'authentification qui permet d'accéder à plusieurs applications en s'authentifiant une seule fois.



**Figure 5.1 - Modélisation de l'architecture logicielle de l'entreprise accompagnée**

Les cinq logiciels énumérés ci-dessous ont été identifiés comme fonctionnant en silo, avec aucune interconnexion avec les autres logiciels.

- 1) L4 – Accès aux équipements EPI;
- 2) L5 – Analyse de risque SST;
- 3) L6 – CRM;
- 4) L7 – Plateforme RH – SST;
- 5) L8 – Plateforme RH – Dossiers employés.

Le tableau 5.1 présente les neuf méthodes de connexion. Pour chacune des méthodes, les connexions entre les logiciels qui exploitent cette méthode sont identifiées. Le nombre de connexions par méthode est aussi inclus. Pour la dernière méthode de la liste, l'élément "aucune méthode" a été ajouté, afin d'inclure les cinq logiciels non connectés.

**Tableau 5.1 - Recensement des méthodes de connexion**

<b>Méthode</b>	<b>Connexions</b>	<b>Conn.</b>
<b>M1 - Connecteur propriétaire / plateforme</b>	L1 → L2, L1 → L3, L2 → L3, L9 → L16, L15 → L16, L16 → L15, L21 → L26, L21 → L28, L22 → L28, L26 → L25, L28 → L21, L28 → L29,	12

*Tableau 5.1 : Recensement des méthodes de connexion (suite)*

<b>Méthode</b>	<b>Connexions</b>	<b>Conn.</b>
<b>M2 - Extract – Transform – Load (ETL)</b>	L10 → L16, L16 → L10, L17 → L16	3
<b>M3 - System Query Language (SQL)</b>	L11 → L12, L12 → L11	2
<b>M4 - SQL Extension (SQL EXT)</b>	L11 → L13	1
<b>M5 - FTP</b>	L12 → L14, L20 → L21, L21 → L20	3
<b>M6 - IPaaS – Web</b>	L13 → L14, L22 → L14	2
<b>M7 - Application Programming Interface (API) WEB</b>	L11 → L16, L14 → L13, L14 → L16, L14 → L21, L16 → L11, L16 → L19, L18 → L19, L19 → L18, L21 → L14	9
<b>M8 - Open Platform Communications - Unified Architecture (OPC UA)</b>	L16 → L17	1
<b>M9 - Single Signed On (SSO)</b>	L22 → L23, L22 → L24, L27 → L28	3
<b>Aucune</b>	L4, L5, L6, L7, L8	5

### ***5.1.2. - Définition des besoins et des exigences de l'entreprise***

La définition des besoins et des exigences a été faite en collaboration avec l'entreprise, en fonction des résultats de la cartographie des logiciels.

#### *5.1.2.1. Besoins exprimés par l'entreprise*

La première intention de l'entreprise est de pouvoir exploiter leurs données avec de l'intelligence d'affaires. L'architecture logicielle actuelle ne permet pas à l'entreprise de rendre facilement accessibles les données des différents logiciels à un outil d'intelligence d'affaires. Ce qui mène au premier besoin, soit de rendre les données des différents logiciels disponibles et accessibles pour l'intelligence d'affaires.

Dans le but d'obtenir des analyses pertinentes par l'intelligence d'affaires, l'entreprise a évidemment des exigences au niveau de la qualité. Leur deuxième besoin est donc de maintenir une cohérence et une qualité des données à travers l'architecture.

L'entreprise a déjà souligné avoir des problèmes de double saisie, de transferts manuels et d'erreurs humaines. Entre autres, cinq logiciels ont été identifiés comme non connectés. Un troisième besoin est de minimiser les possibilités d'erreurs.

La cartographie des logiciels a révélé neuf méthodes distinctes de connexion entre les logiciels. Dans le cadre de la démarche, l'entreprise souhaite pouvoir trouver un outil qui s'adaptera à ses différents logiciels. Donc, en quatrième besoin, l'entreprise souhaite pouvoir supporter les méthodes d'intégration de l'architecture logicielle de l'entreprise.

L'entreprise reconnaît avoir un nombre de ressources limité, particulièrement pour le développement logiciel et l'assistance technique. L'entreprise n'a pas de département spécifique à la gestion des technologies, et ne souhaite pas non plus en développer un. Le groupe n'offre pas non plus de support ou de développement à l'unité. L'entreprise souhaite donc, comme cinquième besoin, minimiser l'effort de développement et de gestion de l'infrastructure.

L'entreprise comprend à l'interne plusieurs employés à l'aise avec la technologie. Sans qu'ils soient des experts en développement ou en gestion de technologie, l'entreprise

voudrait à terme aussi conserver l'autonomie qu'elle a dans la gestion de son environnement logiciel. Donc, en sixième besoin, l'entreprise souhaite pouvoir être accompagnée, avoir du support et à terme pouvoir conserver une certaine autonomie.

L'entreprise concède d'emblée que même si la mise en œuvre d'une solution d'interconnectivité est une solution souhaitable, cela demande une certaine mobilisation de ressources et comporte des risques. De plus, la majorité des logiciels de l'entreprise sont des logiciels de gestion manufacturière. L'entreprise exprime donc le septième besoin d'avoir une solution qui perdure et qui est reconnue comme fiable dans le secteur manufacturier.

Comme mentionné précédemment, la mise en œuvre de la solution implique une mobilisation de ressources. De plus, le maintien et l'exploitation de la solution dans le temps va aussi nécessiter plusieurs ressources. Donc, comme huitième besoin, l'entreprise souhaite pouvoir évaluer et anticiper les coûts.

En résumé, il a été convenu par l'entreprise de considérer des solutions d'interconnectivité pour répondre aux huit besoins suivants :

- B1 - Rendre les données des différents logiciels disponibles et accessibles pour l'intelligence d'affaires;
- B2 - Maintenir une cohérence et une qualité des données à travers l'architecture logicielle;
- B3 - Minimiser les possibilités d'erreurs;
- B4 - Pouvoir supporter les méthodes d'intégration de l'architecture logicielle de l'entreprise;
- B5 - Minimiser l'effort de développement et de gestion de l'infrastructure;
- B6 - Pouvoir être accompagné, avoir du support et à terme pouvoir conserver une certaine autonomie;
- B7 - Avoir une solution qui perdure et qui est reconnue dans le manufacturier;
- B8 - Pouvoir évaluer et anticiper les coûts.

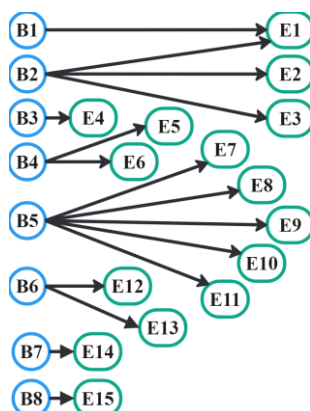
La section suivante va mettre en perspective les huit besoins de l'entreprise avec des capacités des solutions d'intégrations pour définir des exigences.

#### *5.1.2.2. Traduction des besoins en exigences*

Pour chacun des besoins de l'entreprise, les exigences envers l'outil sont listées. Les modèles de Rienstra et Gartner (Rienstra 2024; Guttridge, Comes et Ray 2023a) sont employés pour choisir les exigences techniques. Cela a permis d'identifier 15 exigences pour répondre aux huit besoins de l'entreprise. Les 15 exigences sont listées ci-dessous.

- E1- Orchestration et routage des données;
- E2- Création de flux d'intégration;
- E3- Transformation des données;
- E4- Automatiser les transferts d'information;
- E5- Permettre de concevoir des connecteurs personnalisés et configurables;
- E6- Permettre de développer entièrement un nouveau connecteur;
- E7- Offrir des connecteurs existants;
- E8- Offrir un outil de conception graphique et/ou faible en codage;
- E9- Supporter des standards d'interconnectivités, tel qu'ISA- 95;
- E10- Pouvoir être déployé sur le nuage, et idéalement aussi déployé sur site;
- E11- Supporter des langages de programmation répandus et reconnus pour le développement de connecteur;
- E12- Avoir de l'accompagnement en français;
- E13- Conserver une certaine autonomie, ne pas avoir à dépendre du support;
- E14- Flexibilité et extensibilité;
- E15- Offrir un modèle de coût adapté.

Pour bien identifier quelles exigences permettent de répondre à quels besoins, la figure 5.2 présente le lien entre chaque besoin et les exigences.



**Figure 5.2 - Lien entre les besoins et les exigences.**

Les 11 premières exigences concernent directement la nature de l’outil, et sont de nature technique. Les exigences E12, E13, E14 et E15 concernent plus des aspects organisationnels et de relations d’affaires, qui sont évaluées lors des présentations par les fournisseurs. La veille technologique est donc effectuée en évaluant principalement la réponse aux 11 premières exigences.

### **5.1.3. - Veille technologique**

Les fournisseurs à évaluer dans le cadre de la veille technologique ont été sélectionnés de trois façons.

Premièrement, une recension des outils d’interconnectivité a été effectuée. Le recensement a été fait en utilisant les trois sites de référencement Capterra (<https://fr.capterra.ca/>), G2 (<https://www.g2.com/>), et Gartner Peer Insights (<https://www.gartner.com/peer-insights/home>) ainsi que le Gartner Magic Quadrant (Guttridge, Comes et Ray 2023b) Selon les trois critères suivants, les outils des fournisseurs F3, F6, F7, F8, F10 et F11 ont été retenus :

- Être recensé dans le Magic Quadrant de Gartner;
- Être présent sur les trois sites d’évaluation;
- Avoir au moins 30 évaluations sur chacun des trois sites d’évaluation.

Le choix de prendre 30 évaluations provient du théorème central limite, où une série de nombres aléatoires tend à converger vers une loi normale. Il est reconnu qu'à partir de 30 échantillons, le théorème central limite commence à s'appliquer significativement (Memon et al. 2020).

Deuxièmement, l'entreprise connaissait déjà certains fournisseurs et leurs solutions. Les fournisseurs F1, F2 et F9 ont donc été inclus à la demande de l'entreprise.

Troisièmement, deux fournisseurs de solution ont été ajoutés. Le fournisseur F4 a été ajouté, car il est un contact du centre de recherche et qu'il s'agit d'un fournisseur local. Le choix d'ajouter le fournisseur F4 vient de la volonté commune du centre de recherche et de l'entreprise de favoriser les fournisseurs locaux. Considérant l'objectif qui est d'évaluer la mise en œuvre du standard ISA- 95 chez la PME manufacturière, la solution F5 a été ajoutée à la suggestion du chercheur. En effet, il s'agit d'une solution ouverte *Open Source* qui est reconnue pour interconnecter des logiciels dans le contexte manufacturier (Cui, Kara et Chan 2020; Kassem M. et al. 2023; S. Gaiardelli et al. 2022), entre autres avec le B2MML (Polczer 2021).

Les résultats des évaluations, en fonction des 11 premières exigences identifiées, sont présentés dans le tableau 5.2. Pour chaque exigence, il est indiqué si la solution du fournisseur répond à l'exigence (O), ne répond pas à l'exigence (N), répond en partie à l'exigence (P) ou s'il n'a pas été possible de trouver l'information ( $\emptyset$ ). Dans le cas de l'exigence E10, il est indiqué si la solution supporte uniquement le déploiement dans le nuage (N), ou le déploiement dans le nuage et sur site (N+S). Pour le pointage des outils, un Oui est égal à 1, un partiel est égal à 0.5, tandis qu'un Non ou une impossibilité d'accéder à l'information est égal à 0. Un pourcentage de complétude des exigences est calculé pour chacun des fournisseurs.

**Tableau 5.2 - Évaluations des solutions des fournisseurs de la veille technologique**

Exig. Fourn.	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	%
<b>F11</b>	O	O	O	O	O	O	O	O	N	O, N	N	81,8 %
<b>F3</b>	O	O	O	O	O	O	O	O	N	O, N+S	N	81,8 %
<b>F6</b>	O	O	O	O	O	O	O	O	N	O, N	N	81,8 %
<b>F2</b>	O	O	O	O	O	N	O	N	N	O, N+S	O	72,7 %
<b>F5</b>	O	O	O	O	N	O	N	N	O	O, N+S	O	72,7 %
<b>F8</b>	O	O	O	O	O	Ø	O	O	N	O, N	Ø	72,7 %
<b>F4</b>	O	O	O	O	O	N	P	O	N	O, N	N	68,2 %
<b>F7</b>	O	O	O	O	O	Ø	P	O	N	O, N	Ø	68,2 %
<b>F10</b>	O	O	O	Ø	O	Ø	O	O	N	O, N	Ø	63,6 %
<b>F1</b>	O	N	O	O	O	Ø	P	O	N	O, N	N	59,1 %
<b>F9</b>	O	N	O	N	N	O	N	N	N	O, N+S	O	45,5 %

E1 - Orchestration et routage des données.

