

**Titre:** Feuille de route pour la mise en place de système cyber-physique  
Title: en PME : application dans une meunerie industrielle biologique

**Auteur:** Jean-Rémi Piat  
Author:

**Date:** 2021

**Type:** Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

**Référence:** Piat, J.-R. (2021). Feuille de route pour la mise en place de système cyber-physique en PME : application dans une meunerie industrielle biologique  
Citation: [Mémoire de maîtrise, Polytechnique Montréal]. PolyPublie.  
<https://publications.polymtl.ca/9152/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**  
Open Access document in PolyPublie

**URL de PolyPublie:** <https://publications.polymtl.ca/9152/>  
PolyPublie URL:

**Directeurs de recherche:** Christophe Danjou, & Bruno Agard  
Advisors:

**Programme:** Maîtrise recherche en génie industriel  
Program:

**POLYTECHNIQUE MONTRÉAL**

affiliée à l'Université de Montréal

**Feuille de route pour la mise en place de système cyber-physique en PME :  
application dans une meunerie industrielle biologique**

**JEAN-RÉMI PIAT**

Département de mathématique et de génie industriel

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

Génie industriel

Août 2021

# **POLYTECHNIQUE MONTRÉAL**

affiliée à l'Université de Montréal

Ce mémoire intitulé :

## **Feuille de route pour la mise en place de système cyber-physique en PME : application dans une meunerie industrielle biologique**

présenté par **Jean-Rémi PIAT**

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

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

**Mohamed-Salah OUALI**, président

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

**Bruno AGARD**, membre et codirecteur de recherche

**Vincent CHEUTET**, membre

## REMERCIEMENTS

J'adresse mes premiers remerciements à mon directeur de maîtrise, M. Christophe Danjou, et mon codirecteur, M. Bruno Agard, tous deux professeurs à Polytechnique Montréal. Ils m'ont accompagné et guidé tout au long de ce projet de maîtrise. Je les remercie pour leurs conseils, leur expérience, leur disponibilité et leur implication dans mon projet. Ce fut un privilège de collaborer avec ces deux professeurs dans le cadre d'une maîtrise. Merci à Bruno Agard de m'avoir accepté au sein du laboratoire d'intelligence des données (LID) de Polytechnique où j'ai eu l'occasion de partager avec d'autres élèves des problématiques des différents projets. Toute ma reconnaissance va aussi au ministère de l'agriculture, des pêcheries et de l'alimentation québécois (MAPAQ) pour le soutien financier dans le projet IA119053 sans lequel le projet n'aurait pu avoir lieu.

Une mention spéciale à Loïc Parrenin, membre du LID et doctorant travaillant chez le même partenaire industriel. Je le remercie pour m'avoir accompagné pendant toute ma maîtrise et pour tous les moments passés ensemble à résoudre des problématiques dans un environnement industriel.

Je remercie sincèrement les employés de La Milanaise, le partenaire industriel de ce projet de recherche, pour leur accueil et le temps passé ensemble. Je remercie particulièrement Robert Beauchemin, président de La Milanaise, qui me prenait en co-voiturage pour me rendre sur site et qui m'a fait confiance dans ce projet. Je le remercie aussi pour le partage de son expertise et de sa passion pour le métier de meunier qui m'a permis de m'investir pleinement dans le projet. J'adresse aussi un grand merci à Maxime Lecours, le consultant informatique de La Milanaise, pour son aide et son expertise dans les outils informatiques qui m'ont permis d'avancer dans mon projet.

Plus personnellement, je souhaite remercier mes parents, mon frère, ma sœur et toute ma famille pour leur soutien depuis la France, ils ont su me supporter pendant cette période Covid et tout au long de mes études. Un merci tout particulier à mes colocataires Lucas et Tristan pour toute cette aventure canadienne.

## RÉSUMÉ

L'industrie 4.0 est une stratégie basée sur les nouvelles technologies pour accroître les capacités des entreprises. Une des stratégies de l'industrie 4.0 est notamment de mettre en place des outils pour gérer et valoriser les données d'une entreprise. La valorisation des données permet de convertir les données acquises dans le cycle de vie des produits en des connaissances produisant de la valeur ajoutée. L'entreprise est ainsi capable d'améliorer ses performances industrielles avec un meilleur accès aux informations, une modification de l'organisation des processus et de meilleures prises de décision. La gestion des données est alors au centre des problématiques de l'entreprise qui doit être capable de collecter, transmettre, stocker, traiter, visualiser et appliquer ses données. Cette gestion nécessite que les sources de données et les systèmes de contrôle interopèrent entre eux. Ce besoin est notamment adressé par les nouvelles technologies de l'industrie 4.0, dont les systèmes cyber-physiques (CPS) qui permettent d'intégrer les technologies informatiques dans le monde physique. Cependant, le besoin et l'intégration des technologies dépendent de l'environnement de l'entreprise. Des approches et des méthodes ont été développées pour accompagner les différentes entreprises dans leur adoption des outils de l'industrie 4.0 mais certaines entreprises ont encore des difficultés.

Les petites et moyennes entreprises (PME) font partie des entreprises où l'adoption des nouvelles technologies dans leurs processus reste problématique. D'une part, les approches ne sont pas adaptées aux environnements particulièrement contraints des PME par rapport aux grandes entreprises. D'autre part, peu d'approches détaillent la mise en œuvre concrète des technologies dans un contexte industriel, et en particulier pour répondre aux problématiques d'interopérabilité et d'hétérogénéité des systèmes.

Ce mémoire propose une feuille de route pour mettre en place un système cyber-physique (CPS) en contexte de PME. Cette feuille de route décrit chacune des étapes nécessaires pour connecter l'ensemble des sources de données d'une entreprise et gérer ces données. Le CPS est le système central de cette architecture qui permet aux sources de données d'interopérer et qui fournit une infrastructure supportant la valorisation des données. Le CPS offre un accès aux informations et aux services à toutes les entités (humaines, machines et organisationnelles) en temps réel et de façon décentralisée. L'entreprise peut ainsi redéfinir l'organisation des processus et des systèmes et créer un système de pilotage plus réactif avec des prises de décisions basées sur les données.

Dans le but de construire cette feuille de route, une démarche scientifique basée sur des observations du terrain et des retours d'expérience a été réalisée. Un partenaire industriel a été impliqué pour comprendre les problématiques industrielles réelles et pour étudier les solutions présentes dans la littérature dans un contexte pratique. Ce partenaire est La Milanaise, une meunerie biologique de la région de Montréal.

La feuille de route proposée utilise une approche agile, une architecture orientée service (SOA) et des compétences jugées génériques pour pallier aux défis particuliers des PME. Les méthodes agiles s'appuient sur des cycles de développement courts avec des itérations de révisions. Ces méthodes sont très utilisées dans le développement informatique car elles permettent de répondre aux besoins de façon dynamique. Dans notre cas, elles permettront d'adapter les solutions aux contextes des PME. Plusieurs itérations ont été réalisées chez le partenaire industriel pour mettre en œuvre la feuille de route actuelle, qui a permis d'implanter un CPS dans un contexte de PME. Notre étude montre que la phase d'intégration des outils dans les processus est une étape difficile. L'implantation d'un CPS modifie les processus en offrant des capacités de surveillance et d'aide à la décision, ce qui implique des changements organisationnels, notamment dans les responsabilités des employés. Les employés doivent prendre le temps d'utiliser les outils implanter mais cela nécessite une compréhension des solutions et des bénéfices et une culture technologique et organisationnelle adéquat dans l'entreprise. Une des solutions pour accompagner la transition des employés est de nommer un responsable pour gérer les modifications organisationnelles et faire le lien entre les utilisateurs et les développeurs.

## ABSTRACT

Industry 4.0 is a strategy based on emerging technologies to increase the capabilities of industry. One of the strategies of Industry 4.0 is to implement tools to manage the company's data. Big data enables the conversion of data acquired during the product life cycle into knowledge that produces added value. The company is thus able to improve its industrial performance with better access to information, with modifications of the organization and data-driven decision making. Data management is therefore a key element in the company's strategy, which must be able to collect, transmit, store, process, visualize and apply its data. This management requires that data sources and control systems interoperate with each other. This need is notably addressed by the new technologies of Industry 4.0, including cyber-physical systems (CPS) that allow the integration of computer technologies in the physical world. However, the need and the integration of technologies depend on the business environment. Approaches and methods have been developed to support individual companies in their adoption of Industry 4.0 tools, but some companies still struggle.

Small and medium-sized enterprises (SME) are among the companies where the adoption of new technologies in their processes remains problematic. On the one hand, the approaches are not suited to the particularly constrained environments of SME compared to large companies. On the other hand, few approaches detail the concrete implementation of technologies in an industrial context, and in particular to address the issues of interoperability and heterogeneity of systems.

This paper proposes a roadmap for implementing a cyber-physical system (CPS) in an SME context. This roadmap describes each of the steps required to connect all of an enterprise's data sources and to enable them to manage that data. The CPS is the central system in this architecture that enables data sources to interoperate and provides an infrastructure that supports Big Data. The CPS provides access to information and services to all entities (human, machine and organizational) in real time and in a decentralized manner. This allows the company to redefine the organization of processes and systems and create a more responsive management system with data-driven decision making.

In order to build this roadmap, a scientific approach based on field observations and feedback was carried out. An industrial partner was involved to understand the real industrial problems and to study the solutions present in the literature in a practical context. This partner is La Milanaise, an organic flour mill in the Montreal area.

The proposed roadmap uses an agile approach, a service-oriented architecture (SOA) and generic skills to address the specific challenges of SME. Agile methods are based on short development cycles with iterations of revisions. These methods are widely used in IT development because they allow to respond to needs in a dynamic way. In our case, they will allow us to adapt the solutions to the context of SME. Several iterations have been performed at the industrial partner to implement the current roadmap, which has enabled the implementation of a CPS in an SME context. Our study shows that the phase of integrating the tools into the processes is a difficult step. CPS changes processes by providing monitoring and decision support capabilities, which implies organizational changes, especially in employees' responsibilities. Employees must take the time to use the tools implemented but this requires an understanding of the solutions and benefits and an adequate technological and organizational culture in the company. One of the solutions to accompany the transition of employees is to appoint a manager to manage the organizational changes and to act as a link between users and developers.

## TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS .....	III
RÉSUMÉ.....	IV
ABSTRACT .....	VI
TABLE DES MATIÈRES .....	VIII
LISTE DES TABLEAUX.....	XI
LISTE DES FIGURES.....	XII
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS .....	XIV
LISTE DES ANNEXES.....	XVI
CHAPITRE 1 INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE .....	5
2.1 Approches de l'industrie 4.0 en PME .....	5
2.1.1 Analyse de la situation initiale .....	6
2.1.2 Analyse des besoins .....	8
2.1.3 Défis particuliers pour les PME .....	11
2.1.4 Facteurs de succès et opportunités pour les PME. ....	15
2.2 Interopérabilité .....	18
2.2.1 Définition .....	18
2.2.2 Implémentation de la stratégie d'industrie 4.0 .....	21
2.2.3 Système d'information et standards d'interopérabilité .....	22
2.3 Utilisation des CPS pour l'implantation d'un cadre d'interopérabilité.....	28
2.3.1 Définition .....	28
2.3.2 Organisation des systèmes .....	37
2.3.3 Méthodes d'implantation des CPS .....	40

2.3.4	Défis de mise en place des CPS .....	43
2.4	Conclusion.....	44
CHAPITRE 3 DÉMARCHE DE RECHERCHE .....		46
3.1	Objectif de recherche .....	46
3.2	Démarche .....	46
CHAPITRE 4 PROPOSITION D'UNE FEUILLE DE ROUTE POUR LA MISE EN PLACE DE SYSTÈME CYBER-PHYSIQUE EN PME .....		49
4.1	Analyse de la situation initiale .....	50
4.2	Définition des besoins .....	52
4.3	Développement d'un CPS .....	54
4.3.1	Définition d'une structure des données .....	55
4.3.2	Développement d'une application orientée service .....	59
4.3.3	Connexion des sources de données .....	64
4.3.4	Développement des interfaces utilisateurs et de contrôle .....	69
4.4	Validation et intégration des services.....	71
CHAPITRE 5 APPLICATION DE LA FEUILLE DE ROUTE .....		74
5.1	Présentation du cas d'étude .....	74
5.2	Analyse de la situation initiale .....	75
5.3	Définition des besoins .....	77
5.4	Développement du CPS : première itération.....	80
5.4.1	Définition d'une structure des données .....	80
5.4.2	Développement d'une application RESTFUL .....	85
5.4.3	Connexion des sources de données .....	86
5.4.4	Création des interfaces utilisateurs et de contrôle .....	87
5.5	Validation et intégration des interfaces utilisateurs et de contrôle.....	93

5.6	Développement du CPS : deuxième itération .....	94
5.6.1	Définition d'une structure des données .....	94
5.6.2	Développement d'une application RESTFUL .....	95
5.6.3	Connexion des sources de données .....	96
5.6.4	Création des interfaces utilisateurs et de contrôle .....	96
5.7	Problématiques en développement.....	98
5.7.1	Connexion du SCADA.....	98
5.7.2	Collecte des données grâce à un capteur .....	99
5.7.3	Valorisation des données.....	103
CHAPITRE 6	DISCUSSION SUR LA FEUILLE DE ROUTE .....	104
6.1	Bénéfices du CPS .....	104
6.2	Discussion sur les défis .....	106
CHAPITRE 7	CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS .....	109
RÉFÉRENCES.....		113
ANNEXES .....		119

## **LISTE DES TABLEAUX**

Tableau 2-1 : Liens entre les vues fonctionnelle et organique d'un CPS .....	36
------------------------------------------------------------------------------	----

## LISTE DES FIGURES

Figure 2-1 : Schéma des six étapes du cycle de vie des données.....	8
Figure 2-2 : Architecture de l'ISA-95 (ANSI/ISA-95, 2013).....	24
Figure 2-3 : Illustration de la typologie des agencements (Trentesaux, 2007) .....	39
Figure 3-1 : Démarche de recherche .....	47
Figure 4-1 : Feuille de route pour la mise en place d'un CPS en PME .....	49
Figure 4-2 : Architecture représentant de la vue organique d'un CPS et ses liens avec les services des systèmes de l'architecture d'entreprise de l'ISA-95 .....	54
Figure 4-3 : Exemple de création des objets à partir d'un fichier Excel.....	57
Figure 4-4 : Schéma des services du niveau nuage informatique .....	60
Figure 4-5 : Schéma d'une source de type 1 et des solutions pour la connecter .....	65
Figure 4-6 : Schéma d'une source de type 2 et des solutions pour la connecter .....	65
Figure 4-7 : Schéma d'une source de données de type 3 et des solutions pour la connecter.....	66
Figure 4-8 : Schéma d'une source de données de type 4 et des solutions pour la connecter .....	67
Figure 4-9 : Schéma d'une source de données de type 5 et des solutions pour la connecter .....	68
Figure 4-10 : Schéma d'une source de données de type 6 et les solutions pour la connecter .....	68
Figure 5-1 : Schématisation des systèmes utilisés pour le processus de transformation .....	75
Figure 5-2 : Cartographie des processus enrichie avec les données .....	76
Figure 5-3 : Architecture de l'entreprise au début du projet .....	78
Figure 5-4 : Diagramme de classe de la première itération.....	80
Figure 5-5 : Exemple de métadonnée d'une classe du diagramme.....	81
Figure 5-6 : Capture d'écran de la page de connexion de l'interface web .....	87
Figure 5-7 : Capture d'écran du menu de l'application.....	88
Figure 5-8 : Capture d'écran d'un formulaire de création d'une entente de production.....	89

Figure 5-9 : Capture d'écran d'un enregistrement d'analyse.....	89
Figure 5-10 : Capture d'écran du rapport d'analyse.....	90
Figure 5-11 : Capture d'écran de la page web d'importation des données du proche infrarouge ..	91
Figure 5-12 : Capture d'écran de la page web d'importation des données du Glutoppeak .....	91
Figure 5-13 : Capture d'écran de trois requêtes pour visualiser les données des lots .....	92
Figure 5-14 : Capture d'écran d'une requête résumant un grand nombre de données sur les lots..	92
Figure 5-15 : Capture d'écran d'un exemple de tableau croisé dynamique réalisé à part du tableau de la figure 5-14 .....	92
Figure 5-16 : Diagramme de classe de la deuxième itération .....	94
Figure 5-17 : Capture d'écran de l'interface pour associer un poids à un ordre .....	97
Figure 5-18 : Capture d'écran du graphique de l'historique des pesées sur la journée du 3 juillet 2021 .....	97
Figure 5-19 : Photos du système mécanique de réglage des rouleaux de broyage .....	99
Figure 5-20 : Plan des vues de face et de côté du système mécanique de serrage des rouleaux..	100
Figure 5-21 : Architecture du CPS avec le prototype de l'encodeur connecté à la molette, les analyses de farine et les services du SCADA. ....	102
Figure A-1 : Diagramme de classe de la première itération.....	119
Figure B-2 : Diagramme de classe de la deuxième itération.....	120

## LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

ANSI	American National Standards Institute
API	Application Programming Interface
BPMN	Business Process Model and Notation
CPS	Cyber-physical system
EA	Enterprises Architectures
EIF	European Interoperability Framework
ERP	Enterprise Resources Planning
IaaS	Infrastructure-as-a-Service
IHM	Interface Homme-machine
IIoT	Industrial Internet of Things
IoT	Internet of Things
M2M	Machine-to-Machine
MES	Manufacturing Execution system
NIST	National Institute of Standards and Technology
PaaS	Platform-as-a-Service
PDCA	Plan Do Check Act
PME	Petites et Moyennes Entreprises
RAMI4.0	Reference Architecture Model Industrie 4.0
REST	REpresentational State Transfer
RFID	Radio Frequency IDentification
SaaS	Software-as-a-Service
SCADA	Supervisory Control And Data Acquisition
SDN	Software Defined Network

SOA	Services Oriented Architecture
TIC	Technologies d'information et de communication
UML	Unified Modeling Language
VSM	Value Stream Mapping

## **LISTE DES ANNEXES**

Annexe A Diagramme de classe de la première itération du développement du CPS.....	119
Annexe B Diagramme de classe de la deuxième itération .....	120

## CHAPITRE 1 INTRODUCTION

Les avancées scientifiques et technologiques ont continuellement supporté le développement industriel pour adapter la capacité de production aux besoins de la société. Aujourd'hui, la société change très rapidement de par la mondialisation, les cycles courts d'innovations et l'intensification permanente de la compétition. Les marchés sont maintenant très risqués et demandent des produits plus variés, des standards de qualité, des services de support et une satisfaction immédiate de la demande (Ganzarain & Errasti, 2016). Différents défis ont déjà été surmontés dans le passé et ont été répertoriés sous forme de révolutions (Drath & Horsch, 2014). La première révolution remonte au 18<sup>e</sup> siècle avec l'introduction de l'énergie hydraulique et à vapeur dans les processus de fabrication permettant de créer les premières industries. Cent ans plus tard, les industries ont commencé à utiliser l'énergie électrique dans des convoyeurs pour développer une production à la chaîne de masse. La troisième et plus récente révolution est apparue en 1969 avec la création du premier contrôleur programmable. La logique programmable a ensuite été appliquée dans les équipements électroniques et informatiques pour établir des systèmes automatiques de production et les systèmes d'information. Au vu des défis actuels, des stratégies d'industrie 4.0 a été introduit dans le milieu industriel pour développer de nouvelles capacités et réorganiser la chaîne de valeur (Hermann et al., 2015). Le terme a été utilisé pour la première fois à la foire d'Hanovre en 2011 (Drath & Horsch, 2014). L'objectif d'une stratégie d'industrie 4.0 est d'intégrer les nouvelles technologies d'information et de communications (TIC) sur l'ensemble de la chaîne de valeur pour créer de la connaissance grâce à la valorisation des données. L'industrie 4.0 peut être interprétée comme une stratégie basée sur les TIC permettant de transformer les processus, les produits et les services et ainsi répondre au besoin industriel de fournir des produits et des services personnalisés de haute qualité tout en maintenant le profit d'une production de masse (Lasi et al., 2014). La flexibilité et la décentralisation des systèmes vont notamment permettre d'augmenter la réactivité des processus en redéfinissant les pouvoirs de décisions et l'accès aux informations des systèmes et de l'organisation humaine. L'industrie 4.0 va *in fine* faciliter la vision et l'exécution de l'industrie intelligente (Kajati et al., 2019). Ce concept fait référence à une industrie complètement connectée opérant en autonomie grâce à la génération, au transfert et à l'analyse de données du cycle de vie des produits (Lasi et al., 2014).

La valorisation des grandes quantités de données est un des concepts clés de l'industrie 4.0 car elle va permettre de développer de nouvelles capacités, créer un avantage concurrentiel et améliorer les prises de décisions stratégiques et opérationnelles. Cependant, la génération, le stockage, la communication et l'analyse des données nécessitent d'importantes infrastructures technologiques. L'adoption et l'intégration de ces solutions technologiques dans les industries représentent aujourd'hui un défi majeur pour beaucoup d'entreprises. La problématique d'intégration des technologies est de créer une connexion ubiquitaire entre tous les systèmes de l'entreprise pour leur permettre de communiquer, d'échanger des données et d'utiliser les données ainsi échangées. Cette problématique est adressée dans la littérature par l'utilisation des standards industriels et des systèmes d'information. Cependant, malgré ces solutions, l'adoption et l'intégration des technologies et des systèmes restent un défi pour beaucoup d'entreprises.

Les gouvernements ont été les premiers à développer des programmes sur cette nouvelle stratégie, puis, les entreprises et les centres de recherche ont participé à la révolution avec des expériences en laboratoire et en contexte industriel (Liao et al., 2017). Ces travaux ont permis de définir des concepts et d'étudier des dimensions impactant l'implantation d'une stratégie d'industrie 4.0. Parmi ces dimensions, les technologies restent dominantes mais d'autres dimensions comme l'environnement extérieur du projet sont aussi à prendre en compte. En effet, l'adoption des nouvelles technologies va dépendre de la maturité du lieu où elles seront implémentées, comme par exemple dans les pays émergents (Dalenogare et al., 2018), ou encore dans les petites et moyennes entreprises (PME). Ces dernières sont particulièrement intéressantes pour l'économie et la recherche car elles représentent une grande majorité du commerce mondial et jouent un rôle vital dans le processus de création de valeur des chaînes logistiques. De plus, les modèles d'affaires des PME sont généralement simples, avec un seul modèle d'affaires ou un modèle d'affaires largement dominant, ce qui permet de faciliter les études des impacts de l'industrie 4.0 sur les entreprises (Müller et al., 2018).

Les PME ont été définies par la commission européenne (EC, 2003) par le nombre de leurs employés et soit leur bilan annuel, soit leurs revenus, mais plusieurs contraintes et forces ont été répertoriées dans la littérature (Mittal et al., 2018). Les principales contraintes rencontrées par les PME vont être sur leurs ressources humaines, sur leurs ressources financières, sur leurs cultures technologiques, leur adoption des standards industriels, leur situation initiale, leur familiarité avec les technologies complexes et leur stratégie à court terme. Ces défis vont complexifier l'intégration

et l'utilisation des nouvelles technologiques qui sont la base des stratégies de l'industrie 4.0. Mais les PME ont aussi des forces dont une organisation souvent peu complexe avec beaucoup de communications entre les employés et peu de niveaux hiérarchiques (Moeuf et al., 2020).

La particularité de l'environnement de PME peut expliquer le manque d'adoption des TIC dans les PME qui a été remarqué à cause d'un manque de travaux de recherche sur le sujet (Mittal et al., 2020; Moeuf et al., 2020; Müller et al., 2018; Stentoft et al., 2020). En effet, l'environnement des PME semble modifier les conditions d'implantation des technologies de l'industrie 4.0. Ce manque influe sur la compétitivité des PME alors même qu'elles jouent un rôle essentiel dans les chaînes de valeur. Représentant 99% du marché (EC, 2003), les PME peuvent être vues comme des acteurs majeurs des industries manufacturières et ont un impact significatif sur la 4<sup>ème</sup> révolution industrielle (Mittal et al., 2018). De plus, les PME sont des clients et des fournisseurs des grandes entreprises donc leur maturité vis-à-vis des outils de l'industrie 4.0 affecte la plupart des chaînes d'approvisionnement (Müller et al., 2018). C'est pourquoi il est important de réaliser des travaux sur l'industrie 4.0 en contexte de PME. Et même si les PME n'ont pas les mêmes opportunités que les grandes entreprises, avec généralement moins de forces motrices et plus de barrières (Horváth & Szabó, 2019), les PME ont un environnement propice à l'adoption des outils de l'industrie 4.0 avec une structure organisationnelle moins complexe et informelle, souvent caractérisée par une forte implication des managers dans toutes les décisions, une bonne communication entre les employés et un modèle d'affaires simple voir unitaire (Moeuf et al., 2020; Müller et al., 2018).

Différentes approches ont été développées pour accompagner les PME dans leur implémentation des méthodes et des technologies de l'industrie 4.0. Ces approches peuvent être regroupées par rôle avec l'analyse de la situation initiale, l'analyse du besoin et l'implantation de la stratégie de l'industrie 4.0. Cependant, ces approches sont très théoriques et la littérature manque d'études fournissant des évidences empiriques sur la façon dont sont adoptées et intégrées les nouvelles technologies dans les PME (Frank et al., 2019; Mittal et al., 2020; Moeuf et al., 2020). Ces technologies sont la base de la connectivité des systèmes, de la valorisation des données et de la stratégie de l'industrie 4.0.

Le projet présenté dans ce mémoire est une partie d'un programme plus important réalisé avec une PME partenaire et qui regroupe 3 projets complémentaires. Le premier projet porte sur le traitement des données disponibles pour développer un système de pilotage en temps réel de la production.

Le deuxième projet est l'objet de ce mémoire et a pour **objectif de proposer une feuille de route adaptée aux PME pour connecter les systèmes de l'entreprise et créer une infrastructure supportant la valorisation des données du premier projet**. Le troisième projet traite de l'utilisation de la feuille pour étendre le périmètre des systèmes connectés et développer de nouvelles corrélations entre les données disponibles.

Une démarche inductive a été mise en place chez le partenaire industriel pour comprendre les problématiques organisationnelles, techniques et technologiques liées à la connexion des systèmes dans un environnement de PME. Cette démarche permet d'exploiter les observations et les retours d'expérience du contexte industriel pour développer des solutions empiriques. L'environnement des PME nécessite des solutions adaptées qui prennent en compte l'ensemble des contraintes présentées précédemment. La feuille de route proposera donc une solution alternative aux standards et aux systèmes d'information, qui ont été jugés non-adaptés aux PME. Les solutions existantes dans la littérature ont donc été qualifiées et sélectionnées pour proposer une feuille de route applicable en PME. Les enjeux et résultats des parties 1 et 3 du projet ne seront pas présentés dans ce mémoire.