E2 - Création de flux d'intégration;

E3 - Transformation des données.

E4 - Automatiser les transferts d'information.

E5 - Permettre de concevoir des connecteurs personnalisés et configurables;

E6 - Permettre de développer entièrement un nouveau connecteur.

E7 - Offrir des connecteurs existants;

E8 - Offrir un outil de conception graphique et/ou faible en codage;

E9 - Supporter des standards d'interconnectivités, tel qu'ISA- 95;

E10 - Pouvoir être déployé sur le nuage, et idéalement aussi déployé sur site;

E11 - Supporter des langages de programmation répandus et reconnus pour le développement de connecteur.

Suite aux résultats de la veille technologique, la sélection des fournisseurs pour les présentations a été faite conjointement avec l'entreprise. Les exigences n'ont pas été pondérées pour la sélection des fournisseurs. Les trois outils ayant eu le meilleur pointage, soit F3, F6 et F11, ont été priorisés. Du fait des valeurs de l'entreprise, il a aussi été convenu d'inviter les deux fournisseurs locaux, soit F2 et F4.

#### ***5.1.4. - Présentation des fournisseurs***

Les fournisseurs F2, F3, F4, F6 et F11 ont tous été invités. Les cinq fournisseurs ont accepté de présenter leur outil à l'entreprise. Une rencontre de présentation a été organisée pour chacun d'entre eux, avec l'entreprise et le chercheur. Le fournisseur F4 s'est finalement désisté avant la présentation. Finalement, quatre fournisseurs ont été évalués.

Lors de chacune des présentations, les informations de la veille technologique ont été validées. Les évaluations n'ont pas changé. En supplément, les quatre dernières exigences, E12, E13, E14 et E15 ont été évaluées, et les écarts en sont justifiés.

Pour l'exigence E12, qui est d'avoir de l'accompagnement en français, seul le fournisseur F11 a obtenu la note partielle. Le fournisseur F11 n'a pas été en mesure de recommander un partenaire francophone pour l'accompagnement, en plus d'avoir tenu la portion technique de la présentation en anglais.

Pour l'exigence E13, qui est de conserver une certaine autonomie et de ne pas avoir à dépendre du support, seul le fournisseur F2 a reçu une note négative. Le modèle d'accompagnement offert requiert une implication constante du fournisseur dans la mise en œuvre de connexion des logiciels.

Pour l'exigence E14, qui est d'offrir une solution flexible et extensible, seul le fournisseur F2 a reçu la note partielle. La solution du fournisseur F2 présentait un risque au niveau de l'extensibilité. La solution présentée n'était pas encore mature, et le fournisseur F2 n'était pas en mesure de démontrer que celle-ci peut supporter à terme une architecture logicielle de l'ampleur de l'entreprise.

Pour l'exigence E15, qui est d'offrir un modèle de coût adapté, les modèles de coûts présentés sont des combinaisons d'un ou plusieurs de ces trois éléments : facturation initiale pour l'intégration; facturation à l'utilisation; facturation selon le nombre d'intégrations. Le fournisseur F3 a offert deux modèles de coût. Les modèles de coûts présentés par les quatre fournisseurs sont résumés dans le tableau 5.3. Au sujet de la facturation à l'utilisation, le deuxième modèle du fournisseur F3 est basé sur le volume de

données tandis que le modèle du fournisseur F6 est basé sur le nombre de communications transmises (message). La facturation à l'intégration du fournisseur F11 est basée sur le nombre de tâches dans les intégrations.

**Tableau 5.3 - Sommaire des modèles de facturation**

	<b>Facturation initiale</b>	<b>Facturation à l'utilisation</b>	<b>Facturation à l'intégration</b>
<b>F2</b>	Oui	Non	Oui
<b>F3 – modèle 1</b>	Non	Non	Oui
<b>F3 – modèle 2</b>	Non	Oui	Non
<b>F6</b>	Non	Oui	Oui
<b>F11</b>	Non	Non	Oui

Donc, pour l'exigence E15, le fournisseur F2 a reçu la note partielle et le fournisseur F11 une note négative. La note partielle du fournisseur F2 est justifiée par le coût de déploiement initial ainsi que par le coût par intégration élevé à cause de l'implication du fournisseur à chaque intégration. La note négative du fournisseur F11 est justifiée par le fait que le modèle de coût est très difficile à comprendre, et qu'il est très complexe de pouvoir calculer et anticiper les coûts.

Le tableau 5.4 présente l'ensemble des résultats pour les 15 exigences, avec le pointage final de chaque outil. Les exigences n'ont pas été pondérées, malgré la proposition faite à l'entreprise. Suite aux présentations, l'entreprise a exprimé avoir une vue satisfaisante pour prendre une décision.

**Tableau 5.4 - Évaluations en fonction des exigences des solutions des fournisseurs ayant présenté leur solution**

<b>Fourn.</b> <b>Exig.</b>	<b>F2</b>	<b>F3</b>	<b>F6</b>	<b>F11</b>
<b>E1</b>	O	O	O	O
<b>E2</b>	O	O	O	O
<b>E3</b>	O	O	O	O
<b>E4</b>	O	O	O	O
<b>E5</b>	O	O	O	O
<b>E6</b>	N	O	O	O
<b>E7</b>	O	O	O	O
<b>E8</b>	N	O	O	O
<b>E9</b>	N	N	N	N
<b>E10</b>	O, N+S	O, N+S	O, N	O, N
<b>E11</b>	O	N	N	N
<b>E12</b>	O	O	O	P
<b>E13</b>	N	O	O	O
<b>E14</b>	P	O	O	O
<b>E15</b>	P	O	O	N
<b>%</b>	66,7 %	86,7 %	86,7 %	76,7 %

E1 - Orchestration et routage des données.

E2 - Création de flux d'intégration;

E3 - Transformation des données.

E4 - Automatiser les transferts d'information.

E5 - Permettre de concevoir des connecteurs personnalisés et configurables;

E6 - Permettre de développer entièrement un nouveau connecteur.

E7 - Offrir des connecteurs existants;

E8 - Offrir un outil de conception graphique et/ou faible en codage;

E9 - Supporter des standards d'interconnectivités, tel qu'ISA- 95;

E10 - Pouvoir être déployé sur le nuage, et idéalement aussi déployé sur site;

E11 - Supporter des langages de programmation répandus et reconnus pour le développement de connecteur.

E12 - Avoir de l'accompagnement en français;

E13 - Conserver une certaine autonomie, ne pas avoir à dépendre du support.

E14 - Flexibilité et extensibilité.

E15 - Offrir un modèle de coût adapté.

#### *5.1.4.1. Observations*

Plusieurs observations sont soulevées en cours de démarche, que ce soit sur les solutions, la relation avec les fournisseurs ou les comportements de l'entreprise. Même si elles ne font pas partie des exigences évaluées, ces observations ont été jugées pertinentes par rapport au 4<sup>e</sup> sous-objectif de la recherche. En rappel, le 4<sup>e</sup> sous-objectif est d'observer l'intérêt pour l'implémentation de la proposition d'ISA- 95 chez les PME manufacturières.

- Obs1 - L'entreprise a admis être surprise par l'efficacité et l'utilisabilité des outils. Les outils de conception graphique et les outils de paramétrisation des connecteurs se sont présentés au-delà de leurs attentes;
- Obs2 - Le sujet de la standardisation n'a pas été amené par l'entreprise durant les présentations des fournisseurs;
- Obs3 - L'entreprise a mis beaucoup d'emphase sur la relation d'affaires avec le fournisseur. Seul le fournisseur F11 ne semble pas avoir démontré de l'intérêt à la hauteur de l'entreprise;
- Obs4 - Trois des fournisseurs, F3, F6 et F11, ont présenté l'opportunité de développer des connecteurs avec de l'intelligence artificielle. Les outils d'intelligence artificielle des fournisseurs F3 et F6 se sont démontrés les plus efficaces.

#### *5.1.5. - Action de l'entreprise*

D'abord, l'entreprise a rapidement exclu le fournisseur F2. Bien que ce soit un fournisseur local, la solution ne leur apparaît pas assez mature et fiable. La dépendance d'un accompagnement en continu ne leur convient pas.

Le fournisseur F11 a aussi été exclu. Même si c'est la solution présentée comme étant la plus adaptée aux PME par les sites de recensement et le fournisseur lui-même. Le modèle de coût leur apparaît comme difficilement prévisible à moyen et long terme. De plus, c'est le fournisseur qui a démontré le moins d'intérêt pour maintenir une relation d'affaires forte.

Leur réflexion finale se fait donc entre les fournisseurs F3 et F6. Les deux solutions sont très similaires. La complétude des besoins est forte par les deux solutions, qui ont toutes

les deux obtenu une note de 86,7 % selon les évaluations. Les deux outils démontrent une grande flexibilité aux yeux de l'entreprise. L'entreprise mentionne avoir fortement apprécié la présence et l'expertise de l'intégrateur pour le fournisseur F3. Le modèle d'accompagnement qui favorise l'autonomie offerte par cet intégrateur convient aussi à leur contexte.

## **5.2. - Analyse des résultats**

Les résultats et les observations sont analysés dans cette section. D'abord, le cas est analysé dans l'optique de démontrer sa correspondance avec la problématique de la présente recherche. Puis, les différentes observations faites lors de la démarche sont analysées. Une réflexion est aussi incluse par rapport à la partie six d'ISA- 95.

### ***5.2.1. - Correspondance du cas avec la problématique***

Tout d'abord, il est d'intérêt de confirmer la pertinence du cas d'accompagnement par rapport à la problématique. Il a été soulevé que l'entreprise est une unité industrielle indépendante faisant partie d'un groupe. En premier lieu, il est présenté de quelle façon l'entreprise a exprimé des enjeux correspondants à ceux de la PME manufacturière. Par la suite, il est présenté de quelle façon l'environnement informationnel de l'entreprise correspond à la problématique des PME manufacturières.

#### ***5.2.1.1. Enjeux de la PME manufacturière***

À travers les besoins identifiés, l'entreprise a exprimé faire face à plusieurs enjeux associés à la PME manufacturière. Dans l'expression du cinquième besoin (B5), l'entreprise reconnaît avoir un nombre de ressources limité, particulièrement pour le développement logiciel et l'assistance technique. L'entreprise a aussi exprimé un fort besoin d'accompagnement dans le besoin six (B6), et ce dans l'optique de compenser le manque d'expertise à l'interne. L'entreprise a aussi exprimé avec le besoin 8 (B8) vouloir anticiper les coûts, et être capable d'amortir l'investissement pour prendre en considération ses capacités financières. Cela correspond au contexte où les PME manufacturières sont confrontées à des ressources limitées et un manque de compétences

numériques. (Bauer et al. 2015; Brunswicker et Vanhaverbeke 2015; Horváth et Szabó 2019; Mittal et al. 2018; Wadhwa 2012).

#### 5.2.1.2. Environnement informationnel

Dans la problématique, il est soulevé que les environnements informationnels sont dépareillés, hétérogènes et mal organisés. Cela se traduit par : la présence de systèmes obsolètes ou dépassés; des structures de données et des interfaces d'intégration non uniformes; plusieurs systèmes implantés en silo; un faible niveau d'interopérabilité; un faible niveau de standardisation. Les données recensées lors de la cartographie des systèmes sont utilisées pour déceler ces caractéristiques dans l'environnement de l'entreprise accompagnée.

Pour faciliter le suivi, le tableau 5.5 résume les caractéristiques des logiciels recensés. Pour chaque logiciel, il est indiqué s'il est développé à l'interne dans la colonne *Int.*, s'il est déployé dans le nuage (N) ou sur site (S) dans la colonne *Depl.*, ainsi que son niveau de fonctionnalité dans le modèle PERA dans la colonne *PERA*.

**Tableau 5.5 - Liste des logiciels avec leur niveau dans le modèle PERA**

<b>Logiciels</b>	<b>Int.</b>	<b>Depl.</b>	<b>PERA</b>
<b>L1 – Répertoire de données BI</b>		N	4
<b>L2 – Visualisation BI</b>		N	4
<b>L3 – Répertoire de vues de données</b>		N	4
<b>L4 – Accès aux équipements EPI</b>		N	3
<b>L5 – Analyse de risque SST</b>		N	3
<b>L6 – CRM</b>		N	4
<b>L7 – Plateforme RH – SST</b>		N	3

*Tableau 5.1 : Liste des logiciels avec leur niveau dans le modèle PERA (suite)*

<b>Logiciels</b>	<b>Int.</b>	<b>Depl.</b>	<b>PERA</b>
<b>L8 – Plateforme RH – Dossiers employés</b>		N	3
<b>L9 – Portail client</b>	X	N	4
<b>L10 – Test qualité et formulation</b>		S	3
<b>L11 – ERP</b>		S	4
<b>L12 – Logistique machine</b>	X	S	3
<b>L13 – Paie</b>		N	4
<b>L14 – Temps et présence</b>		N	3
<b>L15 – Équipement physique</b>	X	S	2
<b>L16 – Entrepôt de données</b>	X	S	N/A
<b>L17 – SCADA</b>		S	2 et 3
<b>L18 – Gestion Fiche Données Sécurité Matériel</b>	X	S	3
<b>L19 – Gestion matières dangereuses</b>		N	3
<b>L20 – Module formation</b>		N	3
<b>L21 – Spécification RH</b>	X	S	3
<b>L22 – Licence - suite bureautique</b>		N	4
<b>L23 – Courriel</b>		N	4
<b>L24 – Formation Cybersécurité</b>		N	3
<b>L25 – Besoin Machine - spécification</b>	X	S	3
<b>L26 – Besoin Machine - Planification</b>	X	S	3
<b>L27 – Gestion des incidents SST</b>		S	3
<b>L28 – Droit accès / SSO</b>		S	4
<b>L29 – Gestion de droit d'accès physique</b>		S	4

En premier lieu, l'environnement peut être considéré comme dépareillé, hétérogène et mal organisé par la variété et la quantité des logiciels, le mélange des approches de déploiement, la présence d'outil développé à l'interne et à l'externe ainsi que la multitude

de méthodes d'interconnectivité. En effet, 29 logiciels différents ont été recensés. Parmi ceux-ci, 16 sont déployés sur le nuage et 13 sont déployés sur site dans les infrastructures de l'entreprise. Pour l'origine des outils, huit outils ont été développés à l'interne. De plus, neuf méthodes d'interconnectivité différentes sont employées.

Au sujet des différentes méthodes d'interconnectivités, cela implique que les structures de données et les interfaces d'intégration ne sont pas uniformes. Chaque lien d'intégration est unique. Le tableau 5.6 est utilisé pour illustrer cette diversité. La colonne *Connexions* indique le nombre de connexions, la colonne *Connexions distinctes* indique le nombre de connexions avec des logiciels distincts et la colonne *Méthodes distinctes* indique le nombre de méthodes distinctes de connexion employées.

**Tableau 5.6 - Recensement des connexions dans l'environnement informationnel**

Logiciel	Connexions.	Connexions distinctes	Méthodes distinctes.
L1	2	2	1
L2	2	2	1
L3	2	2	1
L14	7	4	3
L15	2	1	1
L16	11	7	4
L17	2	1	1
L18	2	1	1
L19	3	2	1
L20	2	1	1
L21	7	4	3
L22	4	4	3
L23	1	1	1
L24	1	1	1
L25	1	1	1
L26	2	2	1
L27	1	1	1
L28	5	4	2
L29	1	1	1

Il est possible de constater que le logiciel L16 sort du lot. Il a 11 connexions différentes avec sept logiciels distincts et exploite quatre méthodes de connexion différentes. Il s'agit d'un gestionnaire de base de données qui fait office de solution d'interconnectivité. Il y a cinq logiciels qui ont au moins quatre connexions, et ces cinq logiciels ont au moins quatre connexions avec des logiciels distincts. Il y a aussi quatre logiciels qui utilisent au moins trois méthodes de connexions différentes. De plus, en considérant le tableau 5.1 - Recensement des méthodes de connexion, quatre logiciels utilisent des méthodes distinctes pour interagir avec les mêmes logiciels, soit les liens entre L13 et L14 qui utilisent les méthodes M6 et M7, ainsi que L16 et L17 qui utilisent les méthodes M2 et M8. Ces éléments permettent d'affirmer que l'environnement utilise plusieurs interfaces d'intégration qui ne sont pas uniformes, qu'il n'y a pas de structure de données uniformes et qu'il n'y a pas d'application de la standardisation.

Il y a aussi présence de système obsolète ou dépassé, particulièrement au niveau des outils développés à l'interne. Ceux-ci utilisent une veille technologique de développement pour laquelle il est difficile de trouver des ressources compétentes.

Aussi, cinq logiciels ont été identifiés comme travaillant en silo, sans aucune connexion avec le reste de l'environnement informationnel. Aussi, l'entreprise accompagnée a admis avoir plusieurs cas de double saisie et de duplication de données autant pour les systèmes œuvrant en silo que pour ceux interconnectés. Cela mine la capacité des outils logiciels d'interopérer de manière efficace. Il est donc possible de constater qu'il y a plusieurs systèmes qui fonctionnent en silo, et que le niveau d'interconnectivité apparaît comme faible.

Il apparaît donc que l'environnement informationnel de l'entreprise accompagnée est représentatif de la problématique de la présente recherche. Le cas de la démarche est donc pertinent à exploiter pour répondre à la quatrième question de recherche. Il est aussi possible de constater à partir de la colonne PERA dans le tableau 5.5 que la quasi-totalité des logiciels réalise des fonctions des niveaux trois et quatre du PERA. Les niveaux trois et quatre du PERA correspondent à la portée du standard ISA- 95. Donc, le cas

d'accompagnement peut être considéré comme pertinent pour évaluer s'il serait d'intérêt pour la PME manufacturière de mettre en œuvre la proposition d'ISA- 95.

### **5.2.2. - Analyse des observations**

Dans cette section, les quatre observations soulevées par la démarche sont analysées. En rappel, les quatre observations sont les suivantes.

- Obs1 - L'entreprise a admis être surprise par l'efficacité et l'utilisabilité des outils. Les outils de conception graphique et les outils de paramétrisation des connecteurs se sont présentés au-delà de leurs attentes;
- Obs2 - Le sujet de la standardisation n'a pas été amené par l'entreprise durant les présentations des fournisseurs;
- Obs3 - L'entreprise a mis beaucoup d'emphase sur la relation d'affaires avec le fournisseur. Seul le fournisseur F11 ne semble pas avoir démontré de l'intérêt à la hauteur de l'entreprise;
- Obs4 - Trois des fournisseurs, F3, F6 et F11, ont présenté l'opportunité de développer des connecteurs avec de l'intelligence artificielle. Les outils d'intelligence artificielle des fournisseurs F3 et F6 se sont démontrés les plus efficaces.

#### *5.2.2.1. Réponse des solutions de l'industrie*

À la phase de présentations, les quatre fournisseurs ont démontré être en mesure d'interconnecter les logiciels de l'environnement de l'entreprise, et ce sans nécessiter de conformité à un standard ou sans nécessiter d'avoir un modèle de données uniforme. L'entreprise accompagnée a témoigné avoir été satisfaite par la flexibilité et l'adaptabilité des outils présentés par les fournisseurs F3, F6 et F11. La première observation (Obs1) amène que l'entreprise a souligné être surprise par la réponse aux exigences de permettre de concevoir des connecteurs personnalisés et configurables (E5), ainsi que d'offrir un outil de conception graphique faible en codage (E8). L'intérêt de l'entreprise s'est rapidement orienté vers la capacité des outils plutôt que vers l'application de la standardisation.

#### *5.2.2.2. Intérêt de la proposition d'ISA- 95*

Au démarrage de la démarche, la proposition d'ISA- 95 a été présentée par le chercheur à l'entreprise accompagnée. L'entreprise s'est montrée très ouverte et enthousiaste. Elle affirme que c'est le genre de solution qu'elle recherche. Le support de standard d'interconnectivité tel qu'ISA- 95 a été considéré comme exigence (E9) dans l'évaluation des outils pour répondre au besoin de minimiser l'effort de développement et de gestion de l'infrastructure (B5).

Parmi les 11 fournisseurs évalués dans la veille technologique, un seul fournisseur (F5) offrait le support du standard ISA- 95. La solution du fournisseur F5 n'a pas été retenue par l'entreprise accompagnée pour l'étape de présentation. L'entreprise accompagnée a choisi d'inviter deux fournisseurs locaux, les fournisseurs F2 et F4, à l'étape de présentation, et ce, malgré le fait que les fournisseurs F2 et F4 aient eu la même note (72,7 %) ou une note inférieure (68,2 %) que le fournisseur F5 (72,7 %). L'argument du support du standard ISA- 95 n'est pas apparu intéressant à l'entreprise accompagnée pour inviter le fournisseur F5 aux présentations. L'entreprise accompagnée n'a aucunement pris en compte la standardisation dans la sélection des cinq fournisseurs invités.

À ce sujet, la deuxième observation avance que le sujet de l'utilisation de standards d'interconnectivité n'a pas été amené par l'entreprise durant les présentations des fournisseurs (Obs2). Malgré le biais positif introduit par le chercheur, en aucun moment l'entreprise accompagnée n'a manifesté son intérêt pour la mise en œuvre d'ISA- 95 ou d'un autre standard d'interconnectivité. Non seulement le sujet n'a pas été amené par l'entreprise accompagnée, mais en plus les fournisseurs n'ont pas plus présenté de conformité à des standards dans leur solution. C'est le chercheur qui a posé la question à chaque fournisseur. Il y a seulement le fournisseur F3 qui a démontré un potentiel de conformité avec ISA- 95.

#### *5.2.2.3. Importance de la relation d'affaires*

Lors de la phase de présentation, deux fournisseurs se sont distingués, soit les fournisseurs F3 et F6. Les fournisseurs F2 et F11 ont fait moins bonne figure

principalement due à des exigences liées à la relation d'affaires et à l'accompagnement. D'ailleurs, la 3<sup>e</sup> observation (Obs3) est que l'entreprise a mis beaucoup d'emphase sur la relation d'affaires avec le fournisseur. Le fournisseur F2 a un modèle de support et d'accompagnement ne visant pas l'autonomie, et cela a fait en sorte que l'entreprise a complètement balayé ce fournisseur. Le fournisseur F11 a de son côté été incapable de démontrer pouvoir offrir du support totalement en français.

Les fournisseurs F3 et F6 ont été en mesure de répondre aux attentes de relation d'affaires de l'entreprise accompagnée. Le fournisseur F6 s'est démarqué avec la présence d'un intégrateur désigné. L'intérêt était donc beaucoup plus orienté vers la relation d'affaires.

#### *5.2.2.4. Présence de l'intelligence artificielle*

D'autre part, trois des quatre fournisseurs invités à présenter, soit les fournisseurs F3, F6 et F11, ont présenté un outil d'intelligence artificielle pour le développement de connecteurs personnalisés. Ces outils permettent de générer automatiquement de la programmation pour interconnecter des logiciels. La mise en œuvre de l'intelligence artificielle pour le développement de connecteur est apparue comme prometteuse, en permettant de réduire encore plus l'effort de développement et le niveau d'expertise exigé.

#### **5.2.3. - Réflexion sur la partie 6 d'ISA- 95**

Dans l'environnement de l'entreprise, la quasi-totalité des liaisons entre les logiciels est faite de point à point, ce qui est une pratique déjà reconnue comme une stratégie inadéquate (Kusak 2010). À ce sujet, la partie six d'ISA-95 propose un modèle d'architecture logicielle basé sur le patron architectural *Publish-Subscribe*. Même si cela n'a pas fait directement l'objet de l'accompagnement, la majorité des outils permettent le déploiement selon ce patron architectural. En effet, seuls les outils des fournisseurs F2 et F9 ne sont pas basés sur ce patron architectural.

## CHAPITRE 6 - DISCUSSION

Les résultats de l'étude bibliométrique et de l'étude de cas sont discutés dans cette section. À la suite des deux discussions, quelques suggestions basées sur la présente recherche sont posées en guise de ligne directrice pour les PME manufacturières.

### 6.1. - Étude bibliométrique

Le premier constat a amené qu'il y a peu d'évaluation de la mise en œuvre d'ISA- 95 dans les PME manufacturières, et ce malgré un rythme soutenu de publication depuis 2005. Pourtant, la littérature identifie déjà un écart avec les solutions proposées reconnues comme non adaptées, ou difficilement adoptées (Li, Mantravadi et Moller 2020; Masood et Sonntag 2020). Des sources ont aussi soulevé le manque d'utilisation de la standardisation ou encouragé l'utilisation de la standardisation pour l'interconnectivité (Agostinho et al. 2009; Ding et Fan 2022; Ferreira et al. 2013; Horváth et Szabó 2019; Jardim-Gonçalves et al. 2013; Mourad et al. 2020; Mourad et al. 2017; Park, Woo et Choi 2020). D'une part, il est affirmé que les solutions ne sont souvent pas adaptées aux PME, et d'autre part, il est reconnu qu'ISA- 95 est une solution pour l'interconnectivité. Donc, il est raisonnable de penser que la littérature devrait couvrir le déploiement d'ISA- 95 en PME manufacturière, pour pouvoir éventuellement infirmer ou confirmer son employabilité dans le contexte des PME.