Pour répondre à cet objectif, ce mémoire est composé de 7 chapitres. Une revue de littérature a tout d'abord été effectuée pour connaître les solutions et les méthodes recensées dans le domaine académique en plus d'en soulever les limites. Elle portera sur les approches de l'industrie 4.0 en PME, sur le concept d'interopérabilité, et sur la technologie des systèmes cyber-physique. Le chapitre 3 présentera ensuite la question de recherche, l'objectif principal et la démarche scientifique utilisée. Le chapitre 4 expliquera en détaille la feuille de route proposée pour répondre à la question de recherche avec les outils pour analyser la situation initiale, définir les besoins d'une PME et développer un CPS. Le chapitre 5 présentera l'étude de cas avec la description de chaque étape de la feuille de route mise en œuvre et les résultats concrets en contexte industriel. La feuille de route sera ensuite discutée dans le chapitre 6 avec notamment les résultats et la gestion des défis. Enfin, un chapitre de conclusion soulignera les contributions et présentera leurs limites et perspectives.

## **CHAPITRE 2    REVUE DE LITTÉRATURE**

Ce chapitre présente tout d'abord les différentes approches pour accompagner les PME dans leur transition vers une stratégie d'industrie 4.0. Cette première partie permettra aussi d'énumérer les défis et les facteurs de succès pour les PME. La deuxième partie portera sur le concept d'interopérabilité pour montrer son importance dans l'industrie 4.0 pour favoriser une stratégie de valorisation des données, et différentes méthodes pour répondre aux problématiques d'interopérabilité seront présentées. Finalement, la technologie des systèmes cyber-physique (CPS) sera présentée en expliquant ses principes et ce qu'elle apporte pour l'interopérabilité dans l'entreprise.

### **2.1    Approches de l'industrie 4.0 en PME**

L'industrie 4.0 est une stratégie qui est apparu en premier dans les pays développés et en particulier en Allemagne, avec le programme « High-Tech Strategy 2020 », aux USA, avec le programme « Advanced Manufacturing Partnership », en Chine avec « Made in China 2025 » et en France, avec « La Nouvelle France Industrielle » (Dalenogare et al., 2018). Ces programmes ont profité de la maturité de la culture technologique des entreprises de leur pays dans le but de promouvoir le développement et l'adoption des technologies de l'industrie 4.0. Dalenogare et al. (2018) ont notamment réalisé une étude à grande échelle au Brésil pour comparer les bénéfices des technologies entre une adoption dans un pays développé et un pays émergent. L'étude montre que l'environnement extérieur d'adoption des technologies est très impactant sur la méthode d'implantation et sur les bénéfices possibles. Les pays émergents en particulier, moins mature technologiquement et industriellement que les pays développés, ne profitent pas encore de tous les bénéfices à cause d'un manque d'adoption des technologies.

De la même manière, la littérature a remarqué des particularités pour les environnements de PME et a présenté différentes approches pour accompagner les PME dans leur implantation des technologies d'industrie 4.0. Il est possible de réunir les approches en 4 groupes (Mittal et al., 2020; Mittal et al., 2018) :

- Les évaluations de l'état initial : ce sont des outils d'évaluation permettant d'analyser et de déterminer le niveau de préparation de l'environnement et des ressources nécessaires pour atteindre un objectif.

- Les modèles de maturités : ces modèles définissent des niveaux de maturité et suggèrent des étapes pour évoluer et atteindre un niveau plus sophistiqué. Ces modèles sont généralement utilisés après l'évaluation de la situation initiale.
- Les architectures : ce sont des ensembles de modèles, de procédures, de méthodes et d'outil pour designer et concevoir des systèmes.
- Les feuilles de route : ce sont des plans pour répondre aux objectifs techniques de court et long terme.

Ces approches sont complémentaires mais elles interviennent dans des parties différentes du cycle de vie d'un projet. Les évaluations de l'état initial et les modèles de maturités sont utilisés dans les analyses de la situation initiale, les architectures servent à analyser les besoins et définir une stratégie, et les feuilles de route interviennent lors de l'implémentation de la stratégie de l'industrie 4.0

### **2.1.1 Analyse de la situation initiale**

L'analyse de la situation initiale sert à mieux comprendre l'environnement, les systèmes et les ressources existants au début du projet. Plusieurs approches considèrent cette étape en utilisant des modèles de maturité ou des évaluations de l'état initial.

(Mittal et al., 2020) par exemple a proposé une architecture pour adopter une stratégie d'industrie 4.0. Leur modèle comprend 5 étapes : (i) identifier les données de production présentes dans la PME, (ii) évaluer l'état initial de la PME, (iii) développer la culture technologique des employés et des gestionnaires, (iv) développer une stratégie adaptée à la PME et (v) identifier les outils et les méthodes permettant de réaliser la stratégie. Les deux premières étapes d'identification des données et d'évaluation de la PME font référence à une analyse de la situation initiale. La première permet de répertorier les données de production disponibles et accessibles sur la chaîne de valeur. Ensuite, la PME doit se positionner pour évaluer sa capacité à pouvoir adopter une stratégie d'industrie 4.0.

Différents outils d'évaluation existent dont les modèles de maturités qui permettent de définir la maturité de l'environnement et aider à déterminer les bénéfices de la mise en place d'une stratégie d'industrie 4.0. (Mittal et al., 2020) préconise d'utiliser un modèle pour hiérarchiser les données et leurs sources selon leur étape dans leur cycle de vie : collecte, transmission, stockage, traitement,

visualisation et application (Tao et al., 2018). Ce modèle permet de différencier les données et les systèmes pour ensuite pouvoir définir les besoins et les objectifs des différents systèmes, chaque système représente donc une dimension de maturité. Un autre exemple est l'approche de (Schumacher et al., 2019) qui définit 8 dimensions et utilise 65 catégories de maturité. Certains modèles sont plus génériques comme celui de (Müller et al., 2018) qui ne comprend qu'une seule dimension de 4 catégories. L'objectif du modèle est de positionner les PME en fonction de leur caractéristiques structurelles et technologiques et de leur motivation pour implanter une stratégie d'industrie 4.0. On retrouve dans ce modèle des PME qui n'utilisent que très peu de technologies et qui ne perçoivent que très peu de bénéfices de l'adoption des outils de l'industrie 4.0. Ce premier niveau de maturité est appelé des « fabricants artisanaux ». Le second niveau de maturité des PME est dit « planificateur au stage préliminaire », elles perçoivent des opportunités à la mise en place d'une stratégie d'industrie 4.0 et s'attendent à une implantation à moyen ou long terme qui peut durer jusqu'à 15 ans. Le troisième niveau de maturité, « utilisateur d'industrie 4.0 », réfère aux PME utilisant les technologies de l'industrie 4.0 pour développer de nouvelles capacités dans leur propre entreprise dans le but de garder ces parts de marché. Les PME du quatrième groupe sont les « adoptant à grande échelle ». Elles sont déterminées à profiter des capacités développées par une stratégie d'industrie 4.0 et voient cette stratégie comme essentiel pour garder leur avantage concurrentiel. Les PME du quatrième groupe de maturité sont aussi proactives dans l'adoption en supportant d'autres compagnies dans leur implantation des technologies de l'industrie 4.0.

Une revue de littérature a été réalisée par (Mittal et al., 2018) pour discuter de la cohérence des différentes approches d'adoption d'une stratégie d'industrie 4.0, et en particulier des modèles de maturité, avec l'environnement des PME. Cette étude montre que différentes dimensions sont considérées par les auteurs mais que les approches ont des manques vis-à-vis des PME. Le premier manque est sur la prise en compte des spécificités des PME et en particulier sur la situation des PME en début de projet. Un deuxième manque est la déconnexion entre les évaluations et les préconisations au niveau des ressources nécessaires pour les réaliser. Il est essentiel pour les entreprises de considérer l'état actuel de l'organisation et les étapes futures d'adoption des technologies mais la complexité des technologies et le manque d'accès à des ressources compétentes empêchent généralement les PME de mettre à jour leur état et d'avancer dans le projet. Les PME ont donc besoin d'un outil d'évaluation complémentaire et intégré aux modèles de maturité (Mittal et al., 2018). (Colli et al., 2019) a notamment présenté un outil d'évaluation de la

maturité permettant d'adapter le modèle aux caractéristiques de l'organisation. Un tel outil nécessite cependant une équipe d'experts pour réaliser l'évaluation et transformer les données collectées, classées et structurées en recommandation. Le troisième manque exposé par (Mittal et al., 2018) est sur les étapes suivantes l'analyse de la situation initiale. Les grandes entreprises peuvent avoir des équipes dédiées à la compréhension et à la mise en place des méthodes d'industrie 4.0 et qui peuvent interpréter les résultats de l'analyse initiale. Les PME ont rarement ces ressources stratégiques permettant l'adoption et l'intégration des technologies.

### 2.1.2 Analyse des besoins

L'analyse des besoins se repose sur l'analyse de la situation initiale pour comprendre l'environnement et en dériver des besoins et objectifs ciblés et cohérents permettant de définir une stratégie pour mettre en place les TIC et développer de nouvelles capacités. Les approches de type architecture sont les principaux outils utilisés pour désigner les systèmes et leur intégration. La troisième et la quatrième étapes du modèle de (Mittal et al., 2020) vu précédemment (i.e. (iii) développer la culture technologique des employés et des gestionnaires et (iv) développer une stratégie adaptée à la PME) sont une analyse du besoin qui se repose justement sur une analyse de l'existant. L'objectif de cette étape n'est pas de réutiliser une des stratégies des grandes entreprises car elles ne correspondent pas aux besoins des PME mais de développer une stratégie spécifique à l'environnement des PME. Cela peut passer par une compréhension du marché de la PME ou par l'analyse du cycle de vie des données. Les six étapes de ce cycle de vie sont représentées sur la figure 2-1 (Tao et al., 2018).

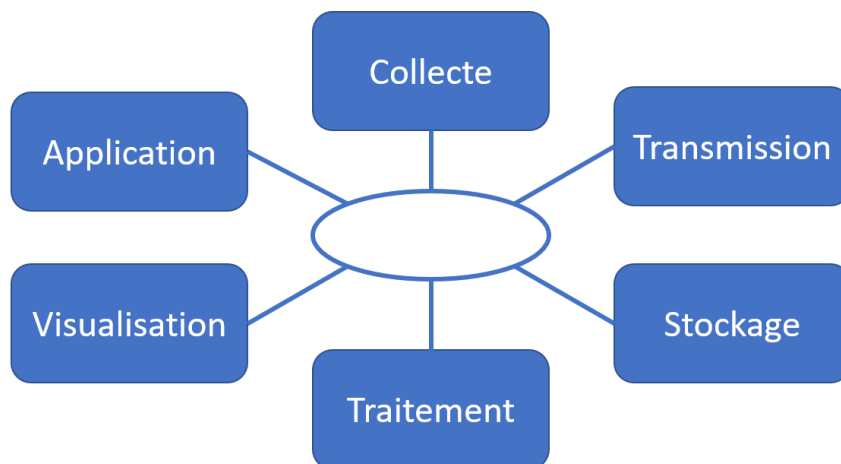


Figure 2-1 : Schéma des six étapes du cycle de vie des données.

Ce cycle de vie peut permettre aux PME de définir des objectifs précis en positionnant les données au début du projet puis en déterminant l'état des données voulues. Six états ont été définis (Tao et al., 2018) :

- Collecte : Les données de différentes sources peuvent être collectées de plusieurs façon, dont la collecte manuelle, la collecte par capteur, la collecte par l'identification par fréquence radio (RFID) ou d'autres systèmes sensoriels.
- Transmission : Les données sont continuellement échangées entre les systèmes et avec les humains. La transmission a donc un rôle critique pour les interactions dans l'entreprise. Les nouvelles technologies représentent une opportunité pour construire des transmissions sécurisées, fiables et en temps réel.
- Stockage : Le grand volume de données doit pouvoir être enregistré pour être réutilisé et intégré.
- Traitement : Le traitement des données fait référence à une série d'opérations réalisées pour découvrir de la connaissance à partir des données acquises et disponibles. Le pré-traitement des données est compris dans cette étape. Le traitement des données est une étape clé de la valorisation des données.
- Visualisation : La visualisation a pour objectif de communiquer les données, les informations et les connaissances de façon explicite aux utilisateurs. Les résultats du traitement des données sont ainsi accessibles et adaptés pour leur utilisation dans les processus.
- Application : Les données, les informations et les connaissances peuvent être appliquées sur l'ensemble du cycle de vie du produit, de la chaîne de valeur et des niveaux hiérarchiques. Les applications peuvent par exemple être l'utilisation des données des marchés et des clients pour la phase de design, l'utilisation des données d'inventaire et de traçabilité en temps réel par les fournisseurs, l'utilisation des données des systèmes de production pour contrôler et améliorer la qualité des produits, etc.

Ce cycle décrit des états de données mais n'est pas forcément circulaire dans le sens où la collecte des données n'est pas forcément suivie par la transmission. En effet, après être collectées, les

données peuvent être transmises ou, traitées puis transmises, ou traitées, stockées puis transmises ou, traitées, transmises, stockées et re-traitées, etc. L'objectif d'une stratégie d'industrie 4.0 peut être de gérer les cycles de vie de toutes les données d'une entreprise pour aller vers une prise de décision basée sur les données.

Des architectures d'entreprises (EA) peuvent aussi être utilisées pour décrire les principaux éléments et systèmes d'une entreprise et leurs relations et en déduire une stratégie. Ces EA peuvent avoir différentes définitions avec chacune leur périmètre et leurs objectifs mais on peut les résumer avec des caractéristiques générales (Goerzig & Bauernhansl, 2018). Premièrement, elles contiennent des principes, des méthodes, des modèles pour aider les entreprises à designer et développer leur structure organisationnelle, qui comprend les processus d'affaires, les systèmes d'information et l'infrastructure de l'entreprise. Deuxièmement, les EA permettent d'identifier, de contrôler et de conserver les parties importantes et stables de l'organisation. Troisièmement, ces architectures servent de support pour transférer la stratégie aux opérations quotidiennes. Quatrièmement, elles doivent être compréhensibles par toutes les parties prenantes. Finalement, les EA permettent de supporter les modifications futures d'optimisation et de simplification. Elles peuvent donc nous permettre d'avoir une vue d'ensemble de l'environnement et d'identifier les manques et les besoins et d'en déduire des objectifs. Cependant, les approches d'architecture d'entreprise ne sont pas adaptées aux environnements de PME de par leurs grandes complexités et leur non-compatibilité avec un développement rapide de nouvelles solutions. (Goerzig & Bauernhansl, 2018) présentent une première étape agile pour une approche d'architecture d'entreprise adaptée aux PME. L'agilité de leur approche est basée sur un développement incrémental de l'architecture avec une importante implication des clients pour réduire les efforts de développement, améliorer la vitesse de développement et augmenter la satisfaction des clients.

Un dernier outil pouvant être utilisé est l'architecture analytique de Moeuf et al. (2018). Leur modèle a été utilisé pour guider leur analyse de la littérature scientifique mais permet aussi de faire une analyse des besoins. Ils sont partis des conclusions des travaux du groupe CEFRIO (Danjou et al., 2017) sur la responsabilité des différents groupes technologiques pour implémenter les nouvelles capacités voulues, pour en déduire qu'il y avait des relations entre les objectifs ciblés, les capacités recherchées et les ressources techniques requises pour faire aboutir les projets. Les objectifs ont été séparés en termes de flexibilité, de réduction des coûts, d'augmentation de la productivité, d'amélioration de la qualité et de la réduction du temps de livraison. Pour répondre à

ces objectifs, le modèle propose 4 domaines de capacités : surveillance, contrôle, optimisation, autonomie. Pour finir, les leviers technologiques sont les données massives, les simulations, les machines autonomes, l'intelligence artificielle, les nuages informatiques (Cloud Computing), l'internet des objets (IoT), les systèmes cyber-physiques (CPS), la cybersécurité, la communication intermachines et la réalité augmentée. Ces dimensions peuvent être considérées pour comprendre le contexte du projet et définir des objectifs.

### **2.1.3 Défis particuliers pour les PME**

Plusieurs approches existent pour accompagner les PME dans l'adoption d'une stratégie d'industrie 4.0. Cependant, les méthodes d'implémentation sont très peu connues car peu de PME ont partagé l'expérience de leur adoption des technologies de l'industrie 4.0 (Mittal et al., 2020). Le corpus littéraire se retrouve donc très hétérogène sur les applications d'une stratégie d'industrie 4.0 en PME avec des applications peu détaillées et mal documentées qui ne fournissent pas beaucoup de perspectives pour les managers de PME (Moeuf et al., 2020). En effet, les recherches se sont principalement concentrées sur le développement et la validation des différentes technologies et ont produit un grand nombre d'outils, de méthodes et de technologies mais la littérature a remarqué un important besoin de proposer et valider des feuilles de routes et des méthodes d'implémentation (Moeuf et al., 2018). L'article de (Müller et al., 2018) encourage notamment les futures recherches d'évaluer de façon quantitative et qualitative les étapes d'implémentation des outils d'industrie 4.0 dans les PME. Au vu de ce manque d'études empiriques en contexte de PME, la communauté a très peu de connaissances sur l'implémentation des outils d'industrie 4.0 en contexte de PME mais on remarque que les PME ont l'air de particulièrement lutter pour adopter et intégrer les TIC à leur processus, ce qui nous fait assumer que les défis pour adopter une stratégie d'industrie 4.0 sont plus importants pour les PME. Nous avons donc résumé les défis des PME dans la suite.

#### **2.1.3.1 Ressources financières**

Le premier défi recensé dans la littérature est le manque de ressources financières des PME (Goerzig & Bauernhansl, 2018; Horváth & Szabó, 2019; Masood & Sonntag, 2020; Mittal et al., 2018; Moeuf et al., 2020). Le succès du projet et le retour sur investissement sont aussi très importants pour assurer la viabilité financière de l'entreprise.

### **2.1.3.2 Expertises et ressources humaines**

Un des principaux risques identifiés par la littérature est le manque d'expertises et de ressources humaines dans les fonctions support et en particulier dans les domaines technologiques (Moeuf et al., 2020). Les projets digitaux demandent des équipes multidisciplinaires ce qui rend les PME peu préparées avec des difficultés pour gérer des projets complexes (Moeuf et al., 2018). L'entreprise a besoin d'un temps de préparation important avec des formations pour pallier le manque de compétences et de connaissance de la force opérationnelle (Horváth & Szabó, 2019) or les ressources humaines des PME ont des responsabilités quotidiennes et ne peuvent donc pas se libérer pour le développement de nouvelles solutions (Goerzig & Bauernhansl, 2018). De plus, il y a un manque d'un directeur avec les compétences appropriées et l'expérience nécessaire pour gérer un calendrier cohérent, la définition d'objectifs précis et la mise en place des méthodes, des étapes et des ressources pour faire aboutir le projet (Horváth & Szabó, 2019). Les décisions en PME dépendent généralement des informations et de la compréhension du manager sur la situation ce qui peut impliquer plus d'incertitudes que les décisions prises en grandes entreprises qui sont principalement fondées sur des études de marché et sur des analyses partagées par plusieurs départements (Mittal et al., 2018). Et vu que la réussite des stratégies d'industrie 4.0 dépendent de la compréhension et de la connaissance du manager à propos des aspects managériaux, techniques et opérationnels (Mittal et al., 2020), les entreprises ont encore besoin d'une stratégie et de responsables pour prendre en charge la gestion des approches d'industrie 4.0 vues précédemment (Basl, 2017). Si la sphère décisionnelle de l'entreprise croit en l'innovation et participe activement la stratégie alors cela peut servir de signal fort pour toute l'organisation pour surpasser les obstacles d'adoption (Prause, 2019).

### **2.1.3.3 Culture d'entreprise**

La stratégie d'industrie 4.0 peut être vu comme l'adoption et l'intégration des technologies or les approches et les technologies ont été développées pour et par les grandes entreprises (Masood & Sonntag, 2020) et les pays développés (Dalenogare et al., 2018) qui sont des environnements ayant une perception de la valeur des technologies et une culture technologique différentes comparées aux PME et aux pays émergents. Une des critiques de (Mittal et al., 2018) est que les approches considèrent généralement que les PME ont des cultures organisationnelle et technologique appropriées alors que ce n'est pas forcément le cas en réalité. La culture reste un problème pour les

PME car elles sont rarement exposées aux travaux académiques et des grandes entreprises (Masood & Sonntag, 2020) mais aussi car les PME ont des besoins intrinsèquement différents par rapport aux grandes entreprises (Dalenogare et al., 2018). La première version de l'approche de (Mittal et al., 2020) pour développer une vision par exemple, ne prenait pas en compte l'importance de la culture de l'entreprise mais suite aux interviews avec des managers de PME, les auteurs ont remarqué que le développement de la culture jouait un rôle vital dans l'adoption d'une stratégie d'industrie 4.0. Le sondage de (Stentoft et al., 2020) montre aussi que le manque de culture peut comprendre deux points en particulier : le manque de compréhension de l'importance stratégique et le manque de connaissance des employés sur les stratégies d'industrie 4.0. La compréhension stratégique passe par un manque de modèle donné où l'entreprise peut faire la connexion entre l'ensemble de leurs données dont celles sur le marché, les gammes de produits, les technologies et les systèmes d'information. La vision actuelle est principalement en silo sans réelle connexion entre tous les départements. D'autre part, le manque de culture des employés, de tout niveau hiérarchique, est principalement sur la connaissance des différentes technologies, sur leurs utilités et sur leurs bénéfices pour les processus de production. Pour gérer l'ensemble des changements organisationnels et de culture, il est nécessaire d'impliquer plusieurs entités organisationnelles et d'intensifier les interactions et la collaboration entre ces entités et leurs managers (Prause, 2019). Des organisations ayant des structures décentralisées avec moins de niveaux hiérarchiques peuvent notamment être des solutions pour améliorer la coordination entre l'ensemble des entités décisionnelles (Prause, 2019). Cependant, certaines entreprises ont peur d'impliquer leurs employés et de modifier leur structure organisationnelle par crainte de développer une résistance aux changements dans l'entreprise (Mittal et al., 2020). Il faut aussi souligner que les PME ne recrutent pas leurs employés sur des critères de connaissances sur les outils de l'industrie 4.0. Le manque de culture qui en résulte implique un besoin pour l'entreprise de faire appel à de l'assistance extérieure pour évaluer, choisir et mettre en place les nouvelles technologies.

#### **2.1.3.4 Standards**

Le manque de culture technologique implique généralement un manque de connaissance et d'utilisation des standards chez les PME (Kolla et al., 2019; Müller et al., 2018). Les standards peuvent inclure les standards technologiques mais aussi les processus standards de production (Horváth & Szabó, 2019). Dans les deux cas, l'introduction des standards est considérée comme

une nécessité dans cette quatrième révolution. Les grandes entreprises sont d'ores et déjà en avance à ce niveau avec notamment une grande utilisation des standards ISO. D'un autre côté, la présence des standards en PME est rare à cause du manque de connaissance ou du manque de ressources requises pour passer les certifications (Mittal et al., 2018).

### **2.1.3.5 Situation initiale**

Le point de la section 2.1.4.4 rejoint un constat réalisé par (Mittal et al., 2018) sur la différence de point de départ entre les PME et les grandes entreprises. La maturité des entreprises au début des projets comprend des connaissances et une acceptation des TIC dans les processus alors que les PME doivent généralement commencer à un niveau où les TIC sont très peu utilisées voir inconnues, les réseaux informatiques de l'entreprise sont restreints par leur bande passante et leur sécurité, et les systèmes d'informations ne communiquent pas entre eux. Les auteurs ont donc introduit un point de départ hypothétique (niveau 1) des grandes entreprises, où l'organisation a déjà commencé et accepté la transition vers une stratégie d'industrie 4.0, et un point de départ pour les PME (niveau 0), avec très peu voire pas d'infrastructures informatiques et organisationnelles adaptées. A ce stade, les PME concernées ne sont pas confiantes dans le lancement d'initiative 4.0 et l'effort pour passer d'un niveau 0 à un niveau 1 semble plus important que l'effort en partant d'un niveau 1. La transition d'un niveau 0 à un niveau 1 peut comprendre un changement drastique de la culture de la PME avec l'adoption de nouvelles technologies et la réorganisation des structures décisionnelle. Cette transition risque donc de prendre plus de temps, requérir plus de ressources et amener davantage d'imprévu, dont une peur et une résistance au changement, qu'une transition d'un niveau 1 vers un niveau 2 ou supérieur. C'est pourquoi le niveau initial de digitalisation des PME va très certainement affecter l'implantation des nouvelles technologies (Müller et al., 2018). Les approches des grandes entreprises ne peuvent donc pas être considérées pour les PME. Il faut cependant considérer que cette généralisation n'est pas valide pour toutes les PME et toutes les grandes entreprises. Il existe des PME très matures technologiquement qui peuvent être considérées comme des rôles modèles pour les autres entreprises vis-à-vis de leur stratégie d'industrie 4.0. Néanmoins, les recherches sur ce sujet suggèrent que la généralisation est justifiée et peut servir une fondation pour les travaux sur les PME (Mittal et al., 2018).

### **2.1.3.6 Complexité des technologies**

La complexité des technologies est le degré auquel les technologies sont perçues comme difficiles à comprendre et à utiliser, et c'est souvent corrélé négativement avec l'adoption (Prause, 2019). Cette complexité et la variété des solutions sont deux des principales problématiques des systèmes manufacturiers et des TIC (Trabesinger et al., 2019). C'est pourquoi il y a un réel besoin de simplifier la technologie et les méthodes pour se détacher des défis énumérés précédemment. Goerzig et Bauernhansl (2018) ont notamment proposé une solution agile pour avoir une implantation plus graduelle et pour pallier à la complexité des architectures d'entreprise. On peut aussi citer une des hypothèses de (Prause, 2019) : « plus la complexité perçue des solutions est faible et plus grandes sont les chances d'adoption. »

De la même manière, la compatibilité des solutions avec l'environnement est très importante. Elle fait référence au degré auquel la technologie peut être facilement intégrée avec les infrastructures et les processus (Prause, 2019). Si la solution est compatible avec les pratiques et les infrastructures actuelles alors une intégration réussite est plus probable.

### **2.1.3.7 Stratégie à court terme**

Le dernier défi identifié pour les PME est la vision à court terme des PME (Moeuf et al., 2020). Un projet de mise en place d'une stratégie d'industrie 4.0 a un impact stratégique et doit être inclus dans la stratégie d'entreprise cependant les projets d'industries 4.0 sont des projets de long terme et les PME ont généralement une stratégie à court terme. On retrouve donc l'idée d'utiliser une stratégie agile avec une adoption graduelle.

## **2.1.4 Facteurs de succès et opportunités pour les PME.**

Les sections précédentes montrent qu'il y a des approches pour accompagner les PME dans leur adoption d'une stratégie d'industrie 4.0 mais qu'il n'y a pas beaucoup d'exemples et de feuilles de route pour aider l'implantation des technologies. Ce manque peut être dû aux défis rencontrés par les PME vus dans la section 2.1.4. Mais malgré ces défis, les PME ont des caractéristiques propices pour influencer positivement l'adoption et des facteurs pour atténuer les barrières.

Tout d'abord, en plus d'avoir un modèle d'affaire peu complexe et donc propice, les PME ont une structure organisationnelle qui peut simplifier l'implémentation des nouvelles technologies et des

innovations dans le management et les processus (Horváth & Szabó, 2019). En effet, la structure des PME promeut le management local et une bonne coordination entre les départements (Moeuf et al., 2020). Une des caractéristiques de ces organisations est la synchronisation dans toute la hiérarchie, qui se veut très courte et peu complexe en PME. On retrouve aussi une communication fréquente entre les employés des différents niveaux hiérarchiques, ce qui permet de partager les objectifs des projets. L'importance de la participation et de la vision des gestionnaires et des directeurs ont aussi été démontrées dans plusieurs études (Prause, 2019).