Pour le deuxième constat, qui stipule qu'il semble exister des alternatives et de la recherche à leur sujet, la présente recherche s'est limitée à constater la présence d'alternatives. Il existe effectivement des alternatives, et il pourrait être intéressant d'y faire une revue plus approfondie. Et ce pour être en mesure de lister de manière exhaustive les alternatives à ISA- 95 pour l'interconnectivité. Dans le contexte de la présente recherche, cela est hors de portée. Ce deuxième constat était nécessaire pour alimenter les troisième et quatrième constats.

Ensuite, les constats trois et quatre ont présenté qu'il y a peu d'évaluation d'alternatives dans les PME manufacturières. La littérature listée par une revue plus approfondie des

alternatives pourrait servir pour éventuellement orienter sur les alternatives qui pourraient être validées en PME.

Pour le 5e et dernier constat, il a été présenté qu'il existe des expérimentations en PME pour des standards complémentaires ou qui couvrent d'autres portées. En effet, la standardisation a été évaluée dans des PME en utilisant des méthodologies intéressantes. Celle de (Qureshi et al. 2017) semble très intéressante, puisque les auteurs mettent en place un environnement hétérogène. L'environnement employé dans leur méthodologie correspond à celle de la problématique du présent mémoire. Il serait intéressant de s'en inspirer pour évaluer la mise en œuvre d'ISA- 95 en contexte de PME. Sauf qu'avant toute chose, la présente recherche se penche sur l'intérêt de la solution pour la PME manufacturière.

## **6.2. - Étude de cas**

L'analyse de la première observation par rapport à la réponse aux besoins des outils Ipaas amène à une certaine réflexion. Les outils ont démontré une flexibilité à interconnecter les différents logiciels et à s'adapter aux différents modèles de données. Les outils supportent une variété de protocoles et de méthode d'interconnexion. D'autant plus qu'une multitude de connecteurs déjà existants sont offerts par la majorité des solutions. Les outils offrent des éditeurs graphiques permettant de configurer l'interconnexion entre les systèmes en utilisant peu de programmation. Tout cela dans une architecture organisée et flexible. D'autre part, l'analyse de la quatrième observation sur la génération automatique par l'intelligence artificielle de connecteurs vient offrir encore plus d'accessibilité dans la mise en place de l'interconnectivité. Le but ici n'est pas de faire l'apologie des outils Ipaas, mais bien de mettre en perspective la nécessité d'employer un modèle de données commun pour interconnecter des logiciels dans le but de mettre en place un environnement informationnel avec un haut niveau d'interopérabilité.

Malgré que la littérature a identifié le manque de standardisation comme lacune des environnements informationnels des PME manufacturières (Horváth et Szabó 2019; Müller et Voigt 2018), est-ce vraiment un besoin? La standardisation est certes un outil,

une façon de faire, mais est-ce vraiment une nécessité pour mettre en œuvre un environnement informationnel avec un haut niveau d'interopérabilité? Les outils observés à travers la démarche de recherche d'intervention tendent à démontrer **qu'il existe des solutions pour interconnecter les logiciels d'un environnement informationnel de manière structurée et cohérente sans un modèle unique et standardisé de données.**

Un autre point intéressant de la démarche, c'est l'évolution de l'intérêt de l'entreprise pour la proposition du standard ISA- 95. Le représentant de l'entreprise a bien compris l'enjeu technique, et reconnaît dès le départ la pertinence de la solution. Pour le représentant de l'entreprise, tout comme pour le chercheur, la proposition de mettre en place une représentation de données unique dans un format standardisé apparaît comme une solution appropriée et nécessaire.

Au fil de la démarche, cependant, l'intérêt pour le standard ISA- 95 est totalement éclipsé. C'est d'ailleurs la deuxième observation amenée par la démarche de recherche d'intervention. L'entreprise accompagnée a reconnu avoir été plus que satisfaite par la flexibilité des outils. Les quatre fournisseurs qui ont participé aux présentations ont offert un taux de satisfaction des exigences techniques au-dessus de 70 % lors de la veille technologique. Les fournisseurs F3 et F6 ont obtenu un pointage parfait sur les exigences E12 à E15, qui concernent la relation d'affaires avec le fournisseur. Les fournisseurs F3 et F6 se sont distingués en incluant un accompagnement adapté et en offrant des modèles de coût flexible.

En revenant sur ce qui distingue la PME dans la littérature, il est reconnu par la littérature que les PME manufacturières ont leur contexte particulier qui fait en sorte qu'ils ont moins de ressources et un plus faible taux de réussite de projet technologique (Bauer et al. 2015; Brunswicker et Vanhaverbeke 2015; European Commission 2022; Ghobakhloo et Iranmanesh 2021; Frank, Dalenogare et Ayala 2019; Horváth et Szabó 2019; Mittal et al. 2018; Moeuf et al. 2018; Stentoft et al. 2019; Won et Park 2020; Wuest et Thoben 2012). L'entreprise accompagnée a reconnu que plusieurs des outils démontrent pouvoir interconnecter les logiciels de leur environnement informationnel de manière accessible

et flexible, et en nécessitant moins d'expertises spécialisées en développement de logiciel. Donc, il est possible d'ajouter que **plusieurs outils d'interconnectivité offerts par l'industrie peuvent être considérés comme adaptés au contexte de la PME.**

La démarche de recherche d'intervention a permis aussi d'observer que l'entreprise accompagnée a démontré énormément d'intérêt pour la qualité de la relation d'affaires. Cet intérêt s'est manifesté de plusieurs façons. D'abord, avec les exigences sur la langue du support (E12) et la volonté d'être accompagnée dans l'optique d'être autonome (E13). Et ensuite avec l'invitation de fournisseurs locaux, malgré des évaluations plus faibles à la veille technologique. Au final, l'entreprise a d'ailleurs tendance à favoriser le fournisseur F3, pour la qualité de l'accompagnement offert par l'intégrateur présent lors de la présentation. En mettant la réflexion en lien avec le modèle d'interopérabilité European Interoperability Framework (EIF), cela amène aussi d'autres éléments. Ce modèle souligne entre autres qu'au-delà de l'aspect technique, il faut aussi prendre en considération les aspects fonctionnels, organisationnels et juridiques (European Commission 2017). Dans la démarche de recherche-intervention, ce sont rapidement les aspects organisationnels qui ont prédominé. Parmi ceux identifiés dans la mise en contexte de la présente recherche, les éléments de la coordination avec les fournisseurs externes (Bauer et al. 2015; Horváth et Szabó 2019) ainsi que les ressources limitées et le manque de compétences numériques (Bauer et al. 2015; Brunswicker et Vanhaverbeke 2015; European Commission 2022; Ghobakhloo et Iranmanesh 2021; Frank, Dalenogare et Ayala 2019; Horváth et Szabó 2019; Mittal et al. 2018; Moeuf et al. 2018; Stentoft et al. 2019; Won et Park 2020; Wuest et Thoben 2012) se manifestent à travers la démarche.

D'une part, la proposition du standard ISA- 95 offre une solution technique et une vision fonctionnelle. ISA- 95 ne fournit pas d'indication pour guider sur les aspects organisationnels et juridiques. D'autre part, en s'appuyant sur le modèle EIF de la Commission européenne (2017), la publication de (Lu 2017), ainsi que sur les observations de la recherche intervention, une solution adéquate pour permettre à des logicielles d'interopérer efficacement doit considérer les aspects organisationnels et

juridiques. L'étude de cas a permis d'explorer l'intérêt de la PME manufacturière à prendre particulièrement en considération les aspects organisationnels. Comme **la proposition d'ISA-95 constitue principalement une solution technique et ne prend pas explicitement en compte l'aspect organisationnel, la proposition peut ne pas être suffisante dans le contexte de la PME manufacturière.**

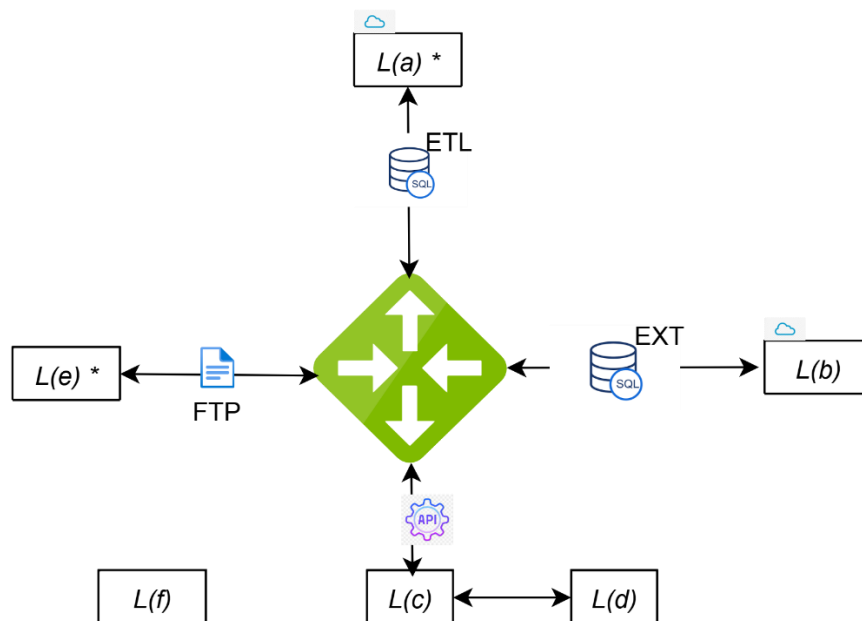
Sommairement, les trois constats indiquent qu'il est possible de réaliser une architecture interconnectée cohérente sans la proposition d'ISA- 95, que les outils de l'industrie offrent des solutions d'interconnectivité adaptées pour la PME manufacturière et que la proposition d'ISA- 95 n'est pas nécessaire pour offrir une solution concrète à la PME manufacturière. À partir de ces trois constats, il semble que du point de vue de la PME manufacturière, la mise en œuvre d'un modèle de données commun ne semble pas avoir de valeur ajoutée. En d'autres mots, **la mise en œuvre du modèle de données d'ISA- 95 ne semble pas présenter d'avantages notables pour la PME manufacturière.**

Cependant, il est possible de revenir sur un des éléments discutés dans la revue de littérature. Soit qu'aucune publication traitant de la proposition architecturale d'ISA- 95 n'a été recensée. La proposition d'architecture est présentée dans la partie six du standard ISA- 95. La proposition architecturale présente une architecture avec un médiateur central et la gestion de canaux avec le patron *Publish-Subscribe*. Pourtant, parmi les 11 solutions évaluées dans la veille technologique, seulement deux solutions ne sont pas basées sur le patron *Publish-Subscribe*. Les trois meilleurs outils qui ont le plus haut tout de satisfaction aux exigences dans l'entièreté de la démarche mettent en œuvre ce patron. C'est hypothétique comme affirmation, mais **il serait intéressant de valider les avantages provenant de la mise en œuvre de la proposition architecturale de la partie six d'ISA- 95 chez les PME manufacturières.**

### **6.3. - Suggestions pour les PME manufacturières**

Malgré le constat que la mise en œuvre du modèle de données d'ISA- 95 ne semble pas présenter d'avantages pour la PME manufacturière, il en demeure pertinent pour la PME manufacturière de mettre en œuvre une architecture logicielle interconnectée cohérente.

Dans l'étude de cas, l'entreprise était prise avec une architecture logicielle désorganisée. Les connexions entre les systèmes y sont essentiellement de point à point. Ce qui n'est déjà pas considéré comme une solution adéquate (Kusak 2010). D'autant plus que la partie 6 d'ISA-95 recommande de mettre en place une solution centrale d'interconnectivité avec le patron Publish & Subscribe (International Society of Automation (ISA) 2014). De plus, dans le cadre de l'étude de cas, 9 des 11 solutions évaluées répondaient à la proposition d'architecture logicielle d'ISA-95. Ultimement, les systèmes devraient tendre à s'organiser au maximum autour d'une solution d'interconnectivité, selon le patron Publish & Subscribe. Une version simplifiée de l'architecture logicielle souhaitée pour la PME manufacturière étudiée dans l'étude de cas est représentée dans la figure 6.1.