Pour faciliter les projets, plusieurs études préconisent aux PME de faire appel à des experts à cause des limites des PME à apprendre de leurs propres expériences face aux complexités projets (Mittal et al., 2018). D'une part, les PME n'ont pas accès aux connaissances partagées dans la littérature scientifique, et d'autre part, des expertises très spécifiques sont nécessaires pour manipuler la complexité des technologies. Cependant, la littérature préconise une assistance de membres académiques plutôt que des consultants (Moeuf et al., 2020). Ces partenariats aboutissent plus facilement à une passation et un transfert des connaissances et (Horváth & Szabó, 2019) introduit aussi la possibilité de développer des programmes dans plusieurs domaines dont les mathématiques, l'ingénierie, l'informatique et le traitement des données.

Un des facteurs de réussites est aussi le besoin de bien clarifier la situation initiale et la stratégie. Cette étape peut passer par l'utilisation des différentes approches vues dans la section 2.1 mais plusieurs études suggèrent aussi de bien clarifier les outils de l'industrie 4.0 pour fournir une interprétation commune dans l'entreprise (Horváth & Szabó, 2019). Cette interprétation permet aux PME de bien définir leurs objectifs et de cibler des formations adaptées pour leurs employés mais aussi de diminuer l'impact des barrières et de mieux appréhender les défis (Stentoft et al., 2020). Une des méthodes pour améliorer la connaissance des employés est d'utiliser une présentation concrète des outils de l'industrie 4.0 appliquées en contexte industriel (Colli et al., 2019). Il est aussi possible d'utiliser des rapports réalisés par d'autres industriels ou consultants ainsi que de participer à des séminaires d'institution spécialisée pour promouvoir une culture organisationnelle et technologique et se mettre à jour sur les dernières recherches, technologies ou standards (Mittal et al., 2018).

Les changements organisationnels significatifs d'une stratégie d'industrie 4.0 doivent être pris en compte et planifier. Un des facteurs de succès identifié est d'avoir une approche d'amélioration

continue agile (Moeuf et al., 2020). Cette approche instaure de l'agilité auprès des employés pour leur permettre d'adopter une nouvelle structure et de nouvelles technologies. Il est notamment possible de mettre en place des itérations pour augmenter le nombre de révisions et créer une stratégie adaptée, définir des besoins et fixer des objectifs cohérents (Horváth & Szabó, 2019). Les travaux de (Goerzig & Bauernhansl, 2018) sur une feuille de route pour mettre en place une architecture d'entreprise utilisent notamment une approche agile permettant de réaliser une transformation digitale.

Masood et Sonntag (2020) ont réalisé une étude pour rapporter les bénéfices et les challenges de l'implémentation des technologies d'industrie 4.0 en PME ainsi que leurs facteurs impactant. Les auteurs en ont déduit que la taille de l'entreprise et la culture de l'entreprise ont un impact positif sur les bénéfices tandis que la complexité des systèmes et des processus de l'entreprise a un effet positif sur les défis.

L'ensemble de ces facteurs de réussites influent la mise en place des nouvelles technologies et doivent être considérés lors de la mise en place d'une stratégie d'industrie 4.0. Et même si de tels projets nécessitent d'importants investissements et un grand nombre de compétences, les solutions développées sont plus flexibles que les solutions des systèmes d'information grâce à la décentralisation des informations et des prises de décisions (Moeuf et al., 2018). L'industrie 4.0 peut donc être considérée comme la solution la plus accessible pour créer un avantage concurrentiel en PME et développer de nouvelles capacités.

Dans une stratégie d'industrie 4.0, la collecte des données et leur valorisation sont les opérations les plus efficaces pour améliorer les performances industrielles des PME, or la littérature montre que les PME n'exploitent pas assez les données qu'elles possèdent (Moeuf et al., 2020). Le processus de valorisation permet d'utiliser les données collectées par des sources de données pour créer des informations concrètes rattachées aux contextes industriels des entreprises (Meissner et al., 2017). Ces informations peuvent ensuite être appliquées par les systèmes et par les employés pour générer de l'intelligence et de la valeur dans les processus (Tao et al., 2018). Les sources de données peuvent comprendre les équipements, les produits, les clients, les employés, les systèmes d'information ou encore les réseaux informatiques. L'objectif est de gérer l'ensemble du cycle de vie des données : la collecte, la transmission, le stockage, le traitement, la visualisation et l'application (Tao et al., 2018), grâce aux technologies de l'industrie 4.0. Deux éléments sont

particulièrement importants dans la valorisation des données, d'une part, il est nécessaire de gérer tout le cycle de vie des données disponibles, et d'autre part, il est nécessaire d'avoir des infrastructures informatiques permettant de supporter les flux d'informations, d'intégrer les techniques de traitement des données mais aussi de permettre aux employés et aux systèmes de visualiser et appliquer les résultats (Moeuf et al., 2020). Pour ce faire, il n'est pas suffisant d'adopter les technologies indépendamment mais il faut les intégrer aux processus et les intégrer entre elles pour leur permettre de communiquer leurs données. Il n'est pas suffisant de collecter des données, l'objectif est de contextualiser les données et de trouver des corrélations dans l'ensemble des données de l'entreprise pour générer de la valeur. Les problématiques liées aux connexions et aux communications des systèmes correspondent dans la littérature au concept d'interopérabilité entre les systèmes. Malgré le fait que les entreprises commencent à se rendre compte de l'importance stratégique des données pour augmenter leur compétitivité (Tao et al., 2018), les entreprises manufacturières ont encore un manque d'interopérabilité entre leurs systèmes, ce qui les empêche de collecter les données et de bénéficier de la valorisation des données (Stentoft et al., 2020). Dans la prochaine section, nous définissons le concept d'interopérabilité et nous étudions différentes technologies pour mettre en place un cadre d'interopérabilité. Ces technologies seront ensuite évaluées par rapport au contexte des PME décrit précédemment.

## **2.2 Interopérabilité**

### **2.2.1 Définition**

L'interopérabilité est un des six principes clés de l'industrie 4.0 avec la virtualisation, la décentralisation, les capacités en temps réel, l'orienté service et la modularité (Hermann et al., 2015). L'interopérabilité peut être définie entre des organisations ou entre des systèmes mais les deux visions gardent des principes similaires. La commission européenne a notamment proposé une architecture d'interopérabilité générique en 2004 (EIF, 2004) et une deuxième version en 2017 (EIF, 2017). La commission européenne définit l'interopérabilité comme la capacité d'un ensemble d'organisations d'interagir vers un objectif bénéfique et mutuel, tout en impliquant toutes les informations et les connaissances des processus d'affaire de toutes les organisations grâce aux échanges de données entre les systèmes TIC (EIF, 2017). D'autres définitions peuvent être considérées comme par exemple : l'interopérabilité entre des systèmes représente leur capacité à

communiquer et à coopérer entre eux malgré leur hétérogénéité et leur peu de connaissances qu'ils ont les uns des autres (ISO-2382-1, 1993), ou encore, l'interopérabilité est la capacité de deux ou plusieurs systèmes ou éléments à échanger des informations et à utiliser les informations ainsi échangées (IEEE, 1990).

Dans une entreprise, les systèmes considérés sont les sources d'informations avec les équipements, les produits, les clients, les employés, les systèmes d'information et les réseaux. Ces systèmes peuvent être hétérogènes, individuels, distribués, indépendants et propriétaires mais ils doivent interopérer pour leur permettre de partager leurs services et leurs données et développer les nouvelles capacités développées par une stratégie d'industrie 4.0 (Valle et al., 2019). Chaque entreprise doit donc sélectionner des technologies en fonction de ses propres systèmes et de ses besoins pour développer un ensemble de systèmes capable d'interopérer et ainsi créer un cadre d'interopérabilité. Ce cadre ou périmètre, qui rassemble des systèmes interopérant, doit ensuite s'adapter continuellement à l'environnement extérieur dont les législations, les besoins du marché, la structure organisationnelle, les processus de productions et l'émergence des nouvelles technologies (EIF, 2017). De plus, les entreprises doivent faire face à différentes problématiques dont la mauvaise compréhension des données, le format des données, les standards et les interfaces des différentes sources. C'est pourquoi (Valle et al., 2019) a réalisé une recherche systématique dans des bases de données scientifiques pour organiser les différentes stratégies d'interopérabilité. Leurs travaux présentent les stratégies pour répondre aux exigences des niveaux d'interopérabilité, i.e. le niveau technique, sémantique, syntaxique et organisationnel, mais aussi répondre à l'absence d'architecture permettant d'analyser, comprendre et guider la façon d'adresser l'interopérabilité.

Dans la suite, nous allons considérer l'architecture de la commission européenne qui comprend quatre niveaux d'interopérabilité: l'interopérabilité légale, l'interopérabilité organisationnelle, l'interopérabilité sémantique et l'interopérabilité technique (EIF, 2017). L'architecture EIF est plus adapté aux organisations par rapport au modèle de (Valle et al., 2019) créé pour des systèmes informatiques. Nous verrons aussi dans la suite que le niveau sémantique de l'EIF regroupe le niveau sémantique et syntaxique de (Valle et al., 2019).

L'interopérabilité légale intervient dans tous les échanges entre des organisations présentes dans des régions ayant des législations différentes. Son objectif est de s'assurer que toutes les stratégies, les politiques et les architectures législatives sont capables de fonctionner ensemble. Il est

important d'identifier les barrières législatives en termes d'utilisation et de stockage des données, des licences de données, des obligations trop restrictives sur l'utilisation de certaines technologies, d'exigences contradictoires, des sécurités dépassées et des besoins de protection des données. Une cohérence doit être gardée entre les législations et les technologies pour identifier les barrières sur les échanges digitaux et les impacts des technologies.

L'interopérabilité organisationnelle concerne les interactions entre les groupes d'affaires, les processus d'affaires et les personnes au travers de toute l'organisation. Elle représente la capacité de chaque unité à fournir, recevoir et utiliser des services pour assurer le fonctionnement global de l'entreprise. L'entreprise doit donc aligner ses processus d'affaires en les documentant de façon cohérente et en utilisant des modélisations représentant les informations et les services échangés. Ces modèles servent à bien définir les services, les clients des services et les fournisseurs de services, ils doivent donc utiliser le même formalisme pour toutes les informations et tous les services. Les activités de chaque organisation sont spécifiées et acceptées par l'ensemble des organisations participant aux processus d'affaires pour assurer les interactions entre les différentes unités et obtenir les objectifs d'affaires voulus (Valle et al., 2019).

L'interopérabilité sémantique assure que le partage d'information et de service préserve le flux sémantique. L'objectif est de s'assurer que toutes les informations échangées sont compréhensibles par toutes les applications même si celles-ci n'ont pas été développées dans ce but. Chaque système, même hétérogène, doit être capable de découvrir des données, de se les représenter et de leur donner un contexte pour interpréter les données partagées de façon cohérente. Dans le modèle de la commission européenne (EIF, 2017), l'interopérabilité sémantique comprend les aspects sémantique et syntaxique. La sémantique fait référence à la signification des données et des relations entre elles. Cela inclut le développement d'un vocabulaire et des schémas décrivant les échanges de données. L'aspect syntaxique, présent notamment dans le modèle de (Valle et al., 2019), décrit le format des données échangées en termes de grammaire et format. De la même façon qu'il existe des standards technologiques pour gérer la communication informatique, des standards robustes, cohérents et universels sont nécessaires pour les échanges d'information entre les sources d'une entreprise. L'objectif d'un tel standard est de fournir un protocole d'échange commun pour toutes les sources de données. Cette standardisation n'est pas encore mature et ne permet pas encore d'assurer un échange fluide d'information, une libre circulation des données et un accès aux informations pour toutes les parties prenantes. L'interopérabilité sémantique est réalisée grâce à la

modélisation des données et de leurs formats. Il faut cependant souligner que ce modèle est spécifique aux domaines et aux contextes de l'entreprise et nécessite l'utilisation d'identifiants et d'informations sans ambiguïté pour les sources de données (Valle et al., 2019). Une ontologie peut notamment être utilisée pour aider la modélisation d'un vocabulaire permettant la spécification des différentes terminologies des différents systèmes de façon explicite (Valle et al., 2019).

L'interopérabilité technique couvre l'ensemble des problèmes techniques pour connecter les sources d'information, généralement acquis chez différents fournisseurs, et ce, indépendamment de leur distance. Son but est de faciliter les communications en utilisant des protocoles et des infrastructures permettant les échanges de données et de messages entre les systèmes. Ce type d'interopérabilité est associé avec les composants physiques, informatiques et réseaux pour permettre la communication inter-machine. Il comprend des applications, des interfaces et des processus de sécurité pour générer des services des systèmes. Les principales problématiques d'interopérabilité sont les systèmes propriétaires et hétérogènes. Les systèmes propriétaires sont des systèmes développés par des tierces parties et où les spécificités de conception et d'utilisation sont inconnues de l'entreprise. Ces systèmes spécialisés apportent une grande diversité avec chacun leurs fournisseurs, leurs protocoles de communication, leur structure de données, leurs interfaces d'accès, leur fréquence d'échange et leur volume de données (Kajati et al., 2019). Cette hétérogénéité résulte en un ensemble de systèmes fragmenté qui a des difficultés à interopérer. Très peu de stratégie ont été identifiées par (Valle et al., 2019) pour répondre à l'interopérabilité technique car les exigences techniques peuvent être adressées en utilisant des techniques connues des services web (Valle et al., 2019), cette technologie sera détaillée par la suite.

Ces différents niveaux d'interopérabilité sont à considérer pour définir un cadre d'interopérabilité propre à chacune des entreprises.

### **2.2.2 Implémentation de la stratégie d'industrie 4.0**

Suite à la définition d'une stratégie basée sur l'analyse des besoins, beaucoup d'approches utilisent des boîtes à outils pour assister les PME dans l'implantation de leur stratégie (Mittal et al., 2018). Ces boîtes à outils sont principalement des catégories de technologies, très similaires aux catégories technologiques de (Moeuf et al., 2018) vues à la section précédente. Les boîtes à outils proposées dans la vision de (Mittal et al., 2020) comprennent les équipements de production, les simulations,

les robots et les machines automatiques, les capteurs et la connectivité, le stockage sur le nuage informatique, l'exploration des données et finalement les modèles d'affaires.

Cependant, bien que les nouvelles technologies aient été présentées, la plupart des entreprises, et particulièrement les PME, ont encore des difficultés d'adoption et d'intégration des technologies dans leurs processus (Lee et al., 2017). Les modèles et les architectures pour développer une stratégie et les boîtes à outils ne sont pas adaptés pour planifier les implémentations et montrer comment appliquer les technologies dans les industries (Goerzig & Bauernhansl, 2018). Ce besoin doit être répondu par une feuille de route expliquant les procédures à suivre pour intégrer et adapter les technologies à l'environnement de l'entreprise et répondre aux objectifs en créant de nouvelles capacités. Nous n'avons trouvé qu'une seule feuille de route pour les PME dans la littérature avec le papier de (Pinto et al., 2019). Le modèle présente une implémentation graduelle d'une stratégie d'industrie 4.0 et comprend une analyse de la situation initiale, une analyse du besoin et la phase d'implémentation. L'objectif de cette approche est d'utiliser seulement l'IoT et les CPS mais une extension est possible pour intégrer les technologies de robotique et de données massives. Une attention particulière est à prendre en compte au début du projet car seules les ressources humaines familières avec les outils de l'industrie 4.0 peuvent participer aux étapes d'analyse de la situation initiale, d'analyse des besoins et peuvent identifier les premiers processus par lesquels initier l'implantation. Le système ainsi développé permet de réutiliser les systèmes existants dans l'entreprise de manière optimisée et avec un contrôle à distance. Le système résultant de la feuille de route est très dépendant du progiciel de gestion intégré (ERP) de l'entreprise. Cette dépendance rend la feuille de route peu adaptée aux PME qui ont une structure de systèmes d'information peu robuste. Nous élaborerons cette critique dans la section 2.3.3.

### **2.2.3 Système d'information et standards d'interopérabilité**

Les standards et les protocoles sont des facteurs clés dans l'architecture d'une industrie intelligente (Hermann et al., 2015) et pour la mise en place d'un cadre d'interopérabilité (EIF, 2017). Les standards sont des documents qui fournissent les exigences, les spécifications, les méthodes ou les caractéristiques permettant à l'objet d'une étude de répondre à son objectif. Plusieurs types de standards avec différentes fonctions et rôles sont nécessaires pour les différentes catégories de technologies pour assurer un développement et une utilisation efficace (Ahmadi et al., 2017). L'utilisation de standards permet d'identifier, de positionner et de comparer des concepts, des

principes, des architectures, des méthodes, des modèles et des outils les uns par rapport aux autres et avec d'autres domaines (Vernadat, 2010). Cependant, les standards sont multiples donc les systèmes d'une même entreprise peuvent utiliser des standards et des protocoles différents. L'hétérogénéité des systèmes d'une entreprise rend l'implantation des technologies coûteuses et requiert des compétences multidisciplinaires.

### **2.2.3.1 Les architectures orientée service (SOA)**

Une des approches possibles est l'architecture orientée service (SOA). Cette architecture peut soutenir les interopérabilités organisationnelle, sémantique et techniques (Valle et al., 2019). Elle utilise des interfaces logicielles (API), appelées services, pour créer une infrastructure facilitant les interactions et le partage des capacités entre les systèmes. Ces interfaces sont définies de façon à spécifier les opérations (ce que fait le service), les paramètres partagés lors d'une opération, et les protocoles qui définissent l'échange des paramètres. L'interaction entre les services dans une architecture SOA est confirmée si le receveur du service comprend les données transmises par le fournisseur du service (Chen & Voigt, 2020). Généralement, les SOA sont séparées en deux modèles de communication : les clients-serveurs et les publier-souscrire (publish-subscribe) (Riedl et al., 2014). Les clients-serveurs distribuent les tâches à des nœuds, les nœuds serveurs fournissent l'accès à des services spécifiques qui peuvent être utilisés par les nœuds clients. Les architectures publier-souscrire est un autre point de vue de distribution où dès qu'un événement est déclenché et qu'un message est publié alors tous les nœuds souscrits aux nœuds envoyant le message reçoivent le message.

Une architecture SOA permet de décrire les processus entre les organisations en définissant un langage d'affaires standardisé dans toute l'entreprise (Valle et al., 2019). Elle conserve aussi le flux sémantique du système et fournit une forte interdépendance entre les services des groupes fonctionnels d'une entreprise (Paniagua et al., 2019). Les services partagent donc des informations structurées et compréhensibles, ce qui permet d'homogénéiser, de lier et de générer les connaissances. L'architecture SOA assure une très forte intégration pour des environnements très hétérogènes (Trabesinger et al., 2019) car même pour les interfaces des systèmes individuels, il est possible de développer des interfaces (des services) sur mesure pour accéder aux informations des systèmes en fonction des besoins.

Une architecture SOA participe aussi à l'intégration des systèmes dans l'entreprise (ANSI/ISA-95, 2013). On retrouve trois intégrations dans la littérature avec l'intégration verticale, l'intégration horizontale et l'intégration d'un bout à l'autre (End-to-end) (Dalenogare et al., 2018; Pivoto et al., 2021). Ces intégrations technologiques sont des facteurs inhibiteurs d'une stratégie d'industrie 4.0 (Horváth & Szabó, 2019). L'intégration verticale porte sur l'intégration des systèmes à tous les niveaux hiérarchiques d'une entreprise pour donner à la direction des informations de production à jour et au bon moment. L'intégration horizontale est une intégration des systèmes entre les entreprises qui interviennent dans le cycle de vie des produits dont les processus de développement, de production et d'affaires. La production de produits personnalisés repose sur la collaboration entre ces entreprises, cela va aussi permettre aux entreprises de développer de nouveaux modèles d'affaires et des processus optimisés (Lu & Xu, 2018). L'intégration d'un bout à l'autre est une intégration des systèmes sur l'ensemble de la chaîne de valeur de l'entreprise.

### 2.2.3.2 La norme ISA-95

La norme ISA-95 contient cinq parties, publiées au début des années 2000, et définit l'interopérabilité sémantique et technique entre le management corporatif et les systèmes de production. Elle utilise notamment les différentes intégrations présentées précédemment et une architecture d'entreprise (EA) pour proposer des modèles et des méthodes adéquates aux entreprises. Les cinq niveaux de l'architecture fonctionnelle de l'ISA-95 sont représentées sur la figure 2-2.

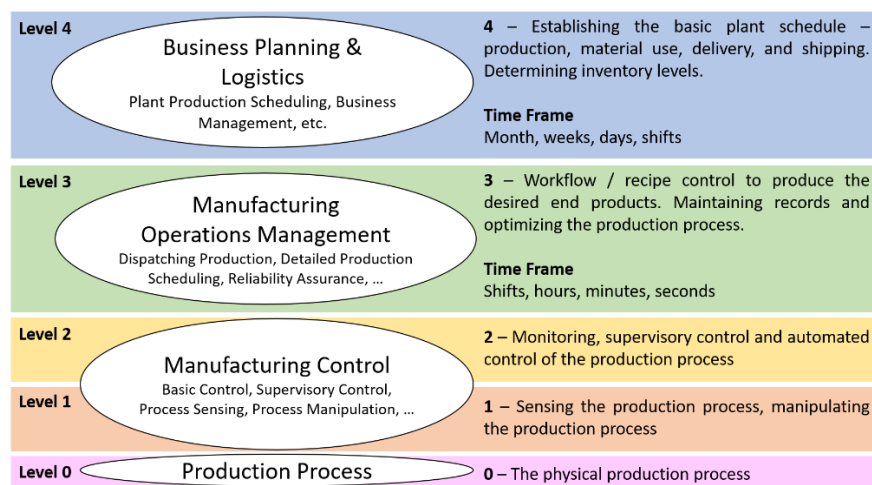


Figure 2-2 : Architecture de l'ISA-95 (ANSI/ISA-95, 2013)

Cette EA montre le niveau 0 avec les processus de production. Le niveau 1 correspond aux capteurs et aux actionneurs présents sur la chaîne de production. Puis il y a le niveau 2 avec les systèmes de surveillance et de contrôle des processus. Le niveau 3 est responsable de la gestion des opérations, la traçabilité et l'optimisation des processus de production et de qualité. Finalement, le niveau 4 gère la planification générale pour la production, l'approvisionnement et les expéditions. Cette architecture d'entreprise permet de décrire les niveaux essentiels d'affaires et leurs relations pour aider les entreprises à designer et réaliser leur structure organisationnelle et en y intégrant leurs systèmes d'informations, leurs processus et leurs infrastructures informatiques.

Les systèmes d'information ont été définis comme un ensemble organisé de ressources (personnes, données, procédures, matériel, logiciels) permettant d'acquérir, de traiter, de mémoriser l'information (sous formes de données, textes, images, sons) dans et entre des organisations (Reix et al., 2016). Dans la suite de ce mémoire, nous utiliserons les termes du cycle de vie des données pour définir les systèmes d'information comme un ensemble organisé de ressources (personnes, données, procédures, matériel, logiciels) permettant de collecter, traiter, stocker et visualiser l'information (sous formes de données, textes, images, sons) dans et entre des organisations. Plusieurs systèmes d'information ont notamment été développés pour chaque niveau fonctionnel de la norme ISA-95 avec les ERP, les MES et les SCADA pour respectivement les niveaux 4, 3 et 2.

Ces systèmes d'information fournissent les services correspondant aux fonctionnalités de chaque niveau et assurent l'intégration horizontale entre les différents départements de l'entreprise. La norme ISA-95 intervient principalement pour gérer l'interopérabilité entre les MES et les ERP pour répondre aux problématiques d'intégration verticale mais les flux d'information sont encore souvent bloqués entre les différents systèmes (Wang, Wan, Li, et al., 2016). De plus, les architectures supposent généralement des modèles ne comportant qu'un seul système d'information monolithique or les phases du cycle de vie des produits comprennent différents points de vue et problématiques. Ces problématiques mènent à différents modèles de données et systèmes développés pour répondre à des objectifs précis du cycle de vie. L'intégration horizontale nécessite donc de connecter des systèmes hétérogènes grâce à des médiateurs sémantiques (Hedberg et al., 2018).

### **2.2.3.3 Le standard OPC-UA**

L'Open Platform Communications Unified Architecture (OPC-UA) est un standard (IEC-62541-1, 2020) utilisant une architecture SOA et assurant l'intégration verticale des niveaux 0, 1 et 2 présents dans la norme ISA-95 (Riedl et al., 2014). L'OPC-UA a été développé pour répondre aux problématiques d'interfaces propriétaires, des traitements asynchrones et des flux d'informations complexes entre les systèmes. Les communications effectuées entre l'ensemble des interfaces sont standardisées pour limiter les traducteurs de chaque système. Autrement dit, l'OPC-UA définit une structure d'interface permettant à tous les systèmes de fournir des services et de comprendre les services des autres afin de créer des interactions. Le receveur d'un service et le fournisseur du service communiquent en s'échangeant des informations sur des objets qui modélisent les systèmes physiques de l'entreprise. Ce standard présente des spécifications pour gérer l'interopérabilité technique des systèmes avec des services et des modèles de sécurité mais il traite aussi de l'interopérabilité sémantique en gérant l'accès aux données, des modèles d'informations et des modèles d'adressage (Lam & Haugen, 2019). L'OPC est un des nombreux protocoles de communication mais on peut aussi citer Modbus, ProfiBus, CANopen, Modbus-TCP, ProfiNet, TCP-IP, Constrained Application Protocol (CoAP) et Message Queue Telemetry Transport (MQTT).

### **2.2.3.4 Discussion sur l'interopérabilité en PME**

L'architecture pyramidale de l'ISA-95, est une représentation générique des interactions entre les différents systèmes industriels (Colombo et al., 2017; Sinha et Roy, 2020). Cette architecture fait partie de la culture industrielle actuelle utilisant des architectures d'entreprise complexes pour mettre en place des systèmes d'information et les intégrer dans un cadre d'interopérabilité (Goerzig & Bauernhansl, 2018). Ces approches offrent des outils et des modèles qui ont déjà été mises en place dans plusieurs projets en comprenant de la documentation pour l'ensemble du cycle de vie des systèmes. Cependant, ces approches utilisent souvent des implantations en cascade pour avoir des systèmes très stables mais l'implantation résultante a peu d'espace pour des adaptations rapides et des itérations dans le développement. L'interopérabilité résultante se trouve aussi être très dépendante des systèmes d'information et donc très rigide. De plus, la structure des données et des prises de décisions est une structure dite distribuée et hiérarchisée avec peu d'évolution possible, un manque de réactivité dû aux niveaux hiérarchiques et un manque d'intégration des données des

différents systèmes. Chaque système peut généralement explorer ses données individuellement et communiquer les résultats aux autres systèmes mais cette intelligence est très générique. La spécialisation des fonctionnalités et des analyses nécessite un nouveau développement de la part du fournisseur, qui est souvent très cher car demande une spécialisation d'un système déjà très complexe. De plus, les systèmes d'information n'ont pas la capacité d'accueillir les technologies de valorisation de données car cela nécessite l'intégration d'algorithmes spécifiques au contexte et aux besoins de l'entreprise. La valeur ajoutée de ces algorithmes dépend aussi du nombre des données et de leur variété dans la chaîne de valeur, c'est un besoin que ne peut pas fournir un système d'informations développer pour des fonctionnalités précises.

Dans un contexte de PME, une interopérabilité basée sur l'intégration des systèmes d'information n'est pas adaptée. Tout d'abord, les systèmes d'information sont trop rigides pour les PME car celles-ci ne répondent pas aux mêmes exigences que les grandes entreprises et recherche de la flexibilité dans leurs processus d'affaires et des solutions adaptables à leur environnement (Moeuf et al., 2020). Ensuite, les systèmes d'information proposant des solutions de valorisation de données ou des capacités de spécialisation sont souvent des systèmes très chers qui ne sont pas accessibles pour les PME. De tels systèmes demandent aussi une expertise très spécifique pour choisir le système, les mettre en place, les intégrer aux processus et les utiliser dans la production quotidienne. Les PME n'ont pas cette expertise et se retrouvent bloquées par la complexité des technologies. Les intégrations verticale, horizontale et d'un bout à l'autre des systèmes sont aussi à prendre en compte. On a vu dans cette section que les systèmes d'information utilisaient des standards, comme l'ISA 95 ou l'OPC-UA, pour interopérer mais on a aussi vu en section 2.2 que les standards sont des défis pour les PME. Finalement, l'implantation de tels systèmes demande des changements de culture d'entreprise et du temps alors que la culture d'entreprise est une des contraintes pour les PME et que des modifications d'organisation et de processus sont des sources de résistances.

Les approches actuelles ne sont donc pas suffisantes pour définir un cadre d'interopérabilité en PME avec d'important défis financiers, d'expertise et de complexités et une impossibilité d'avoir un développement rapide des solutions (Goerzig & Bauernhansl, 2018). Les solutions ont besoin d'utiliser un maximum de données et de s'adapter au contexte des PME. La technologie orientée service (SOA) est une solution pour utiliser le potentiel de l'environnement et des nouvelles technologies, permettant ainsi de gérer l'interopérabilité des systèmes. Elle permet de développer

des solutions personnalisées et est très compatible avec des approches agiles qui, à l'inverse des architectures complexes et des approches en cascade, privilégient des cycles courts de développement et des itérations de révisions et d'adaptation. Goerzig et Bauernhansl (2018) font notamment la critique que les architectures d'entreprises offrent des solutions trop extensives et inflexibles, les auteurs proposent donc une implantation agile mais leur solution se repose sur un système ERP pour développer de nouvelles capacités, ce qui n'est pas adapté pour des environnements de PME ayant des systèmes d'information et des ERP peu performants.

On a vu dans cette section que la collecte des données des sources d'information est un prérequis pour la valorisation de données mais que cette collecte nécessite un cadre d'interopérabilité dans l'entreprise pour permettre de corréler et de contextualiser les données. Les auteurs de ce mémoire ont remarqué un manque de solution dans la littérature répondant aux problématiques d'interopérabilité en contexte de PME. Ce manque peut s'expliquer par la culture industrielle actuelle des grandes entreprises qui se repose sur des solutions utilisant les systèmes d'information complexes pour développer de nouvelles capacités. Les PME doivent se détacher de ce paradigme pour développer des solutions moins complexes et plus adaptables leur permettant de valoriser leurs données. Une stratégie de l'industrie 4.0 répond à ce besoin en introduisant la technologie de système cyber-physique (CPS) pour représenter la forte coordination entre le monde physique et le monde informatique (Colombo et al., 2017).

## **2.3 Utilisation des CPS pour l'implantation d'un cadre d'interopérabilité**

### **2.3.1 Définition**

Les CPS jouent un rôle important dans l'adoption d'une stratégie d'industrie 4.0 (Wan et al., 2016). Certains auteurs définissent même l'industrie 4.0 grâce à l'intégration d'un CPS dans les processus (Kagermann, 2013). De la même manière que beaucoup de nouveaux concepts et technologies, la littérature recense plusieurs définitions du terme système cyber-physique (Jordan et al., 2017) mais une grande majorité s'entend pour dire que les systèmes cyber-physiques sont une nouvelle génération de système intégrant les technologies informatiques dans le monde physique (Ahmadi et al., 2017; Colombo et al., 2017; Sinha & Roy, 2020). Le terme a été introduit en 2006 par la fondation nationale des sciences (National Science Foundation NSF) américaine pour désigner ce nouveau lien entre le monde physique et virtuel (Colombo et al., 2017; Sinha & Roy, 2020). Les

technologies d'information et de communication jouent un rôle essentiel dans les CPS pour assurer les communications et l'interopérabilité entre les éléments physiques et informatiques (Lam & Haugen, 2019). Les CPS ont initié un nouveau paradigme de communication et de coopération entre les participants des chaînes de valeur, dont les équipements, les systèmes, les organisations et les humains (You & Feng, 2020).

Les CPS reprennent et enrichissent un concept clé de l'interopérabilité qui est l'intégration technologique dans l'entreprise avec l'intégration verticale, l'intégration horizontale et l'intégration de bout à bout (Faller & Feldmüller, 2015). Pour réaliser ces intégrations, les machines et les produits sont équipés d'éléments informatiques, que ce soit des capteurs, des microcontrôleurs, des antennes ou des programmes informatiques, pour gérer les données : collecter, stocker, transmettre, traiter, visualiser ou appliquer (Müller et al., 2018). Le CPS est un acteur majeur de la connectivité ubiquitaire des entreprises en assurant l'interopérabilité entre toutes les entités, humaines et machines, engagées dans la production (Trabesinger et al., 2019). Même si certaines industries intelligentes visent des processus autonomes, cela ne veut pas dire que ces industries ne vont plus avoir besoin des ressources humaines pour fonctionner (Chen et al., 2017). Les systèmes cyber-physiques ne sont pas des systèmes fermés mais ont besoin d'interagir avec les humains pour les prises de décisions mais aussi pour que l'entreprise puisse comprendre, utiliser et optimiser les installations, les processus et les services (Colombo et al., 2017). Le système résultant comprend donc des communications entre machines (M2M) et entre les humains et les machines, ce qui le rend conscient du contexte de production et d'affaires et permet la disponibilité en temps réel des données et des prises de décisions (Prause, 2019). Cependant, les choix des solutions techniques dépendent des éléments physiques considérés et des besoins de l'entreprise (Lee et al., 2015).

Ce système cyber-physique est un acteur majeur de la connectivité permettant de connecter des sources physiques, de valoriser les données dans l'espace virtuel et d'introduire des prises de décision en temps réel et décentralisées. Des architectures ont été réalisées pour définir les éléments nécessaires pour la réalisation d'un CPS.

### 2.3.1.1 Vue fonctionnelle

Une architecture fonctionnelle a notamment été proposée par (Lee et al., 2015) avec 5 niveaux : connexion, conversion, cyber, cognition et configuration. Cette architecture appelée architecture 5C dans la littérature explicite 5 fonctionnalités logiques présentes dans un CPS.

#### 2.3.1.1.1 Connexion

Le développement d'un CPS commence par la connexion des sources de données pour collecter leurs données. Plusieurs données peuvent être récupérées dont les voltages de moteurs, des températures, des vibrations, des vitesses etc. ou encore des données plus complexes comme des images, des vidéos ou des fichiers spécifiques. On retrouve aussi toutes les données des systèmes d'information qui sont souvent dans des bases de données. Différents équipements peuvent donc être utilisés pour acquérir ces données, comme des capteurs, des interfaces logicielles ou des systèmes plus complexes comprenant la captation et un traitement préliminaire des données, comme par exemple une caméra intelligente qui identifie des formes sur une image. Chaque équipement doit cependant être couplé à un protocole de communication pour que le CPS puisse recevoir et stocker les données des sources (Ahmadi et al., 2017).

Certaines sources de données sont les employés ou les clients et leurs données peuvent être utilisées dans un cadre éthique mais il est beaucoup plus important de collecter des données de façon automatiques sur les autres sources pour avoir des données en plus grande quantité et plus fiables (Lee et al., 2017). Les données industrielles peuvent être caractérisées par le modèle 5V : le volume (en quantité et en volume de stockage), la variété (en termes de sources), la vitesse (en termes d'acquisition), la véracité (en termes de biais, de complétude, d'ambiguïté, de bruit, d'approximation etc.) et de valeur (en termes de potentielle d'utilisation) (Tao et al., 2018). Ce modèle 5V justifie que des données machines sont plus importantes car plus volumineuses, plus diversifiées, plus rapides, plus exactes et donc avec un plus grand potentiel. Deux facteurs sont importants pour la collecte automatique (Lee et al., 2015). Premièrement la variété et l'hétérogénéité des sources nécessitent de développer une solution assez générique pour un grand nombre de source, comme des standards d'interopérabilité, ou d'utiliser une solution très modulaire permettant de s'adapter aux sources comme une architecture orientée service (SOA) qui permet soit de se connecter aux services de la source ou de développer un adaptateur pour la source fournissant un service à partir des données et du format de la source. Deuxièmement, la sélection

des capteurs est importante pour collecter des données permettant de répondre aux besoins de l'entreprise, par rapport aux 5V mais aussi en termes de compatibilité avec les infrastructures informatiques et mécaniques de l'entreprise. La connexion des sources de données est aussi la première étape pour une intégration verticale en entreprise (Frank et al., 2019).

#### *2.3.1.1.2 Conversion*

Ce niveau s'intéresse à la création d'informations à partir des données collectées localement. Différentes technologies peuvent être utilisées dont les techniques de valorisation des données, mais le périmètre d'étude est restreint à une machine ou à un petit lot de machines pour leur fournir un accès à des informations en temps réel sur leur état en tant qu'individu.

#### *2.3.1.1.3 Cyber*

Le niveau cyber agit comme le système de centralisation des informations dans l'architecture. Les informations des différentes unités connectées du CPS sont communiquées à ce niveau au travers du réseau de l'entreprise. La grande quantité d'informations et de données rassemblée permet d'utiliser la valorisation sur des données massives pour en déduire des informations sur l'ensemble des machines. La valorisation des données est un processus complexe consistant à utiliser des outils mathématiques pour extraire et générer de l'information en temps réel à partir des données des différentes sources. Ces informations peuvent ensuite être utilisées pour créer de l'intelligence et développer des capacités avancées de prévisions et d'identification des événements pouvant affecter la production, la qualité et la maintenance (Frank et al., 2019). L'exploration des données peut apporter d'énormes bénéfices pour supporter les prises de décisions et déterminer les cibles potentielles d'amélioration (Moeuf et al., 2020). Il est notamment possible de réduire le taux d'erreurs, réduire le pourcentage de rejet, créer des plannings de production optimisés, augmenter la qualité des produits et augmenter l'efficacité par rapport aux coûts (Horváth & Szabó, 2019). Le traitement systématique des données de production sert aussi à augmenter la quantité d'information considérée dans les prises de décisions et ainsi améliorer l'efficacité des systèmes de production.

Là où le niveau conversion s'intéresse aux informations de l'état des équipements, le niveau cyber permet de développer des capacités de comparaison entre les équipements pour mesurer les performances de chaque unité et pour analyser l'ensemble des anciens comportements individuels pour prévoir le comportement d'une machine en particulier. Cependant, il est important

d'enregistrer et de traiter seulement les données qui sont utiles pour diminuer la charge des technologies informatiques (Horváth & Szabó, 2019). Il faut aussi prendre en compte que la valorisation des données nécessite des ressources humaines hautement qualifiées avec des compétences en statistique et en traitement de données.

#### *2.3.1.1.4 Cognition*

Ayant accès aux états des machines en temps réel, à des connaissances sur les processus de production antérieurs et à des aides à la décision, des tableaux de bord peuvent être réalisés pour surveiller les processus et optimiser les prises de décisions pour mieux s'adapter aux différentes situations. La visualisation des données, des informations et des connaissances permet de créer une présentation précise et explicite pour les employés avec des relevés, des graphiques, des diagrammes, des tableaux ou encore avec l'aide de la réalité augmentée ou virtuelle (Tao et al., 2018). La valeur ajoutée des données est plus accessible et permet de définir des priorités d'action, que ce soit en maintenance, en qualité ou en production.

#### *2.3.1.1.5 Configuration*

Ce dernier niveau est le retour du niveau cyber vers le monde physique. Le CPS acquiert des capacités de contrôle des processus de production et rend les équipements autonomes vis-à-vis des paramètres extérieurs, de la demande et des changements dans l'environnement industriel. Le CPS permet donc aux ressources physiques de fournir des informations au domaine virtuel, mais aussi d'en recevoir malgré l'hétérogénéité des systèmes spécialisés de hautes performances du plancher de production.

### **2.3.1.2 Vue organique**

Comparée à une architecture fonctionnelle qui définit les fonctions d'un système indépendamment de sa réalisation, une architecture organique sert à définir les éléments à réaliser concrètement ainsi que les interactions entre ces éléments. Une telle architecture peut notamment être décrite avec 4 niveaux : physique, réseau, nuage informatique et terminal de contrôle (Chen et al., 2018; Wan et al., 2016; Wang, Wan, Li, et al., 2016; Wang, Wan, Zhang, et al., 2016).

#### *2.3.1.2.1 Physique*

Les éléments physiques connectés présents sur la chaîne de production forment le niveau physique dont les équipements de production, les capteurs, les produits connectés mais aussi les autres sources de données physiques comme les équipements d'analyses et les systèmes de captations isolés. Ces systèmes sont souvent caractérisés par leur hétérogénéité, leurs spécificités, leurs indépendances et leurs propriétaires et peuvent nécessiter des adaptateurs pour se connecter aux réseaux.

#### *2.3.1.2.2 Réseau*

Le niveau réseau correspond à tous les équipements informatiques et les protocoles de communication permettant de transmettre les données et les commandes entre le niveau physique et l'espace virtuel du niveau nuage informatique. Les réseaux de communication jouent un rôle important dans les systèmes cyber-physique, il est possible de comparer ce rôle à celui du système nerveux dans le corps humain (Wan et al., 2016). Le réseau doit pouvoir assurer une qualité de service, des communications fiables et la coopération entre les équipements pour fournir de faibles délais de communication, une grande densité d'accès, une faible consommation d'énergie et une synchronisation très précise. Les problématiques réseaux sont donc très similaires que celles pour les interopérabilités sémantique et technique et nous retrouvons les mêmes solutions dont les architectures SOA et OPC-UA ainsi que l'ensemble des protocoles industriels.

L'objectif reste de définir un format d'échanges commun et bien défini pour communiquer avec l'ensemble du niveau physique. La logique doit être définie de façon à ne pas être obligée de modifier les équipements spécifiquement et une des technologies des TIC est le concept de système médiateur (middleware). Ces systèmes permettent d'embarquer des algorithmes sur les équipements pour contrôler et surveiller les flux de données, gérer les routes d'accès et créer les services nécessaires à partir des données. Ces systèmes permettent de gérer plusieurs phases de cycle de vie des données dont la collecte des données mais aussi le stockage et la transmission, voire le traitement de données dans certaines situations.

Ces deux premiers niveaux (i.e. les niveaux physique et réseau) correspondent dans la littérature au concept d'internet des objets (IoT) ou à l'internet des objets industriels (IIoT). L'IoT est un concept très large avec plusieurs définitions en fonction du domaine et des intérêts, des objectifs et du contexte des parties prenantes et des projets (Ghobakhloo, 2018). Dans la littérature sur l'industrie 4.0, le terme est communément référé par l'IIoT pour désigner un environnement dans

lequel les objets physiques procèdent des capacités informatiques pour surveiller, découvrir et interagir les uns avec les autres au travers d'interfaces réseaux. Les technologies d'IIoT sont principalement les protocoles de communications, des architectures de systèmes médiateurs mais aussi des architectures plus complexes comme les réseaux définis par logiciel (SDN). Par conséquent, l'IIoT répond aux problématiques d'interopérabilité et d'intégration technologique aux niveaux physique et réseau du CPS (Pivoto et al., 2021). L'IIoT traite des problématiques avancées de performance du niveau physique et réseau mais la plupart des solutions actuelles restent à bas niveau hiérarchique et nécessite d'être de liés avec un espace virtuel pour les intégrer verticalement dans l'entreprise (You & Feng, 2020).

#### 2.3.1.2.3 *Nuage informatique*

L'espace virtuel centralisant les données, les algorithmes et les services est déployé dans le nuage informatique. D'après l'institut national des standards et des technologies (NIST), le nuage informatique est (NIST, 2011) :

« Un modèle permettant un accès réseau ubiquitaire, commode et à la demande à un ensemble partagé de ressources informatiques configurables (e.g. réseaux, serveurs, espaces de stockage, applications et services) qui peut rapidement être mis à disposition et libéré avec un minimum d'effort de gestion. »

Trois niveaux de services sont associés à cette définition : une infrastructure comme service (IaaS), qui fournit un accès à des ordinateurs virtuels et à des serveurs, une plateforme comme service (PaaS), qui fournit un accès à des systèmes d'exploitation, des bases de données et des bibliothèques de langages informatiques, et un logiciel comme service (SaaS), qui fournit un accès à des applications sur internet.

A partir de cette définition, on remarque que l'utilisation d'un nuage informatique, avec l'exécution des algorithmes, l'optimisation des prises de décision mais aussi le stockage de grande quantité de données, est essentielle dans un CPS et dans la majorité des applications d'une stratégie d'industrie 4.0 (Wan et al., 2016). Il faut cependant noter que le nuage informatique permet de fournir un accès aux ressources informatiques dans toute l'entreprise mais que ces ressources ne sont pas obligatoirement délocalisées. Plusieurs organismes proposent les trois niveaux de services aux entreprises mais il est possible de gérer un nuage en interne pour fournir un accès aux ressources ubiquitaire, commode et à la demande à tous les employés.

Les données et les informations collectées au niveau physique sont communiquées au niveau réseau jusqu'au niveau du nuage informatique. Cela permet au CPS de coordonner et optimiser le système dans son ensemble grâce à la valorisation des données. Il est notamment possible d'utiliser une architecture SOA pour créer des services virtuels, sous forme d'interfaces, grâce aux techniques d'exploration des données (You & Feng, 2020). L'utilisation d'un nuage informatique permet aussi de répondre aux problématiques de distribution et d'interopérabilité sémantique des données en créant une représentation des différents concepts et leurs liens permettant au nuage d'interpréter la sémantique des différentes données (Tao et al., 2018). Des ontologies peuvent notamment être utilisées pour modéliser les industries intelligentes (Chen et al., 2018). Ces modèles s'appuient sur des technologies de base de données pour enrichir les modèles classiques et gérer des systèmes plus complexes et intelligents.

#### *2.3.1.2.4 Terminal de contrôle*

Le terminal de contrôle est le lien entre le CPS et les employés de l'entreprise. Les terminaux, ou interfaces homme-machine (IHM) peuvent être des ordinateurs, des tablettes, des téléphones, des écrans et toutes les technologies de réalité virtuelle et augmentée. Bien que les stratégies d'industrie 4.0 sont centrées sur l'adoption des nouvelles technologies avec les CPS, l'IoT, les nuages informatiques ou la valorisation des données massives, les ressources humaines restent des éléments clés pour prendre des décisions mais aussi pour comprendre, utiliser et optimiser les installations, les processus et les services (Sinha & Roy, 2020). C'est pourquoi ce niveau permet de réaliser la fonction de cognition vue dans la section 2.4.1.1.4 qui est de communiquer des informations structurées, adaptées, précises et explicites aux employés en fonction des besoins, du contexte et des objectifs de l'entreprise.

D'autres liens peuvent être réalisés entre la vue fonctionnelle et organique. En effet, ces deux vues sont complémentaires et chaque fonctionnalité de l'architecture 5C sont réalisé dans l'architecture organique, voir tableau 2-1.

Tableau 2-1 : Liens entre les vues fonctionnelle et organique d'un CPS

Vue fonctionnelle	Vue organique
Connexion	Les niveaux physique, réseau et nuage informatique se partagent les responsabilités de connecter les sources d'informations. Le nuage informatique permet de connecter les sources de données ayant déjà des services.
Conversion	La conversion des données en information se fait en majorité au niveau du nuage informatique car c'est lui qui héberge les algorithmes et la logique de calcul, que ce soit pour les états individuels ou les décisions stratégiques. Cependant, la technologie des systèmes médiateurs permet d'intégrer des capacités de calcul sur certaines sources pour ne pas surcharger la bande passante des réseaux de l'entreprise.
Cyber	Le système de centralisation des informations est au niveau du nuage informatique, qui comprend aussi l'ensemble des techniques de valorisation de données.
Cognition	La fonction de cognition est réalisée grâce au niveau terminal de contrôle.
Configuration	Cette fonction n'a pas été explicitement étudiée dans la vue organique mais la connexion réalisée entre les niveaux physique, réseau et nuage informatique comprend des services de surveillance et de collecte mais aussi de contrôle des actionneurs.

On remarque que chaque fonctionnalité de l'architecture 5C est réalisée par un ou plusieurs niveaux de la vue organique d'un CPS. Il faut aussi souligner le fait que les CPS ne sont pas isolés des systèmes d'information des entreprises. On a vu en section 2.3.2 qu'il existait des systèmes d'information fournissant les fonctionnalités des différents niveaux hiérarchiques d'une entreprise et que ces systèmes d'information peuvent utiliser des technologies SOA et des bases de données. Il est donc possible pour les CPS de se connecter aux systèmes d'informations, de la même façon

qu'ils se connectent aux équipements du niveau physique, pour accéder et réutiliser les fonctionnalités des systèmes d'information (You & Feng, 2020). L'interopérabilité dans les CPS est leur capacité d'interagir avec les systèmes d'informations, les autres CPS et les unités de contrôle de la production (Zakoldaev, 2019).

Les CPS gèrent l'ensemble du cycle de vie des données avec de la collecte, de la transmission, du stockage, du traitement, de la visualisation et de l'application. Les CPS sont donc responsable des étapes de transmission et d'application des données en plus par rapport aux systèmes d'information. Ces étapes permettent aux CPS d'avoir un plus grand périmètre dans les systèmes et les processus physiques. Les CPS sont aussi plus flexibles et modulaires par construction. Les éléments des niveaux physique et réseau sont beaucoup moins contraints par les technologies et les capacités des autres systèmes par rapport aux systèmes d'informations donc chaque source d'information est responsable de ces données et de ces services, et ceux-ci peuvent être mis en relation au niveau du nuage informatique. Les capacités des CPS de connexion flexible, de centralisation des données et d'accessibilité décentralisée des informations permettent aux entreprises d'une part de gérer l'ensemble du cycle de vie de leurs données et d'autre part de réorganiser leurs systèmes et leurs centres de prises de décisions.

### **2.3.2 Organisation des systèmes**

La mise en place d'un CPS permet d'aplatir l'architecture pyramidale définie par l'ISA-95 qui est dépendante des systèmes d'informations (Riedl et al., 2014). Cette architecture a été caractérisée d'architecture distribuée hiérarchisée dans la section 2.2.2.4 d'après les définitions de (Trentesaux, 2007). Il définit le mécanisme de distribution par la décomposition d'un processus en activité et par l'affectation de ces activités à différentes entités. Dans l'architecture d'une entreprise, les activités sont décomposées en maintenance, production, qualité, superviseur, opérateur, etc. et ces activités sont ensuite affectées aux différents départements et employés de l'entreprise. De plus, l'architecture d'entreprise est communément hiérarchique dans le sens où les entités décisionnelles d'un niveau  $i$  de la hiérarchie ont une priorité d'action ou de droit d'intervention sur une ou plusieurs entités de niveau  $i+1$  (avec le niveau 1 représentant le plus haut niveau de la hiérarchie décisionnelle) et où la performance des entités du niveau  $i+1$  conditionne celle du niveau  $i$  (Trentesaux, 2007).

On remarque qu'une architecture distribuée hiérarchique n'est pas adaptée pour répondre aux enjeux d'intégration technologique et d'interopérabilité. D'une part, la hiérarchie nécessite des transmissions de niveau en niveau et engendre des latences et des instabilités dans les communications entre les différents niveaux, ce qui limite l'intégration verticale. D'autre part, la distribution des responsabilités peut diminuer les communications d'informations entre les départements et limiter l'intégration horizontale de l'entreprise. Finalement, la rigidité des systèmes d'information restreint l'interopérabilité avec les autres systèmes et sources de données des entreprises. L'adoption d'un CPS offre la possibilité de redéfinir l'organisation pour créer un réseau interagissant de façon à corréler les informations du cycle de vie du produit avec les informations de la chaîne de valeur et de fournir les connaissances à tous les employés en temps réel et en fonction des besoins (Riedl et al., 2014). Les relations entre les systèmes d'information peuvent aussi être réutilisées pour permettre aux CPS de gérer les communications directement entre les systèmes au lieu de passer par les différents niveaux hiérarchiques. Le CPS est un système évolutif pouvant accueillir de nouveaux systèmes et fournir de nouveaux services en explorant les données de tous les systèmes. Ils vont notamment impacter les processus d'affaires au niveau de l'utilisation des données pour les performances opérationnelles, la surveillance et le contrôle de la production à distance, la prévision des activités, la maintenance des équipements, l'organisation des centres de contrôle et des prises de décisions stratégiques (Ahmadi et al., 2017).

Les architectures permettant cela peuvent être caractérisées d'architecture hétérarchique décentralisée (Trentesaux, 2009). L'hétérarchie a été définie par Trentesaux grâce à la théorie des graphes par :

« Un graphe orienté, composé de nœuds représentant des entités décisionnelles et d'arcs représentant l'interaction de maître-esclave d'une entité décisionnelle (maître) avec une autre entité (esclave), est appelé un graphe d'influence. Si chaque nœud peut être considéré comme maître et comme esclave, sans de lien de hiérarchie, alors le graphe est fortement connecté. Ces connexions définissent une hétérarchie. »

Une architecture hétérarchique est donc l'inverse d'une hiérarchie mais les deux architectures peuvent être complémentaires pour former une hétérarchie au sens large (Trentesaux, 2007), voir figure 2-3. Une hétérarchie au sens large représente une organisation hiérarchique comportant au moins une sous-organisation hétérarchique. Une hétérarchie peut être mise en place grâce au

terminal de contrôle du CPS en responsabilisant les opérateurs de façon à ne plus avoir de relations de supériorité ou de subordination. Cette nouvelle organisation permet d'augmenter la réactivité localement en éliminant les délais de communication. Le principe est donc de permettre aux entités décisionnelles de travailler ensemble pour réagir rapidement au lieu de demander une prise de décisions aux niveaux supérieurs. Le système Kanban est un exemple d'hétérarchie locale qui permet une augmentation de la réactivité de la production.