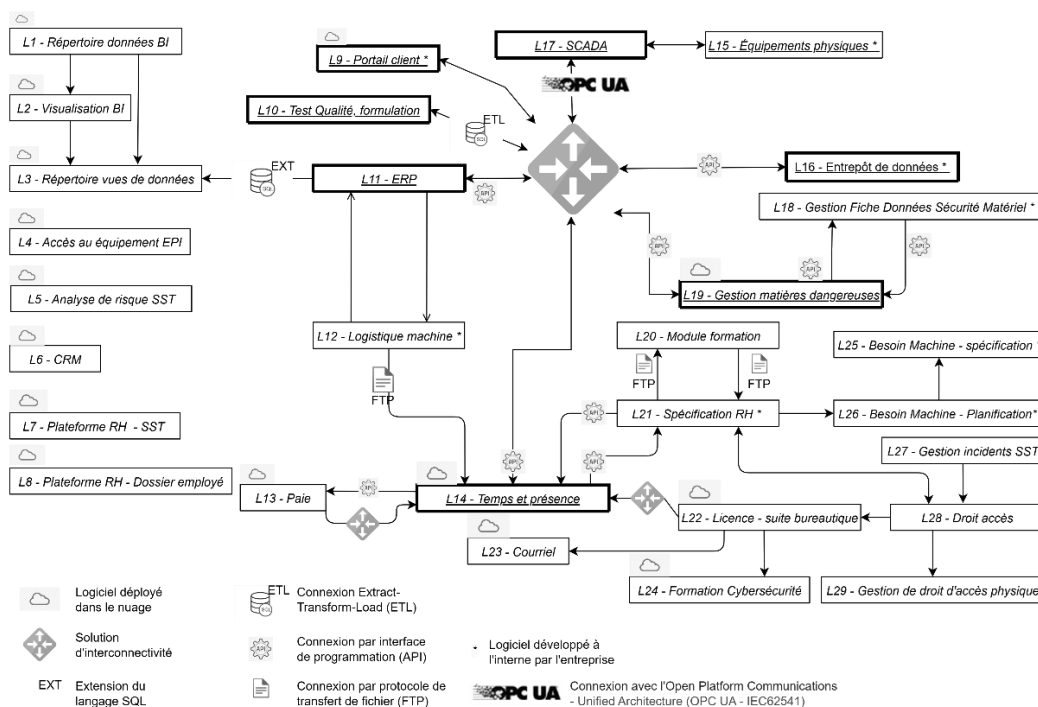


**Figure 6.1 – Vue simplifiée de l'architecture souhaitée dans la PME manufacturière accompagnée.**

La figure 6.1 présente un nombre limité de logiciel, mais en incluant tous les cas de connexions de l'étude. Cela implique qu'autant les systèmes développés à l'interne ( $L(a)$  et  $L(e)$ ) que ceux provenant de fournisseur ( $L(b)$  et  $L(c)$ ) sont connectés à la solution d'interconnectivité. Cela implique aussi que chacune des méthodes de connexion est

représentée, soit : par un ETL ( $L(a)$ ); par une extension à SQL ( $L(b)$ ); par un API ( $L(c)$ ) ou par FTP ( $L(e)$ ). Il se peut aussi qu'il demeure des logiciels non connectés ( $L(f)$ ) ou connectés de point à point ( $L(c)$  et  $L(d)$ ). L'objectif demeure de maximiser le nombre de logiciels interconnectés à la solution centrale, et de minimiser le nombre de logiciels non connectés ou connectés de point à point.

Cela admet aussi qu'il peut exister une transition avec des phases. Chacune des phases avec différentes proportions de logiciels connectés à la solution centrale d'interconnectivité. La figure 6.2 présente un exemple d'architecture logicielle en cours de transition chez l'entreprise accompagnée. Les logiciels avec des bordures en gras sont connectés avec la solution d'interconnectivité. Le restant des logiciels sont encore interconnectés selon la situation initiale. L'objectif est de démarrer l'adoption d'un modèle d'architecture logicielle reconnue par l'industrie.



**Figure 6.2 – Exemple d'architecture en cours de transition**

## CHAPITRE 7 - CONCLUSION

Afin d'en venir à une conclusion de la recherche, il est essentiel de valider l'atteinte des objectifs de recherche. Les quatre sous-objectifs sont évalués, pour ensuite mener à l'objectif principal.

Le chapitre 3 a permis de répondre aux trois premiers sous-objectifs. Le premier sous-objectif est de déterminer si ISA- 95 a été évaluée en contexte de PME en examinant la présence de la combinaison ISA- 95 et PME dans la littérature (SO1). La revue de littérature a permis de constater qu'il y a peu d'évaluation d'ISA- 95 chez les PME manufacturières, malgré un rythme soutenu de publication au sujet d'ISA- 95 depuis 2005. Le deuxième sous-objectif est d'identifier les alternatives et les concepts associés à ISA- 95 (SO2). Il a été constaté qu'il existe des alternatives à ISA- 95 et de la recherche à leur sujet. Le troisième sous-objectif est de déterminer si des alternatives à ISA- 95 ont été évaluées en contexte de PME par une recension dans la littérature de la combinaison entre la PME avec les alternatives à ISA- 95 (SO3). Il a été constaté qu'il y a peu d'évaluation des alternatives à ISA- 95 dans les PME manufacturières. De plus, il y a peu d'évaluation d'alternatives avec la même portée qu'ISA- 95. Mais il existe des expérimentations en PME pour des standards complémentaires ou qui couvrent d'autres portées. L'atteinte des trois premiers sous-objectifs permet d'identifier un manque de littérature sur le sujet.

Le chapitre quatre a permis de répondre au quatrième sous-objectif qui amène à s'interroger sur l'intérêt à pallier ce manque. Le quatrième sous-objectif est d'observer l'intérêt pour l'implémentation de la proposition d'ISA- 95 chez les PME manufacturières (SO4). La démarche de recherche-intervention apporte les constats suivants :

- **Il existe des solutions pour interconnecter les logiciels d'un environnement informationnel de manière structurée et cohérente sans un modèle unique et standardisé de données;**
- **Plusieurs outils d'interconnectivité offerts par l'industrie peuvent être considérés comme adaptés au contexte de la PME;**

- **Une solution qui ne considère pas l'aspect organisationnel n'apparaît pas suffisante, et ce particulièrement pour la PME manufacturière;**
- **La proposition d'ISA-95 constitue principalement une solution technique et ne prend pas explicitement en compte l'aspect organisationnel, la proposition peut ne pas être suffisante dans le contexte de la PME manufacturière.;**
- **Il serait intéressant de valider les avantages provenant de la mise en œuvre de la proposition architecturale de la partie six d'ISA- 95 chez les PME manufacturières.**

L'objectif principal est de déterminer si la proposition du standard ISA- 95 peut être mise en œuvre dans les PME manufacturières. La littérature semble peu s'intéresser à la mise en œuvre de la solution du standard d'ISA- 95 dans les PME manufacturières, que ce soit autant du modèle de données que de la proposition d'architecture logicielle.

Concernant le modèle de données, à la lumière de la démarche de recherche-intervention, il serait possible de soutenir que combler ce manque présente un intérêt limité dans le contexte étudié. Compte tenu des caractéristiques de la PME manufacturière, de l'importance de la relation d'affaires et de l'accompagnement pour la PME manufacturière ainsi que de la flexibilité des outils offerts par l'industrie, la mise en œuvre de la proposition du modèle de données d'ISA- 95 ne semble pas d'intérêt pour la PME manufacturière. En effet, les outils présentement offerts par l'industrie apparaissent comme adaptés à la PME manufacturière et combler les besoins techniques d'interconnectivité sans la nécessité d'un modèle standard de données tel qu'offert par ISA- 95. Pour ce qui est de la proposition architecturale, à la lumière de la démarche de recherche-intervention, il serait intéressant d'enrichir la littérature sur sa pertinence et son applicabilité.

### **7.1. - Limites**

Dans l'étude bibliométrique, quelques limites sont identifiées. D'abord, sur l'analyse bibliométrique de co-occurrence. Pour améliorer éventuellement la qualité des analyses bibliométriques utilisant les métadonnées et aussi de la recherche classique dans les bases

de données, il serait intéressant de favoriser le déploiement systématique de mots-clés normalisés dans les publications. Il serait aussi intéressant d'encourager la normalisation des mots-clés sémantiquement corrélés. Ensuite, beaucoup des publications citent ISA- 95 pour positionner leur solution à travers la pyramide de l'automatisation. La pyramide de l'automatisation provient du modèle Purdue Enterprise Reference Architecture (PERA), souvent nommé le modèle Purdue. ISA- 95 utilise lui-même le PERA pour positionner sa portée. Il existe potentiellement une confusion entre le PERA et ISA- 95 dans la littérature, ce qui pourrait occulter la proposition réelle d'ISA- 95.

Au niveau de la recherche-intervention, il est possible de mentionner que les constats sont tout de même basés sur l'appréciation des solutions par l'entreprise accompagnée. Il est possible qu'une autre PME manufacturière ait réagi différemment, ou ait soulevé des enjeux différents. La qualité de la recherche-intervention peut aussi varier selon le chercheur qui accompagne l'entreprise dans la démarche. La méthodologie présente tout de même une démarche pouvant être reproduite.

Au niveau de la généralisation, il serait difficile d'arriver à des constats absolus, puisqu'un seul cas est suivi. La présente recherche se limite à questionner ou à attirer l'attention de la littérature dans une certaine orientation. La section contribution clarifie ce qui est apporté à la littérature par la présente recherche.

## **7.2. - Contribution**

La présente recherche permet d'identifier un manque dans la littérature, à savoir celui de la faible présence de la mise en œuvre du standard ISA- 95 dans les PME manufacturières. Les résultats de la démarche de recherche amènent à s'interroger sur la pertinence de la mise en œuvre du standard ISA- 95 dans les PME manufacturières. La présente recherche tend à amener la littérature à ne pas insister pour combler le manque de présence d'évaluation du standard ISA- 95 chez les PME manufacturières. Du moins, l'intérêt serait plutôt d'approfondir l'application de la proposition architecturale d'ISA- 95 telle que présentée dans la partie 6. Au final, la présente recherche tend à influencer l'attention de la littérature vers les enjeux organisationnels lorsqu'il est question d'interconnectivité

chez les PME manufacturières. Au niveau méthodologique, la recherche contribue à enrichir les cas d'utilisation de l'analyse bibliométrique de co-occurrence pour la réalisation de revue de littérature.

### **7.3. - Perspectives**

La recherche met en lumière l'importance pour la PME manufacturière des aspects organisationnels de l'interconnectivité. Il serait intéressant d'approfondir les recherches sur l'importance de l'accompagnement et de la relation d'affaires dans la mise en œuvre de l'interconnectivité dans la PME manufacturière.

L'accroissement récent de l'utilisation de l'intelligence artificielle, avec entre autres les grands modèles de langage, ouvre de nouvelles perspectives. La recherche a d'ailleurs révélé l'utilisation de l'intelligence artificielle dans les outils d'interconnectivité. Il serait intéressant de voir comment l'intelligence artificielle pourrait aider à faciliter encore plus l'interconnectivité des systèmes dans les PME manufacturières.

Il serait possible éventuellement de remettre en question l'intérêt du modèle de données du standard ISA- 95 de manière plus large. Est-ce qu'il est toujours d'intérêt d'avoir des standards qui définissent des modèles communs de données pour l'interconnectivité? Est-ce que les possibilités que laissent entrevoir l'intelligence artificielle remettent aussi en question l'intérêt d'un standard qui uniformise le modèle de données? Ou est-ce qu'au contraire, l'utilisation de l'intelligence artificielle pourrait venir faire pression pour favoriser l'uniformisation des données? Est-ce qu'il serait plus d'intérêt de mettre des efforts à simplifier le travail de la génération d'interconnexion par l'intelligence artificielle avec des standards de définition des interfaces?

Aussi, la faiblesse de la présence de la proposition architecturale de la partie six d'ISA- 95 dans la littérature est entrée en contradiction avec la forte présence de son utilisation dans les solutions de l'industrie. Il serait intéressant d'évaluer les potentiels de gain au niveau de la flexibilité, de la portabilité et de l'adaptabilité de l'environnement informationnel. De plus, il est difficile de monétiser des gains liés à la mise en place d'une architecture informationnelle structurée.