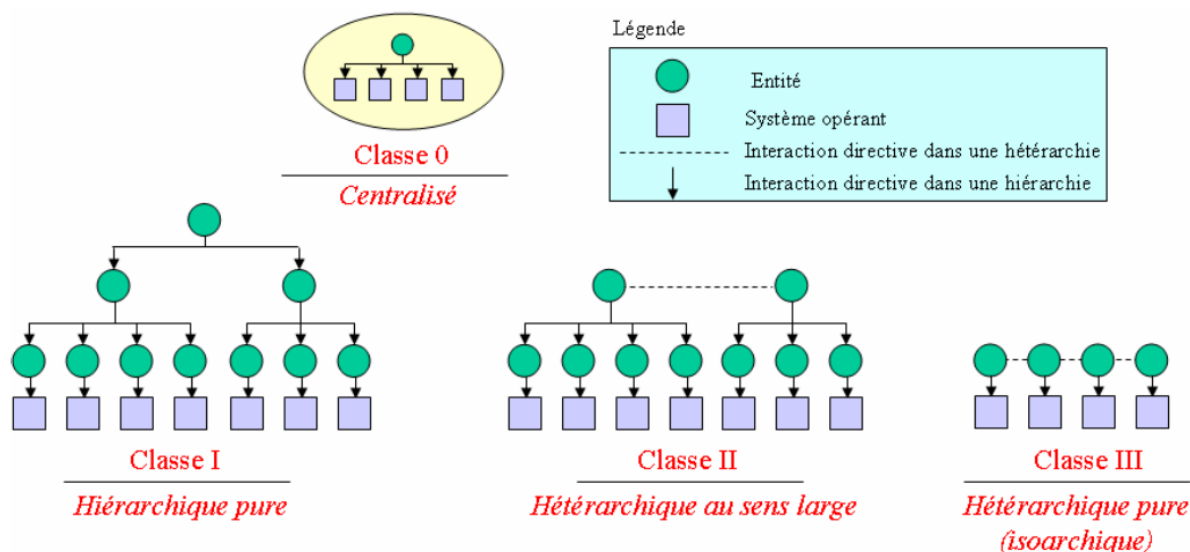


Figure 2-3 : Illustration de la typologie des agencements (Trentesaux, 2007)

(Trentesaux, 2007) définit aussi le mécanisme de décentralisation comme étant la duplication du processus, avec particularisation (paramétrage) des duplicatas selon les contextes spécifiques, et à l'affectation de ces duplicatas aux différentes entités décisionnelles. Si on prend l'exemple d'un processus décisionnel, la décentralisation correspond à dupliquer les informations nécessaires à la prise de décision et les logiques décisionnelles dans toutes les entités. Ces entités peuvent être des systèmes mécatroniques qui doivent donc être connectés à un nuage informatique pour avoir accès aux informations et où toutes les entités embarquent la même logique pour prendre les décisions. Des systèmes décentralisés peuvent aussi être des organisations humaines où toutes les personnes ont accès aux mêmes informations et ont la capacité, et la responsabilité, pour prendre les décisions. Dans les deux cas, on remarque que les informations doivent être décentralisées dans le sens où toutes les informations doivent être dupliquées et accessibles par tous les systèmes et tous les employés. La technologie de nuage informatique permet de répondre à ce défi en enregistrant toutes

les informations sur une seule plateforme et en fournissant l'accès à ces informations à toute l'entreprise. Les employés peuvent donc être informés sur les exigences globales de production et de leurs responsabilités individuelles pour minimiser les erreurs de communication et de copie des informations. Cependant, malgré les bénéfices théoriques d'un système de contrôle de la production décentralisé, les systèmes actuels sont en majorité centralisés, comme tous les systèmes d'information par exemple (Meissner et al., 2017).

La centralisation des systèmes d'information correspond à une centralisation des informations et de la logique décisionnelles (Meissner et al., 2017). Cependant, l'accès aux informations et aux connaissances est souvent local et les informations et décisions sont spécifiques pour répondre aux fonctions hiérarchiques qui leur ont été distribuées. D'après l'architecture d'entreprise de l'ISA-95, et dans un cadre d'interopérabilité, les systèmes d'information représentent des centres de contrôle capables de gérer des décisions stratégiques à leurs niveaux en communiquant des informations aux autres systèmes et en faisant des retours en fonctions des besoins. La force des systèmes centralisés est l'accès à toutes les informations, ce qui est un prérequis pour une optimisation globale et l'utilisation de la valorisation des données. Cependant, cette optimisation de la production fonctionne dans un environnement stable mais lors de situations imprévues, comme des problèmes machines, alors de grosses déviations des plannings peuvent arriver (Meissner et al., 2017). Ces déviations sont dues aux manques de réactivité des systèmes et à la centralisation de la logique décisionnelle. Le principe de décentralisation de la logique est de la dupliquer dans les entités décisionnelles de façon à augmenter la réactivité des systèmes.

La technologie de nuage informatique des CPS permet de centraliser les informations pour une valorisation des données massives tout en gardant un accès à la demande et délocalisé et cet accès décentralisé permet de gérer la logique décisionnelle avec une hétérarchie au sens large. Les entités décisionnelles, humaines ou machines, peuvent créer une hétérarchie locale en ayant les mêmes responsabilités grâce à une duplication de la logique à leurs niveaux tout en gardant des niveaux hiérarchiques pour des prises de décisions stratégiques.

### **2.3.3 Méthodes d'implantation des CPS**

Les méthodes d'implantation peuvent être séparées en deux groupes, les méthodes holistiques, qui ont pour objectif d'analyser les outils de l'industrie 4.0 sous tous leurs angles pour en déduire des

facteurs de succès et des règles générales, et des méthodes spécifiques, qui se restreignent à n'analyser que certains outils mais avec plus de détails (Schumacher et al., 2019).

Ces méthodes se basent souvent sur des architectures comme l'architecture 5C ou des architectures organiques mais aussi sur les standards pour l'implantation des CPS :

- (Jiang, 2017), par exemple, utilise l'ISA-95 ou une architecture 5C pour construire les CPS mais ne rentre pas dans les détails d'implantations.
- Plusieurs approches, dont celle de (Issa et al., 2018), proposent des modèles de maturité et des feuilles de route mais restent au niveau stratégique, sans expliquer la mise en place opérationnelle d'une solution technologique.
- L'article de (Ghobakhloo, 2018) détaille une revue de littérature sur les principes clés de l'industrie 4.0, sur ses technologies et offre une feuille de route stratégique pour guider la transition des entreprises. Cependant, cette feuille de route utilise une approche holistique en décrivant des étapes communes mais fournit une solution très générique qui est difficilement implémentable dans un environnement industriel réel.
- Un autre exemple est l'approche de (Schumacher et al., 2019) qui définit 8 dimensions et utilise 65 catégories de maturité (approche holistique) et en dérive des actions ciblées sur les niveaux de maturité de l'entreprise spécifiques au contexte d'entreprise (approche spécifique). Cette approche résulte en une procédure systématique pour définir les besoins spécifiques de l'entreprise et la feuille de route à suivre. Cependant, l'article reste très général et ne fournit aucun exemple de technologie et aucun exemple d'étape d'implantation à suivre pour adopter les technologies de l'industrie 4.0.
- Une architecture très présente dans la littérature est aussi le modèle d'architecture de référence de l'industrie 4.0 (RAMI40) (Zezulka et al., 2016). Ce modèle 3D représente les dimensions de la chaîne de valeur sur l'axe vertical, les étapes du cycle de vie des produits sur les abscisses et les niveaux hiérarchiques sur la profondeur. Dans ce modèle, on retrouve les concepts d'architecture SOA avec l'utilisation de l'OPC-UA et les intégrations technologiques (Lam & Haugen, 2019; Muller et al., 2017; Pivoto et al., 2021).

Ces approches sont très théoriques et n'illustrent pas comment appliquer concrètement les solutions des architectures de CPS dans un environnement industriel. Ces étapes sont généralement

déléguées aux membres de l'équipe du projet. Ils doivent donc décoder les architectures pour en déduire un plan détaillé, les travaux à réaliser dans chaque phase et réaliser une analyse de retour sur investissement associé à chaque phase. Les besoins et les priorités peuvent aussi être identifiés dans chaque phase pour accompagner les changements dans l'organisation de l'entreprise. Cette perspective technologique des projets est très peu abordée dans la littérature avec des approches spécifiques qui utilisent exclusivement les standards industriels des grandes entreprises (Ghobakhloo, 2018). Ces approches ont cependant tendance à isoler des dimensions à négliger les interdépendances et les problèmes d'interopérabilité (Schumacher et al., 2019). (Lu & Xu, 2018) proposent notamment une feuille de route agile pour créer une ontologie et répondre aux problématiques de virtualisation des équipements physiques.

Dans toutes les approches, les standards sont des éléments de base qui permettent de mettre en place les technologies de l'industrie 4.0 mais ces standards répondent à des exigences spécifiques. Les systèmes globaux doivent donc comporter un agencement de standard, chacun responsable de fonctionnalités précises. L'OPC-UA par exemple traite de la connectivité des équipements de production en répondant aux problématiques d'interopérabilité physique et sémantique mais ne prend pas en compte le traitement des données, ne fournit pas d'infrastructure supportant les algorithmes informatiques et ne permet pas l'intégration des connaissances dans les processus d'entreprise. Il est donc nécessaire de coupler l'OPC-UA avec des standards de communication et d'utiliser un autre système pour valoriser les données. On remarque que les architectures résultantes sont très complexes, et ce en particulier pour les PME.

Les PME manquent d'expertise pour comprendre les architectures des CPS et créer leurs feuilles de route mais manquent aussi de ressources financière et humaine pour identifier et utiliser les différents standards (cf. section 2.2.4). Ces manques peuvent expliquer l'absence d'application de CPS dans les PME mise en avant par la revue de littérature de Pivoto et al (2021).

Ces approches préconisent tout de même de commencer par une analyse de la situation et la définition d'une stratégie et d'un besoin avant de commencer l'implantation des technologies. De plus, pour réaliser la fonction cyber du CPS, une structure de données doit d'abord être construite qui soit cohérente avec les caractéristiques des données des sources, puis des services de traitement des données et de visualisation peuvent être implantés en fonction des besoins de l'entreprise (Chen et al., 2017). La feuille de route de (Lu & Xu, 2018) propose d'utiliser une pratique agile pour

développer une ontologie et structurer les données dans le niveau du nuage informatique. Cependant, une ontologie est une structure complexe et nécessite une expertise inaccessible pour les PME. Par rapport aux systèmes d'information, les applications informatiques suivent les principes SaaS du nuage informatique et permettent de fournir des services de données et d'affaires en utilisant des interfaces pour les humains et les machines (Chen et al., 2017). Des stratégies détaillées sont donc encore nécessaires pour accompagner les PME dans l'adoption des technologies d'industrie 4.0 (Stentoft et al., 2020).

### **2.3.4 Défis de mise en place des CPS**

D'après (Sinha & Roy, 2020), les principaux défis dans la mise en place des CPS sont l'hétérogénéité des systèmes, la complexité des technologies, les interconnexions réseau et les interactions entre le domaine physique et virtuel. Les technologies SOA, d'IoT et de nuage informatique permettent de palier à ces problématiques mais il est nécessaire de les comprendre et d'avoir les compétences pour les mettre en place et les adopter en entreprise.

La cybersécurité des CPS est une problématique très présente dans la littérature (Ghobakhloo, 2018; Horváth & Szabó, 2019; Pivoto et al., 2021; Sufian et al., 2019). Cette sécurité concerne l'accessibilité et la propriété des données mais aussi les risques d'attaque des infrastructures de production. La connexion ubiquitaire sur toute la chaîne de production crée un environnement avec beaucoup de points d'accès et si les éléments connectés ne sont pas gérés correctement alors ils peuvent compromettre la sécurité de tout le réseau. Des exemples de scénarios sont des arrêts du système de production ou des manipulations externes des machines pouvant mettre en danger les opérateurs. Avec l'agrandissement des réseaux, l'espace à protéger croît et donc une stratégie de cybersécurité doit être développée pour protéger les équipements critiques. Un des prérequis est de s'assurer que les décisions et les actions sont réalisées à partir d'informations fiables et correctement authentifiées. Les techniques de cybersécurité regroupent principalement la cryptographie des données transmises, l'authentification des entités communiquant et des contrôles de fiabilité des messages pour éviter les pertes ou les modifications de données durant les communications. Ces problématiques sont aussi présentées en PME (Müller et al., 2018; Prause, 2019).

L'adoption d'un CPS rencontre aussi plusieurs barrières organisationnelles (Horváth & Szabó, 2019). Si les structures organisationnelles ne sont pas assez flexibles, ne supportent pas les flux

d'informations rapides ou ne répondent pas à d'autres exigences spécifiques alors l'introduction de nouveaux processus et de nouvelles technologies peut aboutir en un échec. Dans beaucoup de situations, les entreprises expérimentent des intérêts contradictoires entre les unités organisationnelles, un manque de compréhension des technologies de l'industrie 4.0 ainsi qu'une peur de l'inconnue et de surveillance de la part des employés. Ces barrières engendrent naturellement des résistances au changement, que ce soit au niveau des opérateurs ou des gestionnaires. Cette résistance est peut-être le plus grand défi pouvant entraver la mise en place d'une stratégie d'industrie 4.0 et d'adoption d'un CPS (Horváth & Szabó, 2019). La résistance au changement peut être associée à deux sources (Prause, 2019), le manque de compétence pour les nouvelles tâches ou responsabilités qui engendre une peur de la perte du poste, et la satisfaction des systèmes actuels et de la solution technologique. Plus les employés sont satisfaits avec le système actuel et moins les technologies seront adoptées (Prause, 2019). C'est pourquoi il est important pour les entreprises de bien comprendre les besoins et les technologies pour pouvoir les expliquer aux employés et les convaincre. Les modifications organisationnelles perturbent l'environnement social de l'entreprise donc celle-ci doit savoir s'adapter aux changements de hiérarchie et de personnel engendrés par la mise en place d'un CPS. Un des meilleurs moyens pour s'adapter est de communiquer avec les employés et faire preuve de transparence (Moeuf et al., 2020)

Le dernier défi est le temps de développement (Horváth & Szabó, 2019). Que ce soit l'intégration des technologies dans les systèmes existants ou l'adoption des technologies par les employés, cela prend du temps et les premiers résultats ne sont pas immédiats.

## **2.4 Conclusion**

L'industrie 4.0 est une stratégie qui permet de développer des avantages concurrentiels importants. Les PME ne profitent pas encore de tous les bénéfices de cette stratégie à cause notamment de leurs environnements contraints par leurs ressources financières, leurs expertises, leur culture d'entreprise, leur adoption des standards, leur situation initiale, leur familiarité avec les technologies complexes et leur stratégie à court terme. Plusieurs approches ont déjà été développées pour accompagner les PME dans leur transition pour analyser leur situation initiale, analyser leur besoin et implémenter une stratégie d'industrie 4.0. Cependant, la littérature recense peu d'exemples d'application des approches d'industrie 4.0 en contexte de PME et a un manque

de méthode d'implantation des solutions technologiques. Un de ces manques est l'absence de feuille de route pour répondre aux problématiques d'interopérabilité des systèmes en PME.

L'interopérabilité est pourtant essentielle pour permettre aux sources de données de communiquer et de coopérer entre elles, dans le but d'ajouter de la valeur aux données et les intégrer aux processus de production. Les grandes entreprises utilisent des systèmes d'information complexes, couplés avec des architectures d'entreprise et des standards industriels pour gérer leurs données et l'interopérabilité de leurs sources. Cependant, ces solutions ne sont pas adaptées aux contextes de PME. En effet, les systèmes d'information et les standards sont des solutions coûteuses, rigides et complexes, qui nécessitent des compétences spécifiques et qui ne sont pas adaptées à un développement rapide. Certaines solutions comme les pratiques agiles et les architectures SOA sont cependant adaptées aux PME avec une plus grande flexibilité d'utilisation et une possibilité de mettre en place des cycles courts et des itérations de développement.

La technologie des CPS peut répondre aux problématiques d'interopérabilité en adoptant des architectures ou des standards d'interopérabilité comme les SOA. Les CPS connectent l'ensemble des processus physiques grâce aux technologies numériques. Ils réutilisent les services des systèmes existants et les couplent avec des services d'autres systèmes isolés pour développer une structure flexible et réactive permettant de collecter, transmettre, stocker, traiter, visualiser et appliquer leurs données. Ces systèmes ont été définis dans la littérature et ont la possibilité de redéfinir l'organisation d'une entreprise. Cependant, les méthodes d'implantation des CPS présentes dans la littérature sont des approches théoriques difficilement applicables dans des contextes industriels particuliers et utilisant des standards et des technologies souvent inaccessibles pour les PME.

## **CHAPITRE 3 DÉMARCHE DE RECHERCHE**

Ce chapitre vise à présenter les objectifs du projet et proposer une démarche méthodologique permettant de répondre à la question de la recherche. Cette question de recherche est présentée à la Section 3.1 et découle des manques issus de la revue de la littérature.

### **3.1 Objectif de recherche**

Il a été identifié dans la revue de littérature que les méthodes d'implantation des CPS n'étaient pas adaptées aux PME et que les PME avaient des difficultés pour connecter l'ensemble de leurs systèmes, créer un cadre d'interopérabilité et bénéficier de la valorisation des données. Cela nous amène à formuler la question de recherche suivante :

Comment mettre en place un cadre d'interopérabilité dans un contexte de PME pour supporter la valorisation des données ?

L'objectif général de ce mémoire est de proposer une feuille de route pour accompagner les PME dans la mise en place d'une architecture de CPS. La feuille de route précisera les étapes pour mettre en place un cadre d'interopérabilité en répondant aux problématiques des niveaux technique, sémantique et organisationnelle grâce à la technologie des CPS. Le CPS permettra aussi de gérer l'ensemble du cycle de vie des données et fournira une structure supportant la valorisation des données. La feuille de route et les solutions technologiques devront notamment prendre en compte les défis et les facteurs de succès présentés précédemment. De plus, la mise en place d'une solution générique est difficile dans les contextes de PME à cause de leurs différences avec les grandes entreprises et des différences entre elles. C'est pourquoi la feuille de route proposée se veut générique dans le sens où un grand nombre de PME peut l'utiliser pour développer des solutions spécifiques à l'environnement et aux besoins de l'entreprise. Finalement, cette feuille de route sera mise en œuvre sur un cas d'étude, basée sur une PME qui a récemment mis en place la méthodologie et adopté les technologies.

### **3.2 Démarche**

Pour réaliser l'objectif de la recherche, une approche inductive a été utilisée. La figure 3-1 montre la décomposition de cette démarche scientifique qui permet de donner la priorité aux observations, à l'expérience vécue et au terrain.

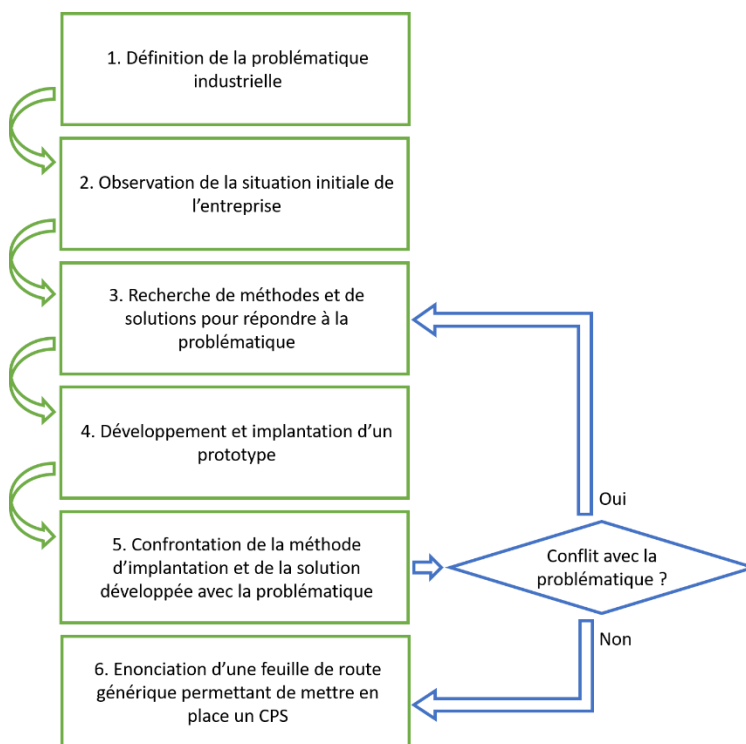


Figure 3-1 : Démarche de recherche

La première étape a été de définir la problématique industrielle, cette problématique a ensuite permis d'énoncer la question de recherche présentée à la section précédente.

Dans un deuxième temps, nous avons faits des observations dans l'entreprise de l'étude de cas en analysant la situation au début du projet. Les outils utilisés pour cette analyse seront détaillés dans la feuille de route du chapitre 4 car c'est une étape commune de notre démarche scientifique et de notre proposition de feuille de route.

La troisième étape a été la recherche de solutions technologiques et de méthodes d'implantation pour répondre à la problématique industrielle. Cette recherche est passée par une revue de la littérature, qui a été présentée dans le chapitre 2, et par des formations sur les différentes technologies. Cet apprentissage a été multidisciplinaire pour se référer à des perspectives et des paradigmes différents. Les domaines tels que les PME, les CPS, l'informatique et le génie industriel ont notamment été revus dans des cadres académiques, industriels et publics. Ces recherches de solutions ont été présentées à l'entreprise et ont permis de développer leur culture en spécifiant notamment les compétences nécessaires pour l'avancée du projet et en formant les employés aux différentes outils de l'industrie 4.0.

Les outils sélectionnés ont ensuite été utilisés pour développer des prototypes qui ont été implémentés en contexte industriel. Les versions actuelles de nos prototypes seront présentées dans l'étude de cas du chapitre 5.

La cinquième étape est la réalisation de tests et d'interviews sur les prototypes pour confronter les solutions et les méthodes d'implantation avec la problématique et le contexte industriel. En cas de conflit, des itérations ont été effectuées pour rechercher de nouvelles solutions ou de nouvelles méthodes. L'implantation des prototypes en contexte industriel réel ont permis de juger les solutions et les méthodes pertinentes en contexte de PME. Toutes les itérations de prototypages ne sont pas présentées dans ce mémoire car plusieurs itérations n'ont pas donné de résultats satisfaisant pour la PME.

La dernière et sixième étape est l'énonciation de la feuille de route résultante des expériences en entreprise. Cette feuille de route assure la cohérence entre les solutions, les méthodes d'implantation et la problématique industrielle. Elle est notre contribution principale et représente notre retour d'expérience de l'ensemble des révisions effectuées sur les prototypes. Les solutions de la revue de littérature ont été analysées et testées pour pouvoir sélectionner les solutions les plus adaptées au contexte de PME. La sélection a été effectué par des critères qualitatifs de satisfaction de la part du partenaire. Les étapes détaillées de la feuille de route sont présentées en chapitre 4 puis leur mise en place chez le partenaire industriel est expliquée dans le chapitre 5.

## CHAPITRE 4 PROPOSITION D'UNE FEUILLE DE ROUTE POUR LA MISE EN PLACE DE SYSTÈME CYBER-PHYSIQUE EN PME

La figure 4-1 présente notre proposition sous la forme d'une feuille de route. Cette feuille de route comprend trois étapes principales, les détails de l'étape 3 de développement d'un CPS et les étapes de validation et d'intégration.

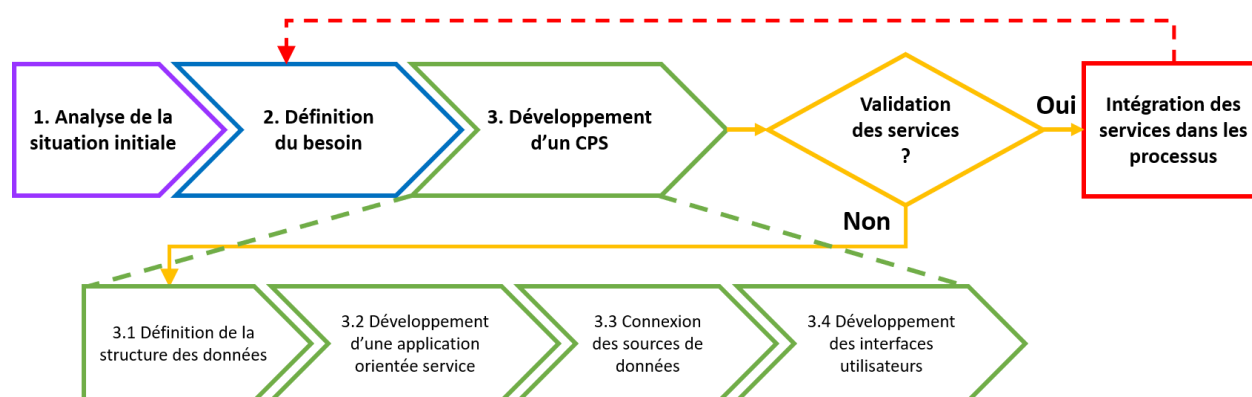


Figure 4-1 : Feuille de route pour la mise en place d'un CPS en PME

La première étape de cette feuille de route est l'analyse de la situation qui sera présentée dans la section 4.1. Puis, des besoins seront identifiés (cf. 4.2) avant le développement d'un CPS. Ce développement est explicité dans la section 4.3 avec les étapes de définition d'une structure de données, le développement d'une application RESTFULL, la connexion des sources de données et le développement des interfaces utilisateurs et de contrôle. Finalement, les services sont validés puis intégrés aux processus.

La feuille route proposée permet de fournir des services pour répondre aux besoins de l'entreprise grâce à un CPS et à une architecture orientée service (SOA) (cf. 2.2.2.1). Ces services peuvent être validés (étape en jaune sur la figure 4-1) par des tests informatiques et par les employés en vérifiant leur accessibilité et leur temps de réponse. Si les services sont validés et répondent aux besoins identifiés à l'étape 2 de la feuille de route alors ils sont intégrés dans les processus en étant utilisés par les employés et les systèmes (étape en rouge sur la figure 4-1). Une boucle peut être réalisée pour définir un nouveau besoin (flèche rouge en pointillée), de la même manière que la procédure « planifier, développer, contrôler, ajuster » (PDCA) en amélioration continue. La définition d'un nouveau besoin dépend de la stratégie de l'entreprise et de sa volonté de continuer à mettre en place un CPS. L'objectif des boucles, de définition d'un besoin, de développement, de validation et

d'intégration, est de permettre aux entreprises de décomposer les besoins et d'organiser des périodes de développement de quelques semaines pour adapter les besoins dynamiquement et au fur et à mesure de la mise en place du CPS. La feuille de route utilise donc une approche agile avec des cycles de développement courts et des itérations de révisions. Dans le cas où un service n'est pas validé et ne répond pas aux besoins alors une itération est réalisée sur le développement du CPS.

Les pratiques agiles adoptées lors de ces itérations sont très couramment utilisées pour développer des SOA. La revue de littérature a montré que ces pratiques sont un facteur de succès dans le contexte de PME en privilégiant une implantation graduelle avec des cycles courts de développement et des itérations de révisions et d'adaptation. Elles sont notamment utilisées pour pallier aux répercussions des changements organisationnels significatifs en permettant aux parties prenantes de s'adapter doucement et de communiquer régulièrement des nouveaux outils.

## **4.1 Analyse de la situation initiale**

**L'analyse de la situation initiale** est la première étape de tout projet industriel et sert à mieux comprendre l'environnement, les systèmes et les données existants dans les processus de l'entreprise au début du projet. La littérature (cf. 2.1.1) montre qu'il existe des approches dont les modèles de maturités et les évaluations de préparation pour répondre à ce besoin et que cette première étude est un facteur de succès pour une stratégie d'industrie 4.0. Même si ces modèles prennent en compte de nombreuses dimensions, l'élément clé de cette étape est de recenser les données de l'entreprise. Dans l'étape 2 de la feuille de route, ces données pourront être positionnées dans le cycle de vie des données : est-ce que les données sont collectées, transmises, stockées, traitées ou appliquées.

La section 2.1.1 présente plusieurs modèles mais il n'y a pas de modèle universel. C'est la responsabilité des parties prenantes présentes lors de la réalisation de cette étape de sélectionner un outil compris et utilisable par tout le monde impliqué. Plusieurs modèles nécessitent des expertises multidisciplinaires pour évaluer les systèmes mécaniques, les systèmes informatiques, la culture organisationnelle et technique, les possibilités financières, etc. En l'absence d'expertise dans ces domaines ou dans les modèles de maturité et d'évaluation, notre proposition est d'utiliser des outils plus connus tels que des cartographies des systèmes, des processus, des services et des

données. Ces alternatives permettent de pallier au manque d'expertise en PME mais peuvent permettre d'analyser la situation de l'entreprise au début du projet.

La première cartographie à réaliser est celle des systèmes et elle consiste à répertorier l'ensemble des systèmes du cycle de vie des produits, de la chaîne de valeur et des niveaux hiérarchiques. Puis, une cartographie des données peut être réalisée. À cette étape, la cartographie des données a simplement pour objectif de recenser les données manipulées dans les processus donc une des possibilités est de cartographier les processus et d'enrichir cette cartographie avec les données utilisées par les employés et les systèmes. La cartographie des processus est d'autant plus importante que les CPS, comme les systèmes d'information, prennent en charge les processus d'affaires d'une entreprise. Les processus d'affaires sont un ensemble d'activité qui nécessite la collaboration entre de nombreuses entités organisationnelles pour réaliser avec succès les objectifs d'une entreprise. Une telle cartographie permet donc de s'assurer que l'entreprise n'effectue pas de processus dont elle n'a pas besoin et de déterminer les processus et leurs données utiles. Ces processus et ses données représentent les priorités à traiter et à valoriser. D'autres cartographies peuvent aussi être utilisées comme des modèles de flux de valeur (VSM) par exemple.

Les procédures pour réaliser ces cartographies passent généralement par des interviews avec les employés pour comprendre comment ils travaillent, quels outils ils utilisent et quelles données ils manipulent. Les rapports, papiers et informatiques, peuvent aussi être analysés ainsi que les affichages des systèmes d'informations et des équipements. Ces interviews et analyses commencent généralement au début du cycle de vie des produits dans l'entreprise puis ils suivent les processus de production. Les informations récupérées peuvent être structurées dans les cartographies. Il existe beaucoup de façon de réaliser ces cartographies. Les systèmes et les données peuvent simplement être listés et catégorisés mais des schémas peuvent aussi être utilisés pour représenter les informations de façon plus explicite. Pour les processus, les principaux formalismes sont ANSI, UML et BPMN. Ce sont des standards accessibles publiquement qui peuvent notamment être utilisés par des logiciels graphiques tels que Visio de Microsoft. Un exemple de cartographies des processus, des systèmes et des données sera présenté dans le chapitre suivant sur l'étude de cas.

Cet ensemble de cartographies basiques permet finalement d'avoir une vue d'ensemble et de connaître les données utiles et leurs sources.

## 4.2 Définition des besoins

**La définition des besoins** repose sur **l'analyse de la situation initiale** pour définir des besoins et des objectifs ciblés et cohérents. Des architectures d'entreprise, dont celle présentée dans la norme l'ISA-95 (cf. 2.2.2.2) ou les architectures de CPS (cf. 2.3.1), peuvent permettre de définir les besoins en identifiant des manques entre la situation initiale de l'entreprise et les architectures. Cette étape permet de bien définir le périmètre et la stratégie de migration entre les processus au début du projet et les solutions utilisant les technologies des CPS. Cette stratégie comporte la réutilisation de certains services et systèmes et l'intégration des nouvelles demandes. Les boucles existantes et performantes sont préservées et de nouveaux services sont proposés. **La définition des besoins** peut notamment utiliser la décomposition de (Moeuf et al., 2018) avec des objectifs en termes de flexibilité, de réduction des coûts, d'augmentation de la productivité, d'amélioration de la qualité ou de la réduction du temps de livraison, et des services de surveillance, de contrôle, d'optimisation ou d'autonomie. Une analyse complète peut aussi inclure les détails concernant les objectifs à atteindre, les moyens et ressources disponibles, les propositions d'améliorations et les risques et impacts potentiels.

Notre proposition permet de réutiliser les modèles de **l'analyse de la situation initiale** pour caractériser les sources et pour connaître le positionnement des données dans le cycle de vie des données (cf. 2.1.2) : donnée collectée, donnée transmise, donnée stockée, donnée traitée, donnée visualisée ou donnée appliquée. Des objectifs précis peuvent ainsi être définis en termes d'évolution des données dans le cycle de vie des données et en termes de services voulus. Il est évident que le traitement des données nécessite des données transmises et stockées et des services de traitement. De même, des services d'autonomie dans les systèmes nécessitent des données appliquées dans les systèmes de contrôle et des services de prises de décisions. Concrètement, **l'identification des besoins** permet de définir les données sur lesquelles se focaliser et la maturité des données voulue dans leur cycle de vie, par exemple :

- Si des données sont stockées dans un CPS mais non-traitées alors il y a un besoin de les traiter et d'intégrer la connaissance aux processus.
- Si des données ne sont pas transmises au CPS alors il y a un besoin de transmettre et stocker les données. Puis un autre besoin pourra être défini dans une prochaine itération pour traiter les données stockées.

- Si des données sont nécessaires mais non-collectées alors il y a un besoin de collecter les données, etc.

Une bonne connaissance des caractéristiques des CPS peut aider dans la définition des manques de données et de services en permettant aux parties prenantes d'imaginer les possibilités de solutions. Cette connaissance passe par l'amélioration de la culture d'entreprise. La littérature (cf. 2.1.5) a identifié la culture technologique et organisationnelle comme des facteurs de succès pour une stratégie d'industrie 4.0. Les outils pour développer la culture d'une entreprise peuvent être par exemple des formations, des séminaires ou l'implication des employés dans les projets.

Après avoir ciblés un ou des besoins précis sur des données, une étape de **développement du CPS** est nécessaire pour faire évoluer l'état des données dans leur cycle de vie. Les solutions sont décrites dans la section 4.3. Puis, une étape de validation des services sera effectuée, voir figure 4-1, et des boucles d'itérations agiles seront mises en place. Les pratiques agiles sont communes dans le développement informatique pour répondre dynamiquement aux changements des besoins. En effet, l'objectif est d'utiliser des périodes de développement courtes puis de valider les résultats pour redéfinir d'autres besoins.

Finalement, les cycles courts de développement ne sont pas synonymes de résultats immédiats. La valeur ajoutée d'un CPS peut être séparée en bénéfices de court terme, avec des fonctions de surveillance, de contrôle et d'accessibilité aux informations, et en bénéfices de plus long terme, avec la réorganisation des processus et la valorisation de données. Cependant, nous avons vu dans la littérature que la réorganisation des systèmes et la valorisation de données représentent les moyens les plus efficaces pour développer des avantages concurrentiels dont des décisions basées sur les données et des systèmes de pilotage plus réactifs. Le délai pour accéder aux bénéfices de long terme est dû d'une part au temps nécessaire pour centraliser une quantité et une variété suffisantes de données. D'autre part, les infrastructures technologiques utilisées dans le CPS, comme les protocoles IoT et le nuage informatique, doivent être assez mature pour supporter les techniques et les résultats des traitements de données. Par exemple, des exigences de temps réel nécessitent une importante puissance de calcul et des réseaux robustes.

### 4.3 Développement d'un CPS

La figure 3 représente l'architecture de CPS mise en place dans la feuille de route avec la vue organique d'un CPS et ces liens avec les services des systèmes de l'architecture d'entreprise de l'ISA-95. L'architecture d'entreprise (à gauche) est générique et correspond à une entreprise ayant l'ensemble des services essentiels de l'ISA-95 disponibles, comme vu à la section 2.2.2.2. Cette architecture peut servir à positionner une PME en identifier des fonctionnalités manquantes. Les données nécessaires à ces fonctions peuvent ensuite être identifier et cartographier pour faire l'objet d'un besoin. La figure dans son ensemble modélise une entreprise ayant adopté un CPS avec les services essentiels et les nouveaux services disponibles dans le niveau nuage informatique.

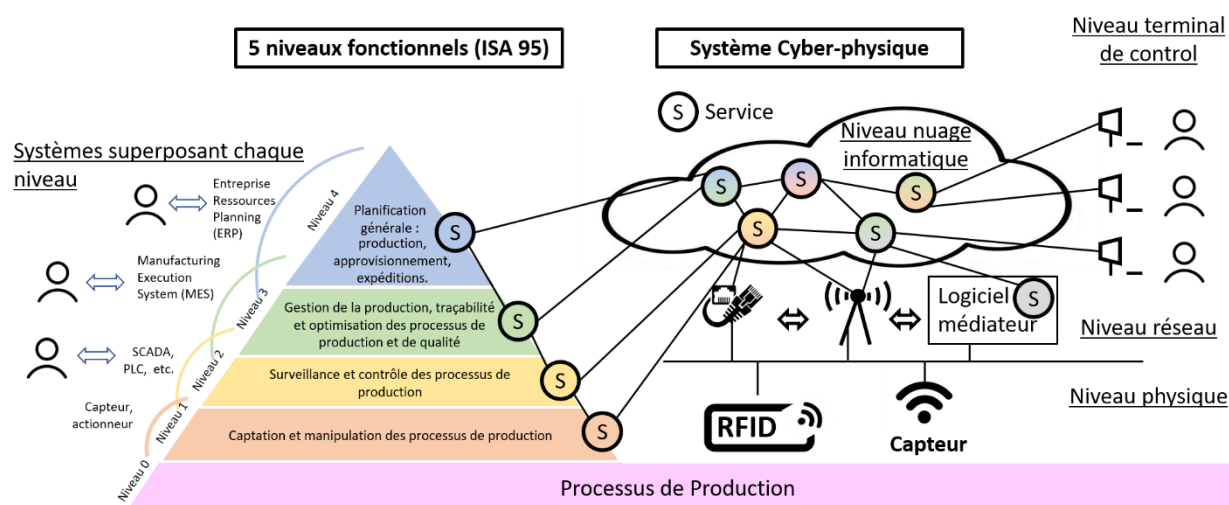


Figure 4-2 : Architecture représentant de la vue organique d'un CPS et ses liens avec les services des systèmes de l'architecture d'entreprise de l'ISA-95

Le modèle de gauche montre les 5 niveaux fonctionnels de la norme ISA-95 ainsi que les systèmes fournissant les services de chaque niveau hiérarchique. On retrouve ici les ERP responsables de la planification générale, les MES pour la gestion de la production et les SCADA pour la surveillance et le contrôle. Ce modèle est une architecture générique d'une entreprise utilisant les systèmes d'information à tous ces niveaux hiérarchiques pour fournir les services essentiels à la production.

Le modèle de droite est une représentation de la vue organique d'un CPS avec le niveau physique, réseau, nuage informatique et terminal de contrôle. On remarque l'utilisation d'une architecture SOA avec la présence des services dans le nuage informatique. Cette technologie utilise des interfaces logiciels, appelées services, pour créer une infrastructure facilitant les interactions et le

partage des capacités entre les systèmes. Elle a été identifiée dans la revue de littérature (cf. section 2.2.2.1 et 2.3.1), comme une des solutions accessibles pour gérer l'interopérabilité entre les systèmes de l'environnement industriel. Dans un CPS, cette architecture permet de créer des services à partir des données du niveau physique, de créer des liens entre les services des sources connectées et l'ensemble des services des systèmes d'informations, et de créer de la connaissance. De plus, vu que les PME ont moins de systèmes d'information, des systèmes souvent moins performants, et n'utilisent pas autant de standards que les grandes entreprises, elles ne peuvent pas se baser sur leurs systèmes existants pour gérer leurs données. Les SOA sont donc une solution leur permettant de réutiliser leurs systèmes existants sans être dépendants d'eux. L'accessibilité décentralisée des informations et des services pour les employés est aussi représentée sur la droite avec le niveau terminal de contrôle.

L'objectif de cette architecture est de créer un cadre d'interopérabilité : un ensemble de source de données capable d'interopérer. Le CPS et les systèmes d'information peuvent être complémentaires car le CPS réutilise les services des systèmes d'information pour créer de nouvelles capacités et de nouvelles connaissances. Plus le cadre d'interopérabilité est grand, et donc plus il y a de sources de connectées, plus l'entreprise pourra ajouter de la valeur dans ces processus et développer un avantage concurrentiel.

Les 4 étapes du **développement du CPS** sont présentées dans les sections suivantes.

### 4.3.1 Définition d'une structure des données

La structure des données est une partie essentielle dans le **développement du CPS** car elle permet de préserver le flux sémantique dans l'ensemble du CPS et du cadre d'interopérabilité. L'objectif est que tous les systèmes, même le CPS, puissent comprendre et utiliser les données et les informations échangées. C'est une étape où l'entreprise doit s'impliquer pour assurer la cohérence entre les processus réels et la structure des données. Une mauvaise modélisation des données ne reflètera pas les processus physiques et créera un décalage entre la représentation virtuelle et le monde physique. Le but du CPS est justement d'assurer le lien entre les données de l'ensemble des processus donc il est nécessaire d'avoir une structure adaptée aux processus.

Plusieurs structures répondent aux besoins dont les ontologies et les diagrammes de classes. Les ontologies sont des structures très complètes qui permettent de modéliser des concepts de façon

systematique. Il existe notamment des structures ontologiques plus ou moins génériques pour modéliser différents concepts industriels. Cependant, cet outil n'est pas commun en industrie et nécessite une expertise dans le domaine pour la créer, la développer et l'intégrer en industrie. Dans un environnement de PME, il est rare d'avoir cette expertise mais il est possible d'utiliser un diagramme de classe pour répertorier les données et les structurer. Ce diagramme permet de structurer les données à l'aide de l'orienté objet et de classes. Une classe est un groupe d'objets ayant les mêmes attributs (ou propriétés), un comportement commun et des relations communes avec les autres objets. Par exemple, si une entreprise veut structurer les données sur ces matières premières, alors il est possible de créer une classe « matière première » car les objets « matière première » ont des propriétés communes (fournisseurs, prix, etc.), un comportement commun (achat, livraison, etc.) et des relations communes avec d'autres objets (toutes les matières premières ont une relation d'appartenance avec les objets fournisseurs, par exemple). Les objets d'une même classe ont chacun leurs propres données mais toutes les données ont le même format (caractères, nombre, booléen, etc.). Ces notions de classes et d'objets sont utilisées dans les bases de données pour désigner les tables et les enregistrements. Les données des objets sont enregistrées dans des tables qui correspondent aux classes du diagramme. Dans l'exemple précédent, la base de données du CPS comprendra une table « matière première » qui enregistre tous les fournisseurs, les prix, etc. de toutes les matières premières. Une base de données permet de centraliser le stockage des données d'une manière bien structurée afin de promouvoir la cohérence, l'exhaustivité, l'exactitude, l'intégrité des données et de garder traces des changements.

La feuille de route préconise d'utiliser un diagramme de classe car c'est un concept très connu et qui permet d'impliquer les employés dans son développement. L'ontologie est une représentation plus complexe et abstraite qui nécessite plus d'effort pour impliquer les employés dans les boucles de développement.

(Duffy, 1999) a proposé une procédure pour définir un diagramme de classe. La première étape est effectuée dans **l'analyse de la situation initiale** avec le recensement des données et des concepts présents dans les processus d'affaires de l'entreprise. La deuxième étape est de définir les classes qui formeront les tables de la base de données. Cette étape est ensuite décomposée pour en premier définir leurs attributs des objets, en deuxième leur identifiant et en troisième leurs relations avec les autres objets. Il existe plusieurs formalismes pour représenter les classes d'un tel diagramme,

les logiciels graphiques, dont Visio de Microsoft, en proposent généralement plusieurs dont le formalisme UML. Il est aussi possible d'utiliser un tableur Excel pour former ces classes.

L'objectif de la structure de données est de réutiliser les données utilisées par les employés et de les structurer. Les données du diagramme de classe sont donc les mêmes données que celles des fichiers Excel et des autres sources d'informations, voir figure 4-3.

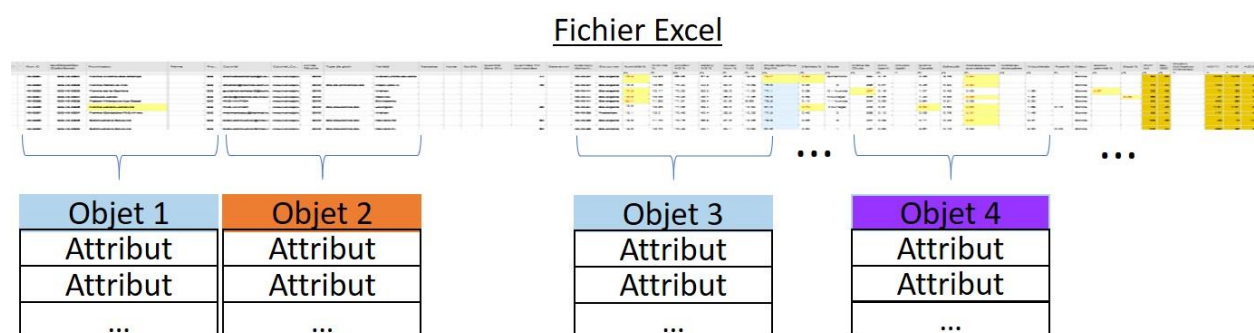


Figure 4-3 : Exemple de création des objets à partir d'un fichier Excel

Cette figure montre un exemple d'un fichier Excel qui centralise des informations de différentes sources. Ces données sont séparées en objets en fonction du contexte des données et de leur source. Sur la figure, la source des objets est représentée par la couleur des en-têtes des objets. D'autres objets sont ensuite définis en reprenant les données des cartographies de **l'analyse de la situation initiale**.

Les attributs sont les données de l'objet. L'ensemble des données répertoriées, et jugées utiles, **dans l'analyse de la situation initiale** doivent être représentées par un attribut d'une classe. Dans la définition des classes et des attributs, il est important de se renseigner sur l'utilisation des données dans les processus car cela conditionne le format, les exigences et les limites des attributs.

L'identifiant de chaque objet est appelé la clé primaire d'une classe. Une clé primaire est un attribut, ou une combinaison d'attributs, qui identifie de façon unique chacun des enregistrements d'une table. Une clé primaire doit toujours contenir une valeur, ce qui signifie qu'elle ne peut jamais être vide car dans le cas contraire, l'objet ne serait plus identifiable. Cet identifiant unique permet aussi au système d'associer cet objet à d'autres objets. On peut distinguer deux formes d'identification : l'identification naturelle et l'identification donnée (Chen et al., 2017). L'identification naturelle est un attribut naturellement unique d'un objet, comme par exemple des empreintes ou des caractéristiques propres. On peut aussi considérer les identifiants d'objets ayant

déjà un identifiant avant d'arriver dans l'entreprise comme des types d'identifiants naturels, par exemple une matière première arrive avec un numéro du fournisseur alors ce numéro est un identifiant naturel pour l'objet dans la base de données. Une identification donnée est affectée artificiellement à l'objet, cet identifiant est généralement une série de nombres, de caractères ou de symboles mais peut aussi contenir des informations sur l'objet, comme une date.

Les relations représentent les liens d'un objet avec les autres objets. Ces liens sont effectués en réutilisant la clé primaire d'une classe comme attribut dans une autre classe. Ce mécanisme permet à un objet d'identifier l'ensemble de ces objets qui lui sont associés. Plusieurs caractéristiques peuvent être considérées pour spécifier ces relations comme la multiplicité, l'héritage, l'association, la composition, l'agrégation, etc. Mais nous n'allons pas traiter de ces sujets dans ce mémoire.

Le format des données, leur encapsulage, leur valeur par défaut, leur source, etc. peuvent aussi être renseignés pour enrichir le diagramme. Le diagramme résultant de cette étude est unique à l'environnement de l'entreprise, aux analyses de la situation initiale et du besoin effectuée.

Une fois que chaque classe a ses attributs, son identifiant et ses relations, on peut valider le diagramme avec les parties prenantes en simulant un processus à la main. Par exemple, si on a structuré les approvisionnements de matière première alors on peut simuler l'achat en dessinant les classes et en enregistrant les données à la main. A la fin du processus, on vérifie que toutes les données sont présentes et que les relations entre les objets sont suffisantes pour contextualiser les données. Cette contextualisation permet de faire la différence entre une donnée seule, comme par exemple « la température est de 30°C » et une donnée contextualisée « pendant la production du lot X, la température était de 30°C ». Dans cet exemple, si les données de température ne sont pas reliées aux données des lots lors de l'enregistrement alors il sera difficile de faire le lien après. Pour les données seules, une stratégie de liaison par date est possible en faisant correspondre la date de la prise de température avec la date de la production mais cette stratégie apporte de l'imprécision, des besoins de calcul et de la complexité dans la logique qui peut être évitée.

La validation du diagramme peut aussi être réalisé avec un diagramme d'activité. Ce diagramme permet de représenter sous forme d'organigramme les scénarios des processus. Les activités du processus sont définies ainsi que leur enchaînement et les objets et les données transmises d'une activité à l'autre. Les données et objets du diagramme de classe doivent donc apparaître dans ce

diagramme. Nous le recommandons notamment pour exprimer la dimension temporelle des données des sources. Un diagramme d'activité affiche le flux du travail à partir d'un point de départ à un point d'arrivée donc le diagramme peut être spécialisé sur le processus étudié dans cette itération de développement. Le diagramme d'activité peut ainsi permettre de modéliser le traitement des nouvelles données et services qui seront accessibles grâce au CPS.

La structure de données créée dans cette étape correspond à la structure de la base de données du CPS. Si une base de données existe déjà dans le CPS alors la structure de données créée dans cette partie doit être mise en relation avec la structure existante. La structure de données de la deuxième itération de la feuille de route doit par exemple reprendre la structure de la première itération pour l'enrichir. Cependant, une infrastructure est nécessaire pour gérer les tables et les objets. Beaucoup de système d'information utilise des environnements de gestion de base de données pour programmer en SQL et développe un logiciel pour accéder aux fonctionnalités de la base de données. Notre proposition utilise une application orientée service, voir section suivante, car cette solution est plus agile et permet de créer une solution modulaire et adaptative.

### **4.3.2 Développement d'une application orientée service**

Après avoir spécifié la structure de données pour répondre au besoin identifié, une application informatique est développée pour créer une architecture SOA, réaliser le niveau nuage informatique du CPS et remplir les fonctions de l'architecture 5C présentées dans la section 2.3.1.1. L'objectif de cette application et de ses interfaces est de permettre aux sources de données de transmettre leurs données et leurs informations (niveau connexion), de stocker ces données dans une base de données centralisée, d'héberger les algorithmes de traitement des données (niveaux conversion et cyber) et de renvoyer d'autres données, informations ou connaissances aux systèmes de contrôle et aux employés (cognition et configuration).

L'objectif de cette étape est de créer les interfaces vers les autres systèmes. La connexion des sources de données seront expliquées dans les sections suivantes. La figure 4-4 illustre cet objectif en réutilisant le niveau nuage informatique de la figure 4-2.

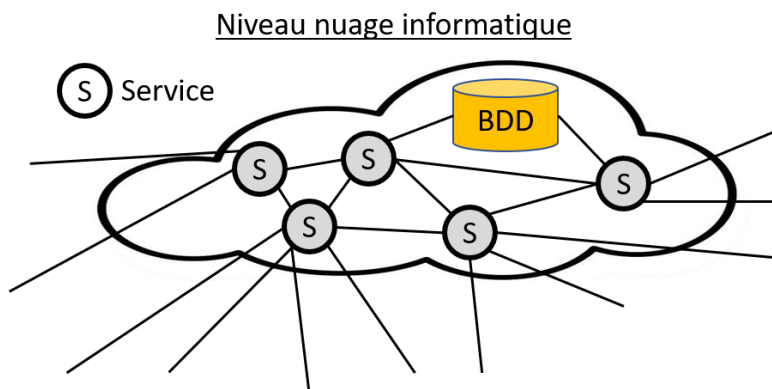


Figure 4-4 : Schéma des services du niveau nuage informatique

Le principe d'une architecture orientée service est de créer des interfaces logicielles (API) pour fournir des services. Ces API sont des programmes qui prennent en entrée des données et qui renvoient d'autres données, généralement après les avoir traitées. Ces interfaces sont définies de façon à spécifier les opérations de traitement, les paramètres partagés lors d'une opération, et les protocoles qui définissent l'échange des paramètres. Une architecture utilise soit une distribution client-serveur soit publier-souscrire. La technologie utilisée dépend d'une part des systèmes présents dans la PME et d'autre part, des compétences auxquelles elle a accès, que ce soit en interne ou en externe. Les compétences requises pour le développement d'une telle application sont des compétences de développement informatique génériques qui sont très présentes dans les cursus actuels de formation et dans les cursus sur internet.

Dans cette feuille de route, nous préconisons d'utiliser une architecture de client-serveur au lieu d'une architecture publier-souscrire. En effet, tous les systèmes et les données sont répertoriés et structurés dans le diagramme de classe donc il est possible de définir tous les clients et les serveurs et leurs interfaces. Les serveurs sont les entités fournissant un service, et donc qui hébergent l'API, tandis que les clients sont les entités qui accèdent aux services grâce à des requêtes.

Une des technologies très utilisées pour développer une application orientée service est la technologie REST (REpresentational State Transfer) (Valle et al., 2019). La dénomination correcte est une application RESTFUL. REST permet de développer des architectures client-serveur basées sur les technologies standard du web (protocole http, xml, Json). Les clients adressent des requêtes aux serveurs qui renvoient aux clients des messages de réponses sous la forme de documents structurés en fonction du protocole utilisé. La technologie REST est donc une manière de répondre

à une requête. La première particularité des applications RESTFUL est la manipulation de ressources et non de données. Les termes sont très proches mais les ressources vont faire référence aux objets que nous avons structurés dans le diagramme de classe. Les échanges entre le client et le serveur sont effectués à l'aide de requêtes qui doivent respecter des règles pour être comprise par l'application en comprenant un corps de message, un verbe HTTP, un identifiant d'application, un identifiant de ressource et un paramètre d'authentification.

Le corps du message des requêtes correspond aux données des sources de données. L'interface du serveur doit être capable de comprendre la structure du message pour être capable de la gérer correctement.

Les principaux verbes HTTP sont :

- GET : la requête GET demande une représentation de la ressource spécifiée. Les requêtes GET sont uniquement utilisées afin de récupérer des données.
- POST : cette requête est utilisée pour envoyer une entité vers la ressource indiquée.
- PUT : La méthode PUT remplace toutes les représentations actuelles de la ressource visée par le contenu de la requête.
- DELETE : La requête DELETE supprime la ressource indiquée.