## BIBLIOGRAPHIE

- Agostinho, Carlos; Almeida, B.; Nuñez-Ariño, M. J.; Jardim-Gonçalves, Ricardo (2009) Interoperability and standards: The way for innovative design in networked working environments. In : CIRP Design Conference, p. 139–146. En ligne : <https://app.readcube.com/library/560be1cf-c047-4627-8bb0-95219e404e20/item/b6411fb5-28ad-4d12-aa19-51f274c1d35b>.
- Allen, Dell K.; Bryan, Jeffrey D. (1986) Architecture for Computer-Integrated Manufacturing. In : CIRP Annals, vol. 35, p. 351–354.
- Anastasiou, Maria; Berre, Arne-Jørgen; Elvesæter, Brian; Figay, Nicolas; Garcia, Oscar; Greiner, Ulrike et al. (2006) ATHENA Interoperability Framework (AIF).
- Aria, Massimo (2021) Bibliometrix: Data Importing and Converting. En ligne : <https://www.bibliometrix.org/vignettes/Data-Importing-and-Converting.html>, consulté le 9 juin 2023.
- Aria, Massimo; Cuccurullo, Corrado (2017) bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. In : Journal of Informetrics, vol. 11, n° 4, p. 959–975. DOI: 10.1016/j.joi.2017.08.007.
- Banker, Rajiv D.; Davis, Gordon B.; Slaughter, Sandra (1998) Software Development Practices, Software Complexity, and Software Maintenance Performance: a Field Study. In : Management Science, vol. 44, p. 433–450.
- Bass, Len; Clements, Paul 1955; Kazman, Rick 1958 (2013) Software architecture in practice. 3ème édition. Upper Saddle River, NJ : Addison-Wesley (SEI series in software engineering).
- Bauer, Wilhelm; Hämmerle, Moritz; Schlund, Sebastian; Vocke, Christian (2015) Transforming to a Hyper-connected Society and Economy – Towards an “Industry 4.0”. In : Procedia Manufacturing, vol. 3, p. 417–424. DOI: 10.1016/j.promfg.2015.07.200.
- Berre, Arne-Jørgen; Elvesæter, Brian; Figay, Nicolas; Guglielmina, Claudia; Johnsen, Svein G.; Karlsen, Dag et al. (2007) The ATHENA Interoperability Framework.

- In : Ricardo J. Gonçalves, Jörg P. Müller, Kai Mertins et Martin Zelm, coord.: Enterprise Interoperability II. London: Springer London, p. 569–580.
- Brunswicker, Sabine; Vanhaverbeke, Wim (2015) Open Innovation in Small and Medium-Sized Enterprises (SMEs): External Knowledge Sourcing Strategies and Internal Organizational Facilitators. In : Journal of Small Business Management, vol. 53, n° 4, p. 1241–1263. DOI: 10.1111/jsbm.12120.
- Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) (2016) Industrie 4.0. En ligne : <https://www.bmbf.de/bmbf/de/forschung/digitale-wirtschaft-und-gesellschaft/industrie-4-0/industrie-4-0>, consulté le 24 février 2024.
- Chohan, B. S.; Xu, X.; Lu, Yuqian (2022) MES Dynamic interoperability for SMEs in the Factory of the Future perspective. In : Procedia CIRP, vol. 107, p. 1329–1335. DOI: 10.1016/j.procir.2022.05.153.
- Clements, Paul 1955 (2011) Documenting software architectures : views and beyond. 2nd ed. 1 online resource (xxxix, 537 pages) : illustrations. Upper Saddle River, NJ : Addison-Wesley (SEI series in software engineering). En ligne : <http://www.myilibrary.com?id=276866>.
- CNIMI (2025) Centre national intégré du manufacturier intelligent. En ligne : <https://cnimi.ca/>, consulté le 2025.
- Cui, Y.; Kara, S.; Chan, K. C. (2020) Manufacturing big data ecosystem: A systematic literature review. In : Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, vol. 62. DOI: 10.1016/j.rcim.2019.101861.
- Da Xu, Li; Xu, Eric L.; Li, Ling (2018) Industry 4.0: state of the art and future trends. In : International Journal of Production Research, vol. 56, n° 8, p. 2941–2962. DOI: 10.1080/00207543.2018.1444806.
- Ding, K.; Fan, L. Q. (2022) Architecture, operation, and implementation for Blockchain-driven turnkey project under I4.0 workshop based on RAMI 4.0. In : Computers and Industrial Engineering, vol. 173. DOI: 10.1016/j.cie.2022.108737.

- Donthu, N.; Kumar, S.; Mukherjee, D.; Pandey, N.; Lim, W. M. (2021) How to conduct a bibliometric analysis: An overview and guidelines. In : Journal of Business Research, vol. 133, p. 285–296. DOI: 10.1016/j.jbusres.2021.04.070.
- Elsevier (2020) What are Scopus Field Codes? (Scopus: Access and use Support Center).  
En ligne : [https://service.elsevier.com/app/answers/detail/a\\_id/11236/supporthub/scopus/kw/What+are+Scopus+Field+Codes/](https://service.elsevier.com/app/answers/detail/a_id/11236/supporthub/scopus/kw/What+are+Scopus+Field+Codes/).
- Elsevier (2022) Scopus Fact Sheet. Elsevier, éd., consulté le 9 juin 2023.
- Elsevier (2023) Scopus : Comprehensive, multidisciplinary, trusted abstract and citation database. En ligne : <https://www.elsevier.com/en-in/products/scopus>, consulté le 9 juin 2023.
- European Commission (2004) European interoperability framework for pan-European e-government services : Publications Office.
- European Commission (2017) New European interoperability framework – Promoting seamless services and data flows for European public administrations : Publications Office.
- European Commission (2020) User guide to the SME definition : Publications Office.
- European Commission (2022) Digital Economy and Society Index (DESI) 2022.
- Ferreira, Gabriel Ferraz; Stéfani, Kelly Cristina (2021) A Global Bibliometric Analysis of Hallux Valgus Research (1999-2019). In : The Journal of Foot and Ankle Surgery, vol. 60, n° 3, p. 501–506. DOI: 10.1053/j.jfas.2020.09.016.
- Ferreira, Jose; Beca, Miguel Ferro de; Agostinho, Carlos; Nunez, Maria Jose; Jardim-Gonçalves, Ricardo (2013) Standard Blueprints for Interoperability in Factories of the Future (FoF). In : IFAC Proceedings Volumes, vol. 46, n° 9, p. 1322–1327. DOI: 10.3182/20130619-3-RU-3018.00427.
- Ferreira, Jose; Lopes, F.; Ghimire, S.; Doumeingts, G.; Agostinho, Carlos; Jardim-Gonçalves, Ricardo (2018) Cyber-Physical Production Systems to Monitor the Polishing Process of Cutlery Production. In : International Conference on Intelligent Systems, p. 926–933. DOI: 10.1109/is.2018.8710582.

- Forth, Patrick; Reichert, Tom; Laubier, Romain de; Chakraborty, Saibal (2020) Flipping the Odds of Digital Transformation Success. Boston Consulting Group (BCG), éd. En ligne : <https://www.bcg.com/publications/2020/increasing-odds-of-success-in-digital-transformation>.
- Frank, Alejandro Germán; Dalenogare, Lucas Santos; Ayala, Néstor Fabián (2019) Industry 4.0 technologies: Implementation patterns in manufacturing companies. In : *International Journal of Production Economics*, vol. 210, p. 15–26. DOI: 10.1016/j.ijpe.2019.01.004.
- Frimousse, Soufyane; Peretti, Jean-Marie (2020) Produire du savoir et de l'action. Le vade-mecum du dirigeant-chercheur. Caen : EMS Editions (Académie des Sciences de Management de Paris). En ligne : <https://www.cairn.info/produire-du-savoir-et-de-l-action--9782376873471.htm>.
- Genest, Marie Charbonneau; Gamache, Sébastien (2020) Prerequisites for the Implementation of Industry 4.0 in Manufacturing SMEs. In : *Procedia Manufacturing*, vol. 51, p. 1215–1220. DOI: 10.1016/j.promfg.2020.10.170.
- German Electrical and Electronic Manufacturers' Association (ZVEI); Verein Deutscher Ingenieure (VDI); Verband der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik (VDE) (2015) Reference Architecture Model Industrie 4.0 (RAMI 4.0). Status Report.
- Ghobakhloo, Morteza; Iranmanesh, Mohammad (2021) Digital transformation success under Industry 4.0: a strategic guideline for manufacturing SMEs. In : *Journal of Manufacturing Technology Management*, vol. 32, n° 8, p. 1533–1556. DOI: 10.1108/JMTM-11-2020-0455.
- Guttridge, K.; Comes, A.; Ray, S. (2023a) Critical Capabilities for Integration Platform as a Service. Gartner, éd. En ligne : <https://www.gartner.com/en/documents/4142799>, consulté le 24 février 2024.

- Guttridge, K.; Comes, A.; Ray, S. (2023b) Magic quadrant for Integration Platform as a Service. Gartner, éd. En ligne : <https://www.gartner.com/en/documents/5198963>, consulté le 24 février 2024.
- Heidel, Roland; Hoffmeister, Michael; Hankel, Martin; Döbrich, Udo (2017) RAMI 4.0 (Reference Architecture Model Industrie 4.0). Standardization Council Industrie 4.0. En ligne : <https://www.sci40.com/english/thematic-fields/rami4-0/>, consulté le 24 février 2024.
- Hohpe, Gregor; Woolf, Bobby (2003) Enterprise Integration Patterns : Designing, Building, and Deploying Messaging Solutions. 1 online resource (736 pages) : illustrations. Boston, Old Tappan : Addison Wesley Professional Pearson Education [distributeur] (Addison-Wesley Signature Ser). En ligne : <https://www.safaribooksonline.com/library/view//0321200683/?ar?orppq&email=^u>.
- Horváth, Dóra; Szabó, Roland Zs. (2019) Driving forces and barriers of Industry 4.0: Do multinational and small and medium-sized companies have equal opportunities? In : Technological Forecasting and Social Change, vol. 146, p. 119–132. DOI: 10.1016/j.techfore.2019.05.021.
- Industrial Value Chain Initiative (IVI) (2016) Industrial Value Chain Reference Architecture (IVRA).
- Industrial Value Chain Initiative (IVI) (2018) Strategic Implementation framework of industrial value chain for connected industries. IVRA Next.
- Innovation, Sciences et Développement économique Canada (ISDEC) (2022) PRINCIPALES STATISTIQUES RELATIVES AUX PETITES ENTREPRISES.
- Innovation, Sciences et Développement économique Canada (ISDEC) (2023) Principales statistiques relatives aux petites entreprises 2023. En ligne : <https://ised-isde.canada.ca/site/recherche-statistique-pme/fr/principales-statistiques-relatives-aux-petites-entreprises/principales-statistiques-relatives-aux-petites-entreprises-2023>, consulté le 24 février 2024.

- International Electrotechnical Commission (IEC) (2017) Smart manufacturing - Reference architecture model industry 4.0 (RAMI4.0) (IEC PAS 63088:2017).
- International Organization for Standardization (ISO) (2017) ISO/IEC/IEEE International Standard - Systems and software engineering--Vocabulary (ISO/IEC/IEEE 24765:2017(E)).
- International Organization for Standardization (ISO) (2019) ISO/IEC/IEEE International Standard - Software, systems and enterprise -- Architecture processes (ISO/IEC/IEEE 42020:2019(E)).
- International Organization for Standardization (ISO) (2022) IEEE/ISO/IEC International Standard for Software, systems and enterprise--Architecture description (ISO/IEC/IEEE 42010:2022(E)).
- International Organization for Standardization (ISO) (2023a) ISO/IEC International Standard - Information technology - Cloud computing. Part 1: Vocabulary (ISO/IEC 22123-1:2023).
- International Organization for Standardization (ISO) (2023b) ISO/IEC International Standards - Systems and software engineering - Systems and software Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE). Product quality model (ISO/IEC 25010:2023).
- International Society of Automation (ISA) (2001) Batch Control – Part 2: Data Structures and Guidelines for Languages (ISA-88.00.02-2001).
- International Society of Automation (ISA) (2003) Batch Control – Part 3: General and Site Recipe Models and Representation (ISA-88.00.03-2003).
- International Society of Automation (ISA) (2006) Batch Control – Part 4: Batch Production Records (ANSI/ISA-88.00.04-2006).
- International Society of Automation (ISA) (2010a) Enterprise-Control System Integration - Part 1: Models and Terminology (ANSI/ISA-95.00.01-2010 (IEC 62264-1 Mod)).
- International Society of Automation (ISA) (2010b) Batch Control Part 1 : Models And Terminology (ANSI/ISA-88.00.01-2010).