D'autres méthodes peuvent cependant être développées dans l'application, dont OPTION, UPDATE ou HEAD, mais toutes les API REST doivent pouvoir répondre adéquatement à ces 4 méthodes de bases. Après le verbe, les identifications de l'application et des ressources sont précisées. Si on prend l'exemple d'une application web, il est possible d'utiliser un navigateur pour effectuer une requête GET. Dans ce cas, l'identification de l'application est la première partie de l'adresse entrée dans la barre de recherche et toutes les parties après les barres obliques « / » sont les identifiants de ressources, aussi appelées les points d'accès (end point). Tous les verbes HTTP peuvent être créés avec le même point d'accès pour créer toutes les requêtes pour la même ressource, le même objet.

Une autre caractéristique d'un serveur RESTFUL est que le serveur ne garde pas en mémoire les requêtes effectuées. Par exemple, si un client envoie une requête POST pour créer une ressource alors le serveur va créer la ressource et va renvoyer un message mais le serveur va oublier que l'objet existe. Par la suite, si un client fait une requête GET pour avoir accès à la ressource alors le

serveur ne s'est pas si l'objet existe, il a besoin de questionner la base de données où a été enregistrée la ressource. Cette absence de mémoire de la part du serveur oblige les requêtes à contenir, en plus du verbe et des identifiants, un paramètre d'authentification pour le client.

Dans une requête HTTP, l'authentification peut être basique avec un paramètre sous la forme d'un identifiant et d'un mot de passe ou plus complexes avec l'utilisation d'un token délivré par le système d'autorisation. La méthode d'autorisation est décrite dans (Kolluru et al., 2018) avec l'authentification, qui fait référence aux processus de preuve d'identité, l'autorisation, qui fait référence à la fonction de spécification des droits d'accès aux ressources, et la comptabilité d'accès, qui gère la durée de validité du token. Plus spécifiquement, le client doit demander un token pour accéder à un service. Un token peut lui être délivré s'il est enregistré dans le système d'autorisation comme ayant la permission d'accéder à ce service. Ce token enregistre des informations du système d'autorisation (comme le nom du client, l'identification de la ressource, etc.) mais aussi une période de validité. Ce token est ensuite encrypté avec une clé publique du serveur et une clé privée du système d'autorisation, la clé privée est aussi envoyée au client. A partir de ce moment, le système commence la comptabilité d'accès du token. Tant que le token est valide, le client peut accéder aux services. A chaque requête, le serveur décrypte le token avec sa clé publique et récupère les informations du token, dont la durée de validité. Si toutes les informations sont valides alors le serveur répond au client. Dès que le token n'est plus valide alors soit le système refournit un token au client, soit le serveur rejette la requête et le client doit renvoyer la requête.

Deux niveaux d'interfaces peuvent être développés pour structurer l'application. Le premier niveau est le cœur de l'application, les interfaces de ce niveau permettent de stocker les ressources dans une base de données. Ces interfaces ne sont pas accessibles par les systèmes extérieurs mais seulement par les autres interfaces de l'application et permettent de faire le lien entre la gestion des ressources et un moteur de base de données. La stratégie d'enregistrer ces données dans une base de données unique est commune dans les systèmes de valorisation de données (Valle et al., 2019) car elle permet créer les fonctions conversion et cyber (cf. 2.3.1.1) dans le CPS. Les données manipulées par l'application sont structurées suivant le diagramme de classe défini dans la partie précédente et peuvent être réutilisées comme variable et paramètre dans les algorithmes de valorisation des données pour ensuite être consultées pour de la visualisation et des prises de décisions.

Le deuxième niveau correspond aux interfaces de gestion des ressources du diagramme de classe, elles permettent de définir les requêtes accessibles par les autres systèmes et ainsi transmettre leurs données à l'application. Ces interfaces sont généralement appelées les API. Les plus communes sont les interfaces pour accéder aux ressources (GET), pour en enregistrer (POST, PUT) et pour en supprimer (DELETE).

Les requêtes peuvent être testées grâce à un testeur de requêtes, le plus utilisé est POSTMAN mais un navigateur de recherche peut aussi être utilisé pour tester les requêtes GET. Dans Postman, les requêtes sont effectuées en choisissant un verbe HTTP, en entrant l'adresse qui comporte l'identifiant de l'application et l'identifiant de la ressource, en précisant le corps de la requête si nécessaire (pour les requêtes POST et PUT en particulier) et en s'authentifiant. Une fois que toutes les requêtes sont fonctionnelles pour toutes les classes alors on peut automatiser l'enregistrement en permettant aux sources de données d'envoyer des requêtes, ou en permettant à l'application d'envoyer des requêtes aux sources. L'enregistrement automatique à partir des sources de données, ce qui correspond à la fonction de connexion du CPS (cf. 2.3.1), sera expliqué dans la section 4.3.3. Tandis que l'utilisation des données dans les processus de contrôle et d'aide à la décision (les fonctions cognition et configuration du CPS) sera expliquée en 4.3.4.

Cette application peut notamment être déployée sur un nuage informatique pour héberger les ressources informatiques de stockage et de traitement. Cette structure va permettre de donner un accès aux ressources et aux services à tous les employés autorisés et connectés aux réseaux. Les experts interrogés dans l'article de (Moeuf et al., 2020) montrent cependant que l'utilisation d'un nuage extérieur au lieu d'infrastructure interne n'est pas forcément la meilleure solution pour les PME. En effet, les PME ont tendance à sous-estimer les risques de cybersécurité donc la délégation des ressources du nuage informatique à une entreprise extérieure peut apporter des risques à cause de services de sécurité de mauvaise qualité.

Finalement, les données industrielles peuvent être classifiées en données structurées (nombres, tables, symboles, etc.), en données semi-structurées (fichiers textes, graphiques, etc.) et en données non-structurées (fichiers audio et vidéo, images, etc.) (Tao et al., 2018). Tandis que les données structurées sont très présentes dans les systèmes d'informations, peu de systèmes gèrent les données non-structurées à cause de la difficulté de les stocker. Les technologies orientées objets comme dans une application RESTFUL permettent de stocker et gérer les données collectées

comme des objets, ce qui fournit une solution plus flexible pour intégrer les données non-structurées et semi-structurées. Les données non-structurées et semi-structurées nécessitent cependant des stratégies particulières pour les convertir en objet pouvant être utilisé par l'application. Ces stratégies impliquent l'utilisation de systèmes médiateurs pour traiter les fichiers et traiter leurs caractéristiques individuellement. Des expertises de traitement d'image et de traitement vidéo sont donc généralement nécessaires avant d'intégrer ces données aux CPS. La gestion des fichiers sources doit aussi être prévue.

Cette étape n'a pas permis de connecter les sources de données mais a permis de créer et de tester les API pour se connecter au niveau nuage informatique du CPS. Les sources de données peuvent maintenant être connectées à l'application pour utiliser les services des API.

### **4.3.3 Connexion des sources de données**

La connexion des sources de données permet d'automatiser l'enregistrement des données et correspond à la connexion des équipements du niveau physique du CPS et à la connexion des systèmes d'information. Le principe de cette connexion est soit de permettre à l'application d'envoyer des requêtes aux sources de données pour se connecter à leurs interfaces et récupérer leurs données, tel un client. Sinon, les sources de données doivent être dotées de capacité pour envoyer des requêtes à l'application avec leurs données dans le corps du message.

Les équipements répertoriés dans **l'analyse de la situation initiale** sont analysés dans cette partie pour connaître leurs standards, leurs protocoles et leurs interfaces. Différents types de sources peuvent être rencontrés et différentes solutions sont envisageable pour transmettre les données des sources.

#### **4.3.3.1 Sources de données de type 1 : Les sources ne collectent pas de données.**

La figure 4-5 illustre le type de source 1 grâce à l'architecture de CPS de la figure 4-2.

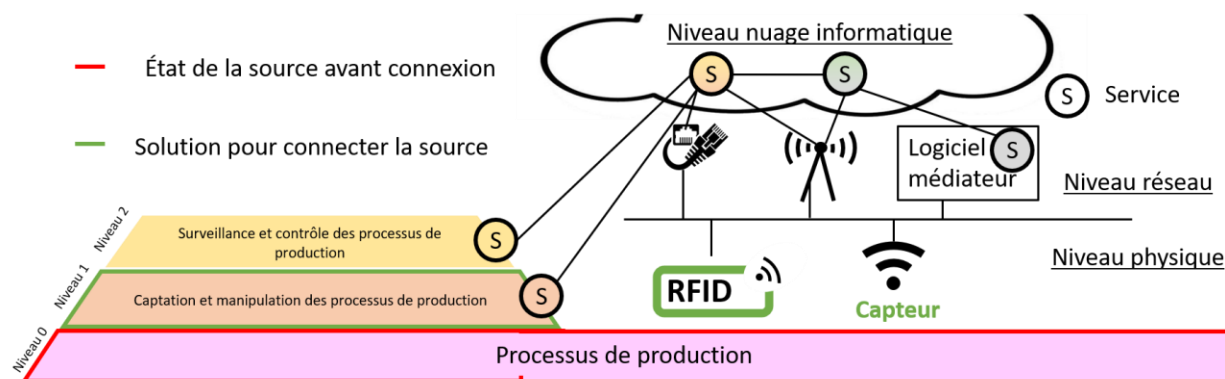


Figure 4-5 : Schéma d'une source de type 1 et des solutions pour la connecter

Cette figure montre l'état des sources qui est au niveau des processus de production. Ces sources peuvent être des machines mécaniques ou simplement l'environnement. L'objectif est donc d'identifier les meilleurs moyens de capter les données sur les processus. Le système de captation dépend entièrement du contexte industriel et des données à collecter donc les solutions peuvent être des capteurs industriels ou des systèmes très complexes permettant de capter, stocker, transmettre et traiter les données. Une des grandes problématiques est d'intégrer les systèmes de captation dans les systèmes de production. Cette problématique nécessite des connaissances dans le secteur de la PME, dans les machines de production, dans les solutions technologiques existantes, etc. Les systèmes de captation implantés deviennent ensuite des sources de données qui doivent être connectées suivant leurs états. L'ensemble des stratégies sont détaillées dans la suite.

#### 4.3.3.2 Sources de données de type 2 : les sources collectent des données, ne les stockent pas et ne les transmettent pas.

La figure 4-6 illustre le type de source 2 grâce à l'architecture de CPS de la figure 4-2.

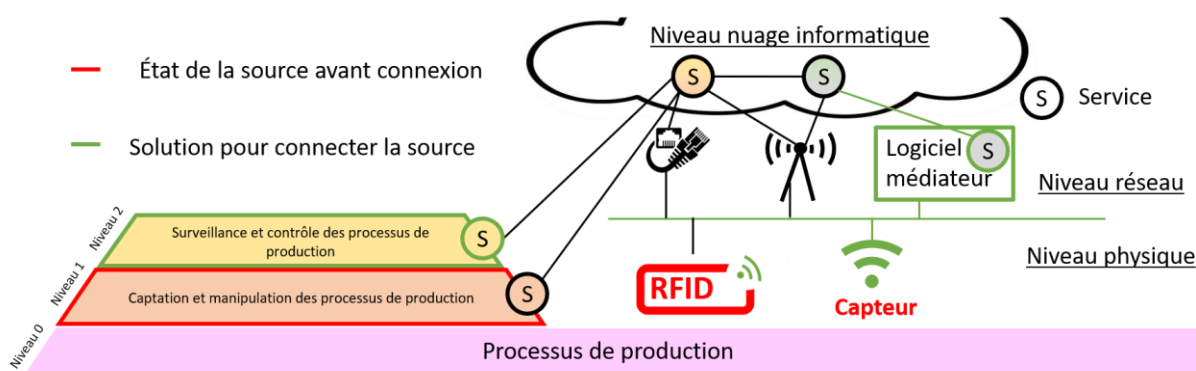


Figure 4-6 : Schéma d'une source de type 2 et des solutions pour la connecter

Cette figure montre les sources de données qui sont des systèmes de captation basique qui ne transmettent leurs données qu'aux employés. Une solution pour ces types de sources est de mettre en place un système médiateur. Les données ne sont que collectées car les données sont généralement analogiques ou mécaniques dans le système. Un système médiateur embarqué permet dans ce cas de convertir les données analogiques en données numériques pouvant utiliser les interfaces de l'application du CPS. Il est aussi possible de connecter le système de captation au SCADA à l'aide du réseau de PLC de l'entreprise. Les données seront ainsi transmises à un système d'information et elles pourront être gérées de la même façon que toutes les autres données du SCADA.

#### 4.3.3.3 Sources de données de type 3 : Les sources collectent des données, les stockent et ne les transmettent pas car les protocoles et les interfaces ne le permettent pas.

La figure 4-7 illustre le type de source 3 grâce à l'architecture de CPS de la figure 4-2.

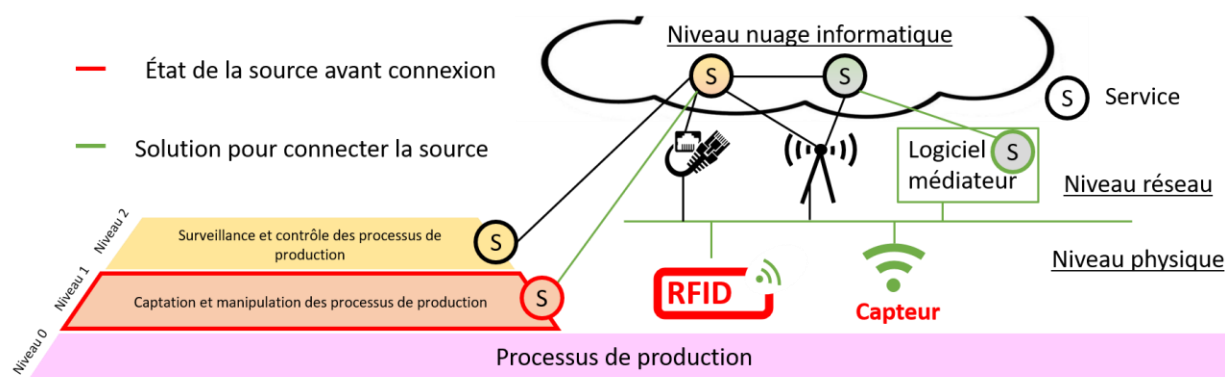


Figure 4-7 : Schéma d'une source de données de type 3 et des solutions pour la connecter

Cette figure montre des sources de données qui stockent des données mais ne peuvent pas les transmettre car les protocoles et les interfaces ne le permettent pas. Ces sources encryptent généralement leurs données dans des fichiers propriétaires et représentent les sources les plus difficiles à traiter. La première solution est d'essayer de déchiffrer les données avec un système médiateur qui utilise le protocole de la source pour récupérer les données et les transmet dans le bon format au CPS. Cependant, certains protocoles sont trop complexes et les PME ont rarement les compétences pour déchiffrer ces données. Dans ce cas, l'entreprise peut soit contacter le fournisseur de la source pour trouver une solution permettant au CPS de communiquer avec la

source, soit contourner la source en mettant en place un nouveau système de captation ou en demandant aux employés de transmettre les données grâce au terminal de contrôle.

#### 4.3.3.4 Sources de données de type 4 : Les sources collectent des données, les stockent et ne les transmettent pas car les sources ne sont pas connectées.

La figure 4-8 illustre le type de source 4 grâce à l'architecture de CPS de la figure 4-2.

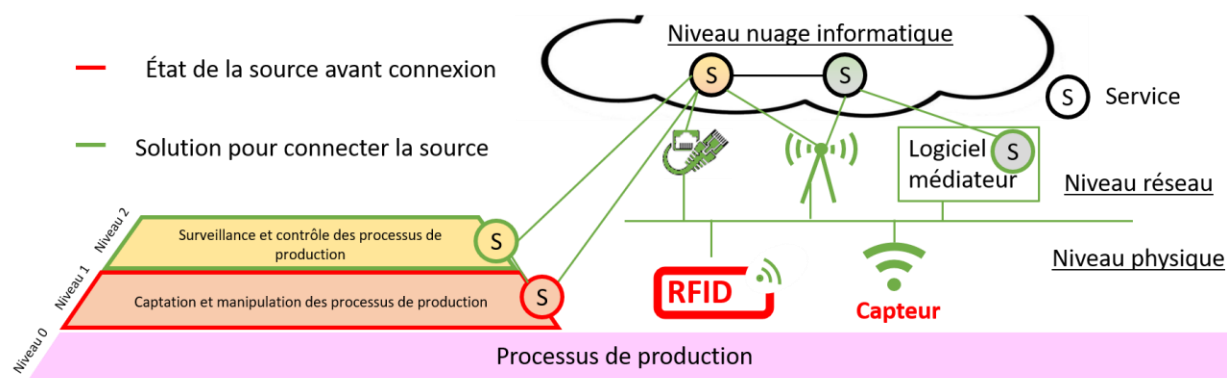


Figure 4-8 : Schéma d'une source de données de type 4 et des solutions pour la connecter

Cette figure montre des sources très similaires aux sources de type 3 vues précédemment sauf que celles-ci peuvent être connectées directement. Les moyens de connexion sont premièrement grâce au SCADA si la source a accès au réseau de PLC et que ses données sont compatibles avec le SCADA. Sinon, la source peut être directement connectée au CPS grâce aux réseaux filaires ou WIFI de l'entreprise. Dans ce cas, soit la source peut envoyer des requêtes au CPS, soit la source a une interface accessible depuis le CPS. Si la source ne peut pas envoyer de requêtes ou n'a pas d'API intégré alors un système médiateur peut être développé et embarqué pour remplir ces fonctions. Ces systèmes médiateurs peuvent notamment permettre de lire les fichiers textes, vidéos ou images, ou les bases de données relationnelles.

#### 4.3.3.5 Sources de données de type 5 : Les sources collectent des données, ne les stockent pas et les transmettent.

La figure 4-9 illustre le type de source 5 grâce à l'architecture de CPS de la figure 4-2.

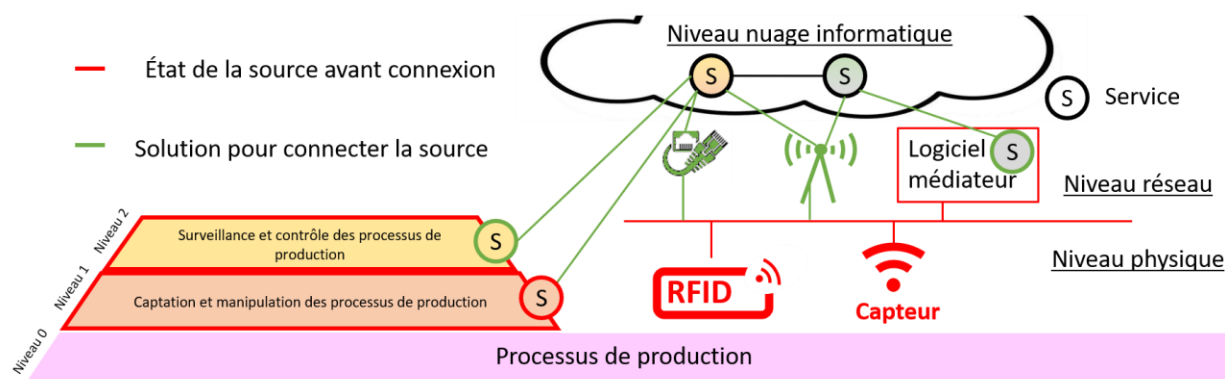


Figure 4-9 : Schéma d'une source de données de type 5 et des solutions pour la connecter

Les sources de type 5 qui collectent, ne stockent pas mais transmettent leurs données, sont généralement connectés à un système qui affiche les données. Dans ce cas, soit le système affichant les données à un service de stockage intégré et peut être directement connecter au CPS. C'est le cas par exemple d'un capteur connecté au SCADA mais les données ne sont pas stockées dans la base de données du SCADA car l'entreprise n'en a jamais eu besoin. Alors les données peuvent être stockées dans la base de données du SCADA puis le SCADA peut être connecté au CPS si ce n'est pas déjà fait. La deuxième possibilité est de connecter le CPS au canal de communication existant pour avoir une communication en parallèle. Si les données peuvent être lu par le CPS alors il peut les récupérer, sinon, un système médiateur peut adapter les protocoles de communication pour assurer le transfert.

#### 4.3.3.6 Sources de données de type 6 : Les sources collectent des données, les stockent et les transmettent.

La figure 4-10 illustre le type de source 6 grâce à l'architecture de CPS de la figure 4-2.

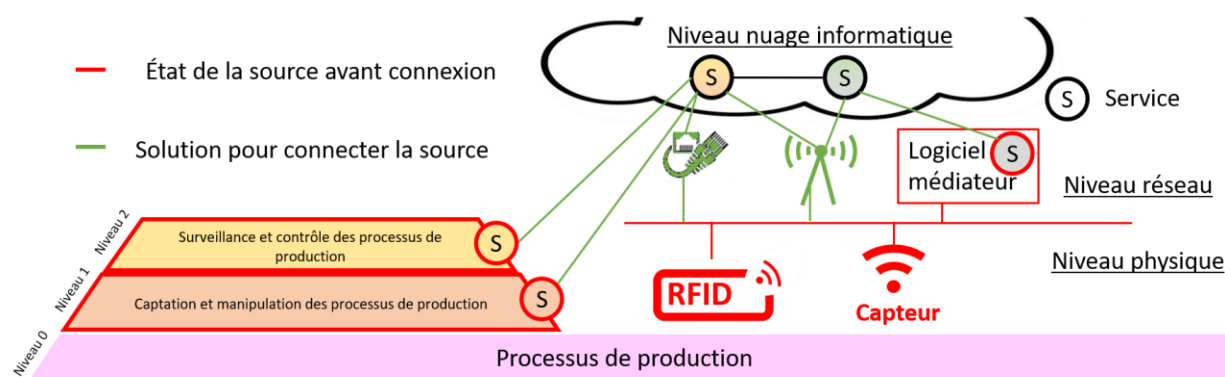


Figure 4-10 : Schéma d'une source de données de type 6 et les solutions pour la connecter

Ces sources sont généralement des systèmes d'informations et permettent de collecter, stocker et transmettre des données. La section 4.3.2 a permis de développer des interfaces pour faire les liens et ces sources ont les moyens de se connecter, il ne reste plus qu'à indiquer le chemin pour se connecter. Soit le chemin est indiqué sur le CPS vers la source, soit le chemin est indiqué sur la source vers le CPS, tout dépend de la source et de la stratégie.

L'application RESTFULL développée auparavant a déjà structuré les données des sources et intègre déjà les interfaces pour gérer ces données donc dès que la source est connectée, l'enregistrement des données est automatique et l'application peut se servir de ces données pour développer de nouveaux services et des connaissances. Les services et les données de l'application peuvent ensuite être visualisés et appliquée grâce aux interfaces utilisateurs et de contrôle.

#### **4.3.4 Développement des interfaces utilisateurs et de contrôle**

La dernière étape de développement d'un CPS est de réaliser les tableaux de bords du niveau terminal de contrôle et les boucles de contrôle avec les autres systèmes pour implémenter les fonctions cognition et configuration pour visualiser et appliquer les données et les services. Par rapport à l'architecture de CPS de la figure 4-2, cette section traite du niveau terminal de contrôle à l'extrémité droite de la figure.

Le terminal de contrôle permet de structurer l'accès aux requêtes des API, les interfaces de gestions des ressources. Une des infrastructures pour héberger ce terminal de contrôle sont les interfaces web. Ces interfaces sont sous forme de pages internet dans un navigateur web comme Google Chrome, Mozilla Firefox, Microsoft Edge, etc. et permettent aux employés d'utiliser l'application de façon intuitive. Ces pages internet utilisent les protocoles internet tels que TCP IP et des requêtes HTTP pour avoir accès à des ressources qui sont ensuite couplées avec des modèles html pour créer une multitude de représentations. Des modèles html peuvent ainsi être créés sur l'application pour agencer les accès aux requêtes sur une page web et mettre en place des requêtes POST pour enregistrer des données et des requêtes GET pour fournir des tableaux de bord. Le système d'authentification par token peut aussi être mis en place grâce à un système de connexion sur une page web. Lors d'une connexion d'un employé en utilisant un identifiant et un mot de passe, un token lui est attribué et est géré par l'application. Le protocole de sécurité HTTPS peut aussi être utilisé pour garantir la sécurité du terminal de contrôle.

Les tableaux de bord peuvent être sous la forme de graphiques, de tableaux, de modèles, etc. L'objectif est de surveiller les processus pour aider les employés dans les prises de décisions. Les tableaux de bord vont notamment permettre de mieux s'adapter aux changements grâce à une meilleure connaissance des situations, de définir des priorités d'action pertinentes et de comprendre les problèmes sous-jacents des imprévus. Ces pages sont très flexibles et permettent de répondre à un grand nombre de besoins. Elles sont donc très adaptées pour personnaliser les tableaux de bord aux contextes d'une PME. De plus, l'expertise pour les réaliser est accessible soit dans des cursus académiques ou des formations privées, soit en autodidacte avec les communautés très actives sur les forums.

Une autre infrastructure de terminal de contrôle est l'éditeur de requête Excel. Ce service d'Excel permet de se connecter grâce à une authentification basique à une base de données ou à une API pour récupérer des données. L'éditeur de requête peut ainsi récupérer des tables de la base de données et les personnaliser pour créer une requête spécifique. Cette requête est ensuite générée dans un tableau Excel pour visualiser les données. La force de cette structure est que le fichier Excel ne contient pas les données mais simplement les requêtes vers l'application et la base de données. Les employés peuvent donc enregistrer une version de la requête sur leur ordinateur et à chaque ouverture du fichier, ils pourront se connecter et rafraîchir la requête. L'actualisation de la requête mettra à jour les données du tableau et chaque employé pourra les utiliser de façon unique. Les employés pourront chacun trier les données du tableau de la requête, créer des graphiques, créer des tableaux croisés dynamiques, etc. en fonction de leur besoin. Cette personnalisation ne contraint pas la requête de base et lors d'une actualisation alors les données se mettront à jour dans tous les formats de représentation du fichier Excel.

Les données de la base de données sont des données qui étaient, pour la plupart, des données déjà utilisées par les employés donc ces données avaient déjà des représentations dans les tableurs et dans les affichages des sources. L'objectif interfaces utilisateurs est de réutiliser leurs formats d'affichage, comme les tableaux, les graphiques, la disposition des données, etc. pour éviter de modifier la façon de travailler des employés et de réduire la résistance aux changements.

La dernière fonction est la fonction configuration qui représente une boucle de contrôle vers les équipements physiques. Les systèmes de contrôles doivent être capables d'interpréter les instructions de l'application pour ensuite l'exécuter. Les systèmes d'informations comme le

SCADA peuvent recevoir des instructions sous forme de variables, de la même manière que des systèmes de captation lui transmettent leurs données, sauf qu'au lieu de stocker la variable dans une base de données alors le SCADA peut exécuter l'instruction pour par exemple modifier la vitesse d'un moteur ou ouvrir une valve. Si les systèmes de contrôle n'ont pas d'interface pour recevoir les instructions et les exécuter alors les systèmes médiateurs peuvent faire le lien. Les systèmes de contrôle doivent être gérés individuellement pour assurer la précision du contrôle et valider la sécurité des transactions. Les boucles de contrôle sont la source de risque de cyber sécurité majeure pour les employés et la production car en l'absence d'accès aux contrôles des machines, la cybersécurité des CPS touche uniquement la propriété des données.