- International Society of Automation (ISA) (2013a) Enterprise-control system integration  
- Part 1: Models and terminology (ISO/IEC 62264-1:2013).
- International Society of Automation (ISA) (2013b) Enterprise-Control System Integration  
- Part 3: Activity Models of Manufacturing Operations Management (ANSI/ISA-95.00.03-2013).
- International Society of Automation (ISA) (2014) Enterprise-Control System Integration-  
-Part 6: Messaging Service Model (ANSI/ISA-95.00.06-2014).
- International Society of Automation (ISA) (2017) Enterprise-Control System Integration-  
Part 7: Alias Service Model (ANSI/ISA-95.00.07-2017).
- International Society of Automation (ISA) (2018a) Enterprise-Control System Integration  
- Part 2: Objects and Attributes for Enterprise-Control System Integration  
(ANSI/ISA-95.00.02-2018).
- International Society of Automation (ISA) (2018b) Enterprise-Control System Integration  
- Part 4: Objects and Attributes for Manufacturing Operations Management  
Integration (ANSI/ISA-95.00.04-2018).
- International Society of Automation (ISA) (2018c) Enterprise-Control System Integration  
- Part 5: Business-to-Manufacturing Transactions (ANSI/ISA-95.00.05-2018).
- International Society of Automation (ISA) (2020) Enterprise-Control System Integration  
– Part 8: Information Exchange Profiles (ANSI/ISA-95.00.08-2020).
- Jardim-Gonçalves, Ricardo; Agostinho, Carlos; Sarraipa, J.; Grilóc, A.; Mendonca, J. P.  
(2013) Reference framework for enhanced interoperable collaborative networks in  
industrial organisations. In : International Journal of Computer Integrated  
Manufacturing, vol. 26, n° 1-2, p. 166–182. DOI:  
10.1080/0951192x.2012.687130.
- Jones, Albert T.; Barkmeyer, Edward J.; Davis, Wayne J. (1989) Issues in the design and  
implementation of a system architecture for computer integrated manufacturing.  
In : International Journal of Computer Integrated Manufacturing, vol. 2, p. 65–76.
- Kagermann, Henning; Lukas, Wolf-Dieter; Wahlster, Wolfgang (2011) Industrie 4.0: Mit  
dem Internet der Dinge auf dem Weg zur 4. industriellen Revolution.

- In : ingenieur.de - Jobbörse und Nachrichtenportal für Ingenieureingenieur.de - Jobbörse und Nachrichtenportal für Ingenieure, 2011. En ligne : <https://www.ingenieur.de/technik/fachbereiche/produktion/industrie-40-mit-internet-dinge-weg-4-industriellen-revolution/>, consulté le 24 février 2024.
- Kassem M., Tagliabue L.C., Amor R., Sreckovic M., Chassiakos A., D. Calvetti, et al., eds. (2023) INTEROPERABILITY FRAMEWORK FOR SUBSEA SENSORS DATA. Proceedings of the European Conference on Computing in Construction : European Council on Computing in Construction (EC3). En ligne : <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85177225563&doi=10.35490%2fEC3.2023.259&partnerID=40&md5=f2b5c45bd457bfa87ca170bb6df11a82>.
- Kohler, Dorothée; Weisz, Jean-Daniel; Ehrhart, Katharina. (2016) Industrie 4.0 : les défis de la transformation numérique du modèle industriel allemand. Paris : La Documentation française. En ligne : [http://bvbr.bib-bvb.de:8991/F?func=service&doc\\_library=BVB01&local\\_base=BVB01&doc\\_number=029118250&line\\_number=0001&func\\_code=DB\\_RECORDS&service\\_type=MEDIA](http://bvbr.bib-bvb.de:8991/F?func=service&doc_library=BVB01&local_base=BVB01&doc_number=029118250&line_number=0001&func_code=DB_RECORDS&service_type=MEDIA).
- Kusak, David (2010) Comparison of Enterprise Application Integration Platforms. Master's thesis. Charles University, Prague. Faculty of Mathematics and Physics.
- Lazaro, O.; Rooker, M.; Laibarr, B.; Ružić, A.; Nemeč, B.; Gonzalez, A. (2019) Open automation framework for cognitive manufacturing. In : Taylor & Francis Group, coord. (The Digital Shopfloor: Industrial Automation in the Industry 4.0 Era Performance Analysis and Applications), p. 27–70. En ligne : <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85106627161&partnerID=40&md5=f78b3abf413733febda387c26aeb749b>.
- Li, C.; Mantravadi, S.; Moller, C. (2020) AAU Open Source MES Architecture for Smart Factories-Exploiting ISA 95. In : IEEE 18th International Conference on Industrial Informatics (INDIN), 2020-July, p. 369–373. DOI: 10.1109/indin45582.2020.9442130.

- Li, Hong; Williams, Theodore J. (1997) Some extensions to the Purdue Enterprise Reference Architecture (PERA): I. Explaining the Purdue architecture and the Purdue methodology using the axioms of engineering design. In : *Computers in Industry*, vol. 34, n° 3, p. 247–259. DOI: 10.1016/S0166-3615(97)00047-X.
- Lu, Yang (2017) Industry 4.0: A survey on technologies, applications and open research issues. In : *Journal of Industrial Information Integration*, vol. 6, p. 1–10. DOI: 10.1016/j.jii.2017.04.005.
- Macaskill, J. A.; Grobbelaar, S. S. (2021) A scoping review investigating the presence and evolution of literature focusing on regional innovation clusters and systems. In : *IEEE 18th International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*. DOI: 10.1109/ict51655.2021.9584699.
- Manufacturing Enterprise Solutions Association (MESA) (2020) Business To Manufacturing Markup Language (B2MML) V7.0.0 (Version 7). En ligne : <https://github.com/MESAInternational/B2MML-BatchML>, consulté le 9 juin 2023.
- Martell, F.; López, J. M.; Sánchez, I. Y.; Paredes, C. A.; Pisano, E. (2023) Evaluation of the degree of automation and digitalization using a diagnostic and analysis tool for a methodological implementation of Industry 4.0. In : *Computers and Industrial Engineering*, vol. 177. DOI: 10.1016/j.cie.2023.109097.
- Martin, Hankel; Rexroth, Bosch (2015) Industrie 4.0: The Reference Architectural Model Industrie 4.0 (RAMI 4.0). German Electrical and Electronic Manufacturers' Association (ZVEI).
- Masood, Tariq; Sonntag, Paul (2020) Industry 4.0: Adoption challenges and benefits for SMEs. In : *Computers in Industry*, vol. 121, p. 103261. DOI: 10.1016/j.compind.2020.103261.
- Memon, Mumtaz; Ting, Hiram; Cheah, Jun-Hwa; Ramayah, T.; Chuah, Francis; Cham, Tat-Huei (2020) Sample Size for Survey Research: Review and Recommendations, vol. 4, p. i–xx. DOI: 10.47263/JASEM.4(2)01.

- Mittal, Sameer; Khan, Muztoba Ahmad; Romero, David; Wuest, Thorsten (2018) A critical review of smart manufacturing & Industry 4.0 maturity models: Implications for small and medium-sized enterprises (SMEs). In : *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 49, p. 194–214. DOI: 10.1016/j.jmsy.2018.10.005.
- Moeuf, Alexandre; Pellerin, Robert; Lamouri, Samir; Tamayo-Giraldo, Simon; Barbaray, Rodolphe (2018) The industrial management of SMEs in the era of Industry 4.0. In : *International Journal of Production Research*, vol. 56, n° 3, p. 1118–1136. DOI: 10.1080/00207543.2017.1372647.
- Molina, E.; Lazaro, O.; Sepulcre, M.; Gozalvez, J.; Passarella, A.; Raptis, T. P. et al. (2017) The AUTOWARE framework and requirements for the cognitive digital automation. In : *Advances in Information and Communication Technology (IFIP)*, vol. 506, p. 107–117. DOI: 10.1007/978-3-319-65151-4\_10.
- Mourad, M.; Nassehi, A.; Newman, S.; Schaefer, D. (2017) C-MARS-ABM: A deployment approach for cloud manufacturing. In : *International Conference on Manufacturing Research (ICMR)*, vol. 6, p. 213–218. DOI: 10.3233/978-1-61499-792-4-213.
- Mourad, M. H.; Nassehi, A.; Schaefer, D.; Newman, S. T. (2020) Assessment of interoperability in cloud manufacturing. In : *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 61. DOI: 10.1016/j.rcim.2019.101832.
- Müller, J. M.; Voigt, K.-I. (2018) Sustainable Industrial Value Creation in SMEs: A Comparison between Industry 4.0 and Made in China 2025. In : *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing - Green Technology*, vol. 5, n° 5, p. 659–670. DOI: 10.1007/s40684-018-0056-z.
- Murphy, Brett; Lin, Shi-Wan; Martin, Robert (2023) Body of Knowledge. Industrial Internet Reference Architecture (IIRA). Avec la collaboration de JP Leblanc. Industrial Internet Consortium (IIC), éd. Industrial Internet Consortium (IIC). En ligne : <https://hub.iiconsortium.org/iira>, consulté le 24 février 2024.
- Nakagawa, E. Y.; Antonino, P. O.; Schnicke, F.; Capilla, R.; Kuhn, T.; Liggesmeyer, P. (2021) Industry 4.0 reference architectures: State of the art and future trends.

- In : Computers and Industrial Engineering, vol. 156. DOI: 10.1016/j.cie.2021.107241.
- Nishioka, Yasuyuki (2017) Industrial Value Chain Reference Architecture. Industrial Value Chain Initiative (IVI). Hannover Messe 2017.
- Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) (2019) OECD SME and Entrepreneurship Outlook 2019. Paris.
- Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) (2023) OECD SME and Entrepreneurship Outlook 2023. En ligne : <https://www.oecd-ilibrary.org/content/publication/342b8564-en>.
- Page, Matthew J.; McKenzie, Joanne E.; Bossuyt, Patrick M.; Boutron, Isabelle; Hoffmann, Tammy C.; Mulrow, Cynthia D. et al. (2021) The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. In : Systematic Reviews, vol. 10, n° 1, p. 89. DOI: 10.1186/s13643-021-01626-4.
- Park, Y.; Woo, J.; Choi, S. (2020) A Cloud-based Digital Twin Manufacturing System based on an Interoperable Data Schema for Smart Manufacturing. In : International Journal of Computer Integrated Manufacturing, vol. 33, n° 12, p. 1259–1276. DOI: 10.1080/0951192x.2020.1815850.
- Philbeck, Thomas; Davis, Nicholas (2024) THE FOURTH INDUSTRIAL REVOLUTION. SHAPING A NEW ERA. In : Journal of International Affairs, vol. 72, 24 février 2024, n° 1, p. 17–22. En ligne : <https://www-jstor-org.biblioproxy.uqtr.ca/stable/26588339>.
- Plattform Industrie 4.0 (2018) Reference Architectural Model Industrie 4.0 (RAMI4.0) - An Introduction.
- Poba-Nzaou, Placide (2008) Processus d'adoption et réduction du risque d'implantation des PGI dans les PME : une étude de cas multiples. Université du Québec à Trois-Rivières (UQTR). En ligne : <http://depote.uqtr.ca/id/eprint/1877/1/030105355.pdf>.

- Polczer, Philip Florian (2021) Towards Model-Driven Vertical Integration: Using IEC 62264 and REA to facilitate real-time data exchange between manufacturing and enterprise systems. Institut für Information Systems Engineering.
- Printz, Jacques. (2020) System architecture and complexity : contribution of systems of systems to systems thinking. Chapter 3. The Definitions of Systemics: Integration and Interoperability of Systems. 1 online resource. London, Hoboken : ISTE Ltd.; Wiley (Systems of systems complexity set, v. 2). En ligne : <https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&scope=site&db=nlabk&db=nlabk&AN=2530922>.
- Qureshi, K. A.; Mohammed, W. M.; Ferrer, B. R.; Lastra, J.L.M.; Agostinho, Carlos (2017) Legacy systems interactions with the supply chain through the C2NET cloud-based platform. In : IEEE 18th International Conference on Industrial Informatics (INDIN), p. 725–731. DOI: 10.1109/indin.2017.8104862.
- Rienstra, W. D. (2024) From Cloud to Ground : Assessing Integration Platform-as-a-Service (iPaaS) Against On-Premise Integration Platforms. En ligne : <http://essay.utwente.nl/99581/>.
- S. Gaiardelli; S. Spellini; M. Panato; M. Lora; F. Fummi (2022) A Software Architecture to Control Service-Oriented Manufacturing Systems: 2022 Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE). 2022 Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE), p. 40–43.
- S. Wei; J. Hu; Y. Cheng; Y. Ma; Y. Yu (2017) The essential elements of intelligent Manufacturing System Architecture: 2017 13th IEEE Conference on Automation Science and Engineering (CASE). 2017 13th IEEE Conference on Automation Science and Engineering (CASE), p. 1006–1011.
- Scimago Lab (2023) Scimago Journal & Country Rank. En ligne : <https://www.scimagojr.com/countryrank.php?order=itp&ord=desc&year=2023>, consulté le 24 février 2024.
- Sous-traitance industrielle Québec (STIQ) (2023) Baromètre industriel québécois. 14e édition.

- Sowell, P. Kathie (2006) The C4ISR architecture framework: history, status, and plans for evolution. MITRE CORP MCLEAN VA.
- Stentoft, Jan; Jensen, Kent Wickstrøm; Philipsen, Kristian; Haug, Anders (2019) Drivers and Barriers for Industry 4.0 Readiness and Practice: A SME Perspective with Empirical Evidence. In : Hawaii International Conference on System Sciences, 2019-January, p. 5155–5164. DOI: 10.24251/hicss.2019.619.
- Tortorella, Guilherme Luz; Fettermann, Diego (2018) Implementation of Industry 4.0 and lean production in Brazilian manufacturing companies. In : International Journal of Production Research, vol. 56, n° 8, p. 2975–2987. DOI: 10.1080/00207543.2017.1391420.
- Wadhwa, Rhythm Suren (2012) Flexibility in manufacturing automation: A living lab case study of Norwegian metalcasting SMEs. In : Journal of Manufacturing Systems, vol. 31, n° 4, p. 444–454. DOI: 10.1016/j.jmsy.2012.07.008.
- Wagner, P.; Hansch, G.; Konrad, C.; John, K.-H.; Bauer, J.; Franke, J. (2020) Applicability of Security Standards for Operational Technology by SMEs and Large Enterprises. In : International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, ETFA, 2020-September, p. 1544–1551. DOI: 10.1109/etfa46521.2020.9212126.
- Williams, L. G.; Smith, C. U. (1998) Performance evaluation of software architectures. Proceedings of the 1st International Workshop on Software and Performance, WOSP 1998: Association for Computing Machinery, Inc, p. 164–177. En ligne : <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84944092741&doi=10.1145%2f287318.287351&partnerID=40&md5=d61592a7afd814dd177cfa2d490ca4fd>.
- Williams, Theodore J. (1993) The Purdue Enterprise Reference Architecture. In : IFAC Proceedings Volumes, vol. 26, n° 2, Part 4, p. 559–564. DOI: 10.1016/S1474-6670(17)48532-6.
- Won, Jeong Yeon; Park, Min Jae (2020) Smart factory adoption in small and medium-sized enterprises: Empirical evidence of manufacturing industry in Korea.

In : Technological Forecasting and Social Change, vol. 157, p. 120117. DOI: 10.1016/j.techfore.2020.120117.

Wuest, Thorsten; Thoben, Klaus-Dieter (2012) Information Management for Manufacturing SMEs. In : Advances in Information and Communication Technology (IFIP), p. 488–495. DOI: 10.1007/978-3-642-33980-6\_53.

Zhu, F.; Li, X.; Valavi, E.; Iansiti, M. (2021) Network interconnectivity and entry into platform markets. In : Information Systems Research, vol. 32, n° 3, p. 1009–1024. DOI: 10.1287/ISRE.2021.1010.

Zyoud, S. H.; Waring, W. S.; Al-Jabi, S. W.; Sweileh, W. M. (2017) Global cocaine intoxication research trends during 1975-2015: A bibliometric analysis of Web of Science publications. In : Substance Abuse Treatment, Prevention, and Policy, vol. 12, n° 1. DOI: 10.1186/s13011-017-0090-9.

## ANNEXE 1- MATRICE D'ANALYSE DES PUBLICATIONS

**Tableau 7.1 - Matrice d'analyse des publications recensées**

Auteurs	Requête	Titre	Proposition	Relation avec ISA- 95 ou la standardisation	Relation avec les PME
(Agostinho et al. 2009)	Manufacture + Interoperabilty + Standard + SME	Interoperability and standards: The way for innovative design in networked working environments	Recommandations et cadre pour l'adoption de la norme ISO 10303-236 dans les PME de l'industrie de l'ameublement.	Utilisation d'une norme différente dans un contexte similaire, mais avec un champ d'application différent.	Recommandations et cadre pour l'adoption de la norme ISO 10303-236 dans les PME de l'industrie de l'ameublement.
(Chohan, Xu et Lu 2022)	ISA- 95 + SME	MES Dynamic interoperability for SMEs in the Factory of the Future perspective	Positionner le MES avec un rôle central dans une architecture de microservices pour l'interconnectivité	Utilise la norme ISA- 95 pour <b>expliquer</b> et positionner la fonctionnalité ou la technologie dans la <b>pyramide d'automatisation</b> .	<b>Tenir compte du contexte des PME</b> dans leur proposition.
(Ding et Fan 2022)	Manufacture + Interoperabilty + Standard + SME	Architecture, operation, and implementation for Blockchain-driven turnkey project under I4.0 workshop based on RAMI 4.0	Modèle d'architecture d'échange de données utilisant le réseau Blockchain.	Utilise la norme ISA- 95 pour <b>expliquer</b> et positionner la fonctionnalité ou la technologie dans la <b>pyramide d'automatisation</b> .  Utilisation de RAMI 4.0 pour expliquer et positionner le projet. Une dimension de RAMI 4.0 est composée avec ISO-62264-1, qui est ISA- 95.1.  Plaide en faveur d'une plus grande normalisation afin de faciliter le déploiement de projets clés en main.	<b>Tenir compte du contexte des PME</b> dans leur proposition.  L'objectif est d'accélérer l'intégration de projets clés en main dans les PME.
(Ferreira et al. 2013)	Manufacture + Interoperabilty + Standard + SME	Standard blueprints for interoperability in factories of the future (FoF)	Étendre le plan directeur des partenaires et des produits pour faciliter la collaboration multientreprise dans le réseau de fabrication.	<b>Utilise la proposition ISA- 95.</b>  Extension de la norme ISA- 95, en utilisant le modèle de données ISA- 95 comme base pour les plans. Problématique similaire, dans un contexte similaire, mais dans un autre champ d'application.	<b>Tenir compte du contexte des PME</b> dans leur proposition.

**Tableau 7.1 - Matrice d'analyse des publications recensées (suite)**

Auteurs	Requête	Titre	Proposition	Relation avec ISA- 95 ou la standardisation	Relation avec les PME
(Ferreira et al. 2018)	Manufacture + Interoperabilty + Standard + SME	Cyber-Physical Production Systems to Monitor the Polishing Process of Cutlery Production	Expérimenter le déploiement du composant CPPS dans un contexte réel de PME. Valider s'il peut y avoir une amélioration de la productivité.	<b>Aucune.</b>  Champ d'application corrélatif.	<b>Tenir compte du contexte des PME</b> dans leur proposition.  Expérimentation réalisée dans un contexte réel de PME.
(Jardim-Gonçalves et al. 2013)	Manufacture + Automatisation + Standard + SME  Manufacture + Interoperabilty + Standard + SME	Reference framework for enhanced interoperable collaborative networks in industrial organisations	Proposer un cadre pour accélérer et faciliter l'adoption de la norme d'interconnectivité et du protocole d'application STEP dans les PME de l'industrie de l'ameublement. Envisager des réseaux de collaboration extraorganisationnels à travers la chaîne d'approvisionnement.	<b>Utilisation d'une norme différente</b> dans un contexte similaire, mais dans un <b>champ d'application différent.</b>  Protocole STEP utilisé pour échanger des données sur les produits.	<b>Tenir compte du contexte des PME</b> dans leur proposition.  Solution <b>conçue pour les PME</b> , dans un secteur spécifique.
(Lazaro et al. 2019)	ISA- 95 + SME	Open automation framework for cognitive manufacturing	Cadre ouvert pour l'intégration d'une plateforme ouverte pour l'avancement de l'atelier autonome	Utilise la norme ISA- 95 pour <b>expliquer</b> et positionner la fonctionnalité ou la technologie dans la <b>pyramide d'automatisation.</b>	<b>Tenir compte du contexte des PME</b> dans leur proposition.
(Li, Mantravadi et Moller 2020)	ISA- 95 + SME  Manufacture + Automatisation + Standard + SME	AAU Open Source MES Architecture for Smart Factories- Exploiting ISA 95	Un MES open-source conçu pour la gestion des opérations de fabrication des PME	<b>Utilise la proposition ISA- 95.</b>  Indique qu'aucun système MES n'est conforme au modèle fonctionnel et au modèle de données ISA- 95.	<b>Tenir compte du contexte des PME</b> dans leur proposition.  Solution <b>conçue pour les PME.</b>
(Martell et al. 2023)	ISA- 95 + SME	Evaluation of the degree of automation and digitalization using a diagnostic and analysis tool for a methodological implementation of Industry 4.0	Un outil de diagnostic pour mesurer le degré de préparation à la mise en œuvre de l'industrie 4.0	Utilise la norme ISA- 95 pour <b>expliquer</b> et positionner la fonctionnalité ou la technologie dans la <b>pyramide d'automatisation.</b>	<b>Tenir compte du contexte des PME</b> dans leur proposition.  Solution <b>conçue pour les PME.</b>

**Tableau 7.1 - Matrice d'analyse des publications recensées (suite)**

Auteurs	Requête	Titre	Proposition	Relation avec ISA- 95 ou la standardisation	Relation avec les PME
(Molina et al. 2017)	ISA- 95 + SME	The AUTOWARE framework and requirements for the cognitive digital automation	Plate-forme ouverte pour les services de fabrication cognitive.	Utilise la norme ISA- 95 pour <b>expliquer</b> et positionner la fonctionnalité ou la technologie dans la <b>pyramide d'automatisation</b> .	<b>Tenir compte du contexte des PME</b> dans leur proposition.
(Mourad et al., 2017)	Manufacture + Interoperability + Standard + SME	C-MARS-ABM: A deployment approach for cloud manufacturing	Identifier les paramètres clés permettant de déterminer si l'utilisation du cadre C-MARS est appropriée pour une PME.	<b>Utilisation de normes</b> dans un contexte similaire, mais dans un <b>champ d'application différent</b> .	<b>Tenir compte du contexte des PME</b> dans leur proposition.
(Mourad et al., 2020)	Manufacture + Interoperability + Standard + SME	Assessment of interoperability in cloud manufacturing	Un système interopérable de fabrication en nuage n'est pas nécessairement financièrement viable. Cela dépend des paramètres de conduite.	<b>Utilisation d'une norme différente</b> dans un contexte similaire, mais dans un <b>champ d'application différent</b> .  <b>Le langage STEP-NC est utilisé comme langage de communication standardisé.</b>	<b>Tenir compte du contexte des PME</b> dans leur proposition.
(Park, Woo et Choi 2020)	Manufacture + Interoperability + Standard + SME	A Cloud-based Digital Twin Manufacturing System based on an Interoperable Data Schema for Smart Manufacturing	Développement d'un modèle de données pour interconnecter les jumeaux numériques sur un système basé sur le cloud.	Utilisation de normes dans un contexte similaire, mais avec un champ d'application différent.  Utilisation de la norme NIST comme point de départ du modèle de données.  Utilisation d'un langage balisé standardisé pour matérialiser le modèle de données (FDIXML).  Envisage l'interaction avec un système conforme à la norme ISA- 95/B2MML.	<b>Tenir compte du contexte des PME</b> dans leur proposition.  <b>Solution déployée dans certaines PME coréennes.</b>

**Tableau 7.1 - Matrice d'analyse des publications recensées (suite)**

Auteurs	Requête	Titre	Proposition	Relation avec ISA- 95 ou la standardisation	Relation avec les PME
(Qureshi et al. 2017)	ISA- 95 + SME	Legacy systems interactions with the supply chain through the C2NET cloud-based platform	Plate-forme en nuage d'interopérabilité de la chaîne d'approvisionnement	Utilise la norme ISA- 95 pour <b>expliquer</b> et positionner la fonctionnalité ou la technologie dans la <b>pyramide d'automatisation</b> .  Utilise la norme ISA- 95 pour positionner la relation de ERP avec leur proposition.	<b>Tenir compte du contexte des PME</b> dans leur proposition.
(Wagner et al. 2020)	Manufacture + Automatisation + Standard + SME	Applicability of Security Standards for Operational Technology by SMEs and Large Enterprises	Évaluer les normes de sécurité pour les technologies opérationnelles applicables par les petites et moyennes entreprises ainsi que par les grandes entreprises manufacturières, et la manière dont leurs besoins individuels d'action peuvent être identifiés et pris en compte.	<b>Aucun.</b>  Ils ne couvrent pas le même champ d'application.	<b>Tenir compte du contexte des PME</b> dans leur proposition.