#### **4.4 Validation et intégration des services**

Le développement du CPS permet de gérer les données en fonction de leurs états dans le cycle de vie des données. Les sections précédentes ont montré qu'il était possible de gérer tout le cycle de vie, de la collecte à l'application. Les services produits pour gérer les données sont validés par des tests informatiques pour valider la bonne communication entre les entités concernées. Ces tests peuvent être déterminés au début du développement des interfaces car ils permettent de s'assurer de la bonne définition du besoin. Dans le cas de service utilisant le terminal de contrôle, que ce soit de la collecte sur les données des employés ou de la visualisation des données stockées ou traitées, la validation passe par une interview ou une réunion avec les parties prenantes pour d'une part présenter le service et d'autre part, valider qu'il corresponde au besoin. L'étape de validation des services permet aussi de mettre à jour les modèles de maturité utilisés dans l'analyse de la situation initiale. Ces modèles peuvent servir d'indicateur pour suivre le développement de l'entreprise vis-à-vis de sa stratégie 4.0.

Une fois qu'un nouveau service est validé et qu'une donnée a évolué d'état dans son cycle de vie alors il faut intégrer le service aux processus. Cette étape d'intégration est très importante car elle correspond à modifier la façon de travailler des employés en leur ajoutant l'utilisation du service. Il faut comprendre que l'ajout du service va permettre de répondre à un besoin dans un processus d'entreprise et cela engendre parfois une élimination des tâches pour certains employés. Ces tâches représentent généralement des étapes sans valeur ajoutée comme des recopiations ou du temps de déplacement pour aller chercher les informations. Cependant, ce n'est pas forcément la personne utilisant le nouveau service qui a une réduction de responsabilité. C'est pourquoi il est important

d'avoir un directeur de projet dans l'entreprise qui est capable de modifier les responsabilités des employés et de leur demander de prendre du temps pour utiliser les nouveaux services. Cette étape peut développer de la résistance aux changements. Pour éviter cette résistance, l'entreprise a besoin de développer la culture de l'entreprise en améliorant la compréhension des employés sur la stratégie et les objectifs du projet et en formant les employés sur les outils de l'industrie 4.0 (cf. 2.1.4.3 et 2.1.5). Pour ce faire, la littérature préconise d'impliquer les employés dans la création des cartographies, dans **la définition du besoin** et dans la création de la structure de données. Des présentations et des séminaires peuvent aussi être présentés aux employés sur des solutions concrètes d'industrie 4.0 et sur leurs implantations en contexte industriel. L'utilisation d'un diagramme d'activité lors de la structuration des données permet aussi de planifier les modifications des responsabilités des parties prenantes et donc de former les employés en amont de l'intégration réel. Les employés prendront connaissances des modifications à l'avance ce qui atténuera la résistance des employés.

Une boucle peut être réalisée suite à l'intégration d'un service, voir figure 4-1. Cette boucle sert à redéfinir un besoin pour développer de nouveaux services dans l'entreprise. Une des causes d'itération dans cette boucle est la non satisfaction de l'objectif de maturité de l'entreprise. Des modèles de maturité ont été utilisés dans l'analyse de la situation initiale et ont été utilisé pour définir des objectifs précis. Cependant, plusieurs itérations de développement peuvent être nécessaire pour répondre à l'ensemble des besoins et pour atteindre l'objectif de maturité. Une deuxième cause d'itération sont les changements organisationnels et les modifications des processus. En effet, des besoins peuvent avoir émergé suite aux modifications de la manière de travailler des employés.

L'amélioration de la culture de l'entreprise est un facteur de succès et le management local dans les PME améliore les communications nécessaires à l'intégration des services dans le travail des employés. Les objectifs sont mieux partagés dans la hiérarchie et les retours sur expérience se font régulièrement. Ces retours sont essentiels car ils participent aux boucles d'itération de la feuille de route. Même après la validation des services, des modifications peuvent être nécessaires à cause d'une modification des processus, d'une modification des besoins et d'une mauvaise définition du besoin initiale.

Pour adopter cette feuille de route, des compétences en informatique sont évidemment nécessaires. Nous pouvons notamment citer des compétences en développement informatique, en cybersécurité, en traitement des données ou en développement de système médiateur. La fluidité des boucles d'itération repose sur la culture de l'entreprise mais aussi sur la robustesse et la modularité de l'application RESTFUL. Une fois que ces éléments sont adoptés dans l'entreprise, des échéanciers précis peuvent être mis en place pour jalonner les étapes de structuration des données, de développement, de validation et d'intégration. Des réunions régulières peuvent aussi être effectuées pour faire le point sur l'avancée des différents besoins et sur les avantages développés par l'entreprise grâce aux CPS.

## **CHAPITRE 5 APPLICATION DE LA FEUILLE DE ROUTE**

La feuille de route présentée dans le chapitre précédent a été mise en œuvre sur un cas d'étude dans une PME de la région de Montréal. Le partenaire de ce projet de recherche est La Milanaise, une meunerie biologique.

### **5.1 Présentation du cas d'étude**

L'entreprise appartient au secteur agroalimentaire qui impose de nombreuses réglementations sur la production pour garantir la qualité et la sécurité de ses produits (Chen & Voigt, 2020). Le caractère biologique de la production impose des restrictions sur les grains qui doivent être cultivés sans l'utilisation de produits chimiques, de pesticides et d'engrais synthétiques (MAPAQ, 2019). Les caractères vivant et biologique des grains font que la qualité des matières premières fluctue en fonction de la période de l'année, des conditions climatiques et météorologiques. Pour mieux adapter sa production aux fluctuations de qualité de ses matières premières, l'entreprise a envisagé d'améliorer l'utilisation des données présentes dans ses processus.

Cependant, les systèmes actuels de la PME ne sont pas adaptés pour récupérer les données de toutes les sources (ces sources seront détaillées dans la section 5.2) et ne peuvent pas supporter les algorithmes de valorisation de données. Les prises de décisions sur la gestion des matières premières et sur les réglages des équipements de production sont donc prises par quelques gestionnaires qui doivent s'occuper de regrouper et de traiter les données des différentes sources pour prendre des décisions. L'expertise pour prendre ces décisions sont des expertises métiers rares, donc la production de l'entreprise est dépendante de certaines ressources humaines. En cas d'indisponibilité de ces ressources critiques, pour causes diverses telles qu'un congé parental, arrêt maladie, etc., la production se retrouve impactée d'une réduction de performance voire d'incapacité de production. L'entreprise a notamment connu une absence prolongée de plus de 6 mois du responsable de production due à un congé parental et à plusieurs protocoles sanitaires causés par la crise du COVID-19. L'entreprise a recensé une perte de production de plusieurs pourcents de par son absence.

L'objectif de ce projet pour La Milanaise est donc de soutenir la prise de décision de son personnel critique en collectant l'ensemble des données présentes dans ses processus et en développant des solutions de valorisation de données. Des optimisations sur l'approvisionnement des grains, sur la

qualité des farines et sur la traçabilité des produits pourront ainsi être envisagées et maîtrisées. Ce besoin pour l'entreprise reprend la problématique de recherche qui est de répondre aux problématiques d'interopérabilité des systèmes dans un contexte de PME pour bénéficier de la valorisation des données. Une feuille de route a été proposée dans le chapitre précédent pour mettre en place un CPS et gérer l'ensemble du cycle de vie des données de l'entreprise. L'étude de cas est maintenant présentée avec l'analyse de la situation initiale, la définition du besoin et le développement, la validation et l'intégration d'un CPS sur deux itérations.

## 5.2 Analyse de la situation initiale

La première cartographie réalisée est le recensement des systèmes présents dans l'entreprise. Ces systèmes ont été schématisés dans la figure 5-1.

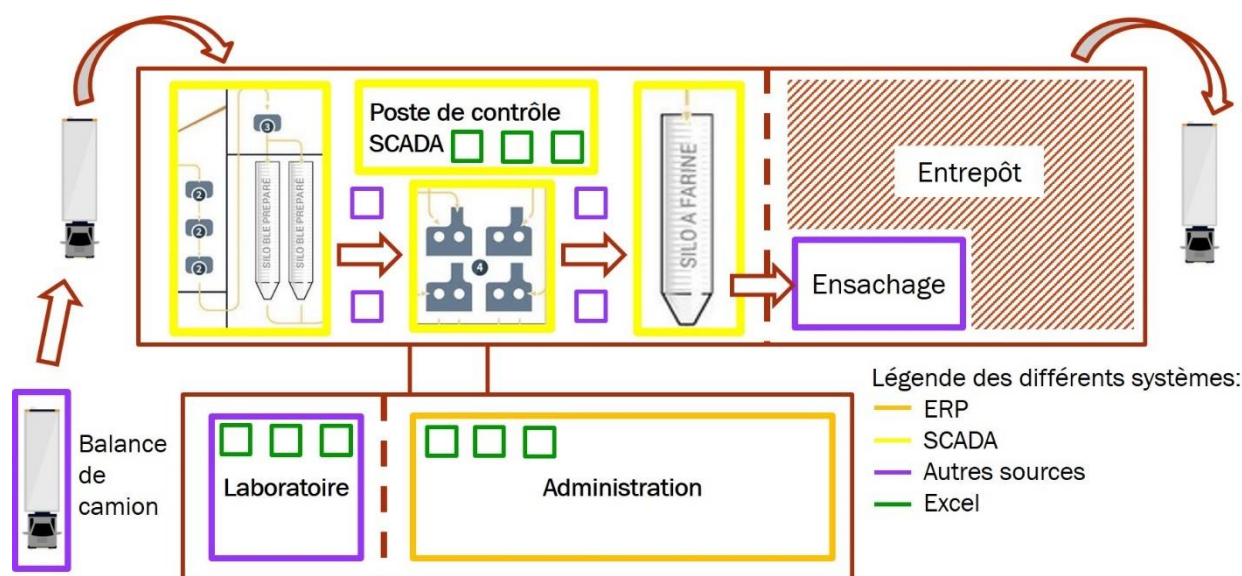


Figure 5-1 : Schématisation des systèmes utilisés pour le processus de transformation

Ces systèmes sont des sources de données pour l'entreprise mais sont très hétérogènes. Tout d'abord, un progiciel de gestion intégrée (ERP), en orange sur la figure, est utilisé par le département administratif pour gérer les approvisionnements, les expéditions et les commandes. Puis, le poste de contrôle, en jaune, planifie, surveille et contrôle la production à l'aide d'un système d'information SCADA. Les équipements de production du moulin sont tous reliés au SCADA comme les valves d'entrée et de sortie des silos, les convoyeurs de grains, les systèmes de nettoyage des grains, les systèmes de mouillage, les systèmes de broyage et les systèmes de tamis. Cependant, certains systèmes de la chaîne de production, en violet, ne sont pas connectés au

SCADA dont la balance de camion, le système permettant de mesurer la quantité dans un silo, le système de réglage de la distance entre deux cylindres de broyage, le système d'ensachage des farines et l'ensemble des machines du laboratoire. Ces systèmes sont tous des sources de données isolées et hétérogènes car ils ont tous leurs fournisseurs, leurs formats de données, leurs interfaces et leurs protocoles de communication. Pour faire le lien entre toutes ces informations, des courriels électroniques sont utilisés ainsi que des tableurs tels que Excel ou Smartsheet (en vert).

On remarque sur le schéma de la figure 5-1 que la chaîne de production est très linéaire, ce constat peut aussi être observé sur la cartographie des processus ci-dessous.

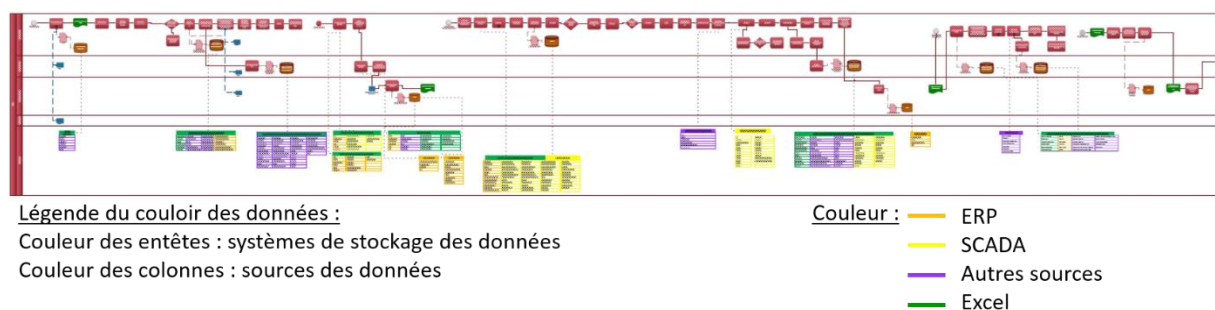


Figure 5-2 : Cartographie des processus enrichie avec les données

Cette cartographie des processus utilise le formalisme ANSI et a été réalisée sur Visio de Microsoft pour définir le processus de production. Ce processus commence à la pesée des camions puis décrit les étapes d'analyses des grains, de planification en fonction des demandes et des inventaires, de production de la farine, d'ensachage et d'expédition. La linéarité du processus est clairement représentée sur ce graphique avec très peu de parties prenantes.

Cette cartographie a servi de support pour cartographier les données manipulées lors du processus de transformation grâce à l'ajout d'un couloir en dessous du processus. Cet inventaire a ensuite été enrichi avec un code couleur sur l'entête des colonnes et sur les colonnes. La couleur de l'entête correspond aux systèmes dans lesquelles les données sont stockées tandis que les couleurs des colonnes représentent les sources des données. Certaines colonnes ont comme source les tableurs Excel ou Smartsheet car ce sont des données sur les prises de décisions des employés ou des données génériques comme la date, le choix du silo d'entreposage, l'employé responsable, des valeurs contraintes, des valeurs cibles, etc.

On constate que beaucoup de données sont stockées sur des tableurs (entête verte) alors qu'elles viennent de l'ERP (orange), du SCADA (jaune) ou de systèmes de captation isolés (violet). Ces données sont pour la grande majorité des données recopiées sur un tableur à partir de l'affichage de la source. Cette saisie manuelle est premièrement une source d'erreur mais implique aussi un facteur temps avec la durée de saisie et sur le délai entre l'occurrence de l'évènement et le changement de son statut dans le fichier. Un facteur coût peut aussi être pris en compte avec le délai dans les processus des ressources impliquées.

Pour finir sur l'analyse de la situation initiale et d'après l'étude de Masood et Sonntag (2020) (cf. 2.1.5), le partenaire offre un contexte relativement favorable parmi les PME pour implanter un CPS. Tout d'abord, l'entreprise est considérée comme une grande PME avec plus de 50 employés. La cartographie de la figure 5-2 a aussi montré que le processus de transformation est peu complexe avec un processus linéaire et une production par lot. Cependant, les interviews effectuées durant ces cartographies ont montré que la culture technologique de l'entreprise était peu mature d'après le modèle de maturité de Masood et Sonntag (2020). L'entreprise n'avait pas beaucoup de connaissance des technologies de l'industrie 4.0 et des opportunités en nouvelles capacités, seulement quelques employés avaient des connaissances en base de données, en système de captation des données et en mécanique. De plus, les stratégies d'industrie 4.0 en agriculture sont très jeunes et aucune entreprise partenaire de La Milanaise n'a mis en place des solutions d'industrie 4.0. Finalement, la direction de l'entreprise est engagée dans sa stratégie d'industrie 4.0 et est prête à investir dans les prochaines années dans ce projet.

Pour conclure sur la situation initiale de l'entreprise, La Milanaise est une PME « planificatrice au stage préliminaire » d'après le modèle de maturité de Müller et al. (2018) (cf. 2.1.1). L'entreprise perçoit des opportunités dans l'adoption des technologies de l'industrie 4.0 mais n'est pas prête, au niveau de ses compétences et de sa culture, pour implanter les nouvelles technologies.

### **5.3 Définition des besoins**

Les constats de l'analyse initiale montrent les premiers besoins de l'entreprise. En effet, le stockage des données collectées sur des tableurs engendre des données statiques, isolées et dispersées. Ces données ne peuvent donc pas être réutilisées par d'autres systèmes pour les traiter et les appliquer. Des étapes de recopiage et de centralisation sont nécessaires de la part des employés pour les utiliser dès les prises de décisions. L'ensemble des données avec une entête vert dans la figure 5-2

représente au minimum un besoin de transmission et de stockage dans une base de données centralisée. Les stratégies pour répondre aux besoins spécifiques des différentes sources ont été présentées dans la section 4.3.3 en détaillant si la source collectait ou pas les données, si elle les stockait en interne ou pas et si elle pouvait les transmettre. En fonction de la priorisation des besoins, les sources et leurs données peuvent être traitées dans des ordres différents.

Nous avons aussi utilisé l'architecture de la feuille de route, voir figure 4-2, pour définir le besoin. Cette architecture a été personnalisée avec le contexte de l'entreprise au début du projet dans la figure 5-3 ci-dessous.

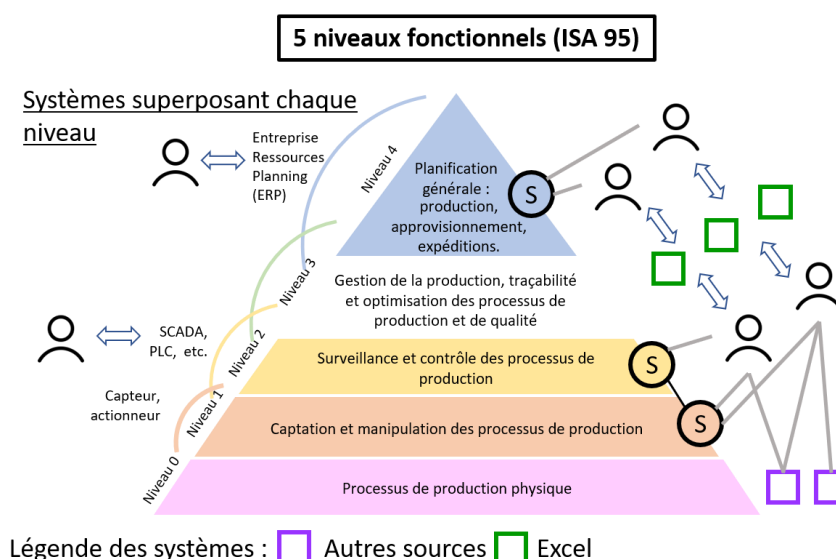


Figure 5-3 : Architecture de l'entreprise au début du projet

Cette architecture permet de comparer les services et les données utilisées dans l'étude de cas avec les services définis par l'ISA-95. On remarque que l'architecture introduite par la norme ISA-95 n'est pas présente dans la PME et que les services et les données d'un MES sont dispersés dans les tableurs Excel et Smartsheet. Le manque d'accessibilité des services et des données de gestion de la production est le premier besoin qui sera traité dans cette étude de cas. D'une part ces services et données sont des services essentiels pour surveiller, contrôler et optimiser la production et d'autre part, les données utilisées dans ces services sont des données nécessaires dans des objectifs de valorisation des données de production.

L'analyse des cartographies de la section 5.2 et l'analyse de la figure 5-3 montrent l'entreprise a des besoins de collecter automatiquement, transmettre et stocker des données et des services.

L'équipe du projet a décidé de commencer par répondre aux besoins du début des processus avec l'étape d'analyses des grains.

Deux ensembles d'analyse sont effectués avant de commencer le processus de production. Le premier est un ensemble d'analyses effectuées au début de l'été et qui classifient l'ensemble des blés récoltés l'année précédente dont les grains de l'automne précédent et les grains du printemps précédents. Les agriculteurs de ces blés ont semé leurs grains et ont été en contact avec La Milanaise pour créer une entente de production. Suite aux récoltes et une fois arrivée l'été, les agriculteurs et les entreprises d'entreposage, envoient un échantillon de leurs grains au laboratoire de La Milanaise pour qu'il soit analysé. Si l'échantillon est accepté alors un contrat est signé entre le fournisseur et La Milanaise. Une fois contractés et qu'un moyen de stockage a été défini (chez l'agriculteur, chez un centre de grain ou chez La Milanaise), les grains seront transportés par camion à la meunerie tout au long de l'année en fonction des besoins de production. Les grains de chaque camion feront l'objet du deuxième ensemble d'analyse pour confirmer les caractéristiques des grains contractés. Ces analyses permettent d'adapter la production aux caractéristiques réelles des grains et non aux caractéristiques des échantillons de grains. L'expérience montre que des différences entre les deux analyses d'un même fournisseur peuvent différer et impacter la production.

Ces deux analyses sont essentielles pour l'approvisionnement en matière première, pour la planification de la production et pour la qualité des produits finis. Cependant, les équipements d'analyses sont uniquement des systèmes non-connectés (catégorie des systèmes violets sur la figure 5-1) et le stockage est uniquement réalisé sur des fichiers Excels qui sont enregistrés sur le serveur de l'entreprise et qui sont accessibles à tous les employés. Les employés ayant besoin des résultats d'analyse pour gérer les approvisionnements, la planification de production et le suivi de qualité utilisent donc le même fichier pour lire les données et les recopient dans d'autres fichiers et systèmes en fonction des besoins. Ces analyses sont utilisées dans des services essentiels mais sont isolées et statiques. La première itération du développement du CPS a donc été réalisée sur les premières analyses qui sont utilisées pour des services de choix des fournisseurs et de traçabilité des grains.

Les systèmes utilisés pour ces analyses sont l'ERP de l'entreprise pour les données des fournisseurs et des commandes, et les équipements d'analyses. La première source de données étudiée a été

l'ERP de l'entreprise. Cet ERP peut être considéré comme un petit système d'information peu adaptable. Il a été développé par une PME de la région de Montréal et fournit les services essentiels de comptabilité pour les approvisionnements, la production et les expéditions. Les données de l'ERP sont stockées dans une base de données développée avec Microsoft SQL mais la structure des données est encryptée avec des sigles sans significations, par exemple : les fournisseurs sont dans la classe RR, les contacts des fournisseurs sont dans RC et les commandes sont dans BO. Une étude de la base de données a donc été effectuée pour la cartographie des données et ensuite pour la structure des données. Les équipements d'analyse du laboratoire ont aussi été étudiés pour déterminer la meilleure façon d'automatiser l'enregistrement des données. Ces problématiques seront traitées dans la section 5.4.3. Au début du projet, les données de ces équipements étaient enregistrées dans des tableurs, de même pour les informations des contrats avec les fournisseurs. Ces contrats ont une version PDF enregistrée dans un dossier, un tableur Smartsheet pour recenser certaines informations du contrat et les informations des fournisseurs, et un fichier Excel pour centraliser certaines informations des contrats et avoir une vue d'ensemble des quantités de grains disponibles à l'extérieur de La Milanaise.

## 5.4 Développement du CPS : première itération

### 5.4.1 Définition d'une structure des données

La structure de données réalisée pour cette première itération du développement du CPS est en annexe A et sur la figure 5-4.

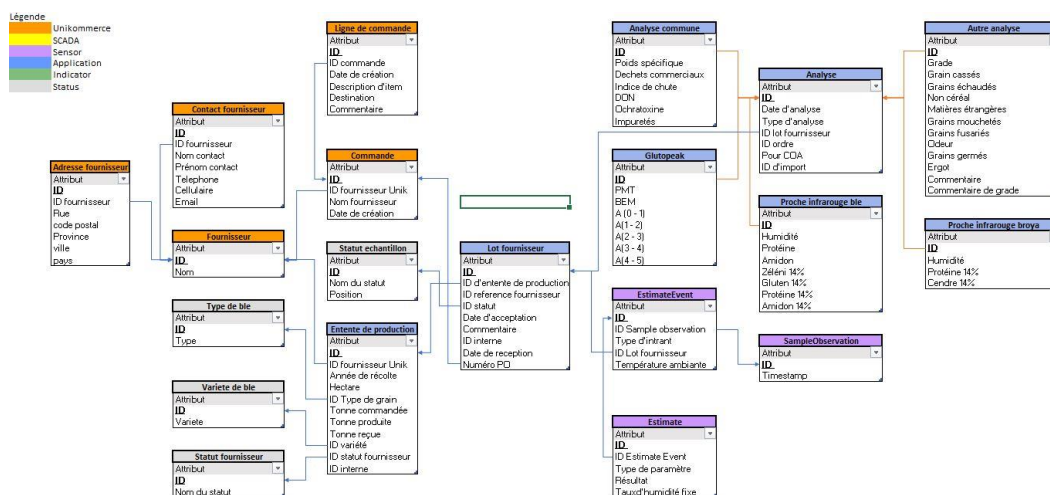


Figure 5-4 : Diagramme de classe de la première itération

Cette représentation a été réalisée sur Excel avec un développement de fonctionnalités sous VBA pour utiliser le formalisme UML. Visio n'a pas été utilisé car les possibilités de représentation et d'enrichissement ne convenaient pas à l'équipe de développement. Une version sur Excel a donc été programmée pour pouvoir enrichir le modèle UML. Le principe de ce nouveau diagramme est de définir une classe de façon exhaustive dans une feuille de calcul Excel. L'exhaustivité vient du fait qu'il est possible de définir autant de métadonnées que voulu pour chaque classe, voir l'exemple de la figure 5-5.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	analysis	Application	Colonne	14	Ligne	8	Parametre	FALSE					
2	Attribut	Nom informatique	Propriété	Type	Default	Nullable	Position	Clé primaire	Classe étrangère	Heritage	Emplacement	Emplacement	commentaire
3	ID	id	public	Integer	FALSE	FALSE	1	TRUE	FALSE	FALSE			
4	Date d'analyse	datetime	public	DateTime	FALSE	FALSE	2	FALSE	FALSE	FALSE	Excel		enregistrement automatique
5	Type d'analyse	type	public	String	FALSE	TRUE	3	FALSE	FALSE	FALSE	Excel		il y en a 5
6	ID lot fournisseur	supplier_batch_id	public	Integer	FALSE	TRUE	4	FALSE	supplier_batch	FALSE	Excel		Lien vers la table lot fournisseur
7	ID ordre	order_id	public	Integer	FALSE	TRUE	5	FALSE	FALSE	FALSE	smartsheet		Lien vers la table ordre
8	Pour COA	for_COA	public	Integer	FALSE	FALSE	6	FALSE	FALSE	FALSE			pour les analyses multiples
9	ID d'import	import_id	public	String	FALSE	TRUE	7	FALSE	FALSE	FALSE			pour le proche infrarouge
10													

Figure 5-5 : Exemple de métadonnée d'une classe du diagramme

Chaque classe a les mêmes métadonnées avec :

- Un nom en français (nom de la feuille de calcul) : ce nom correspond au nom utilisé dans l'entreprise.
- Un nom en anglais (A1) : la programmation de l'application RESTFUL a été effectuée en anglais pour des questions de standards et de pratiques.
- Un système de stockage (A2) : chaque donnée est stockée dans un système et un code couleur a été attribué à ces systèmes pour éviter la redondance des informations dans l'entreprise. Ce code couleur a été adapté à partir de celui de la figure 5-1 avec l'ERP en orange, le SCADA en jaune, les systèmes isolés en violet et les données stockées dans la base de données en bleu. Ces dernières représentent l'ensemble des données initialement stockées dans des tableurs Excels et Smartsheet et ayant des sources ne pouvant pas stocker leurs données. Certaines données de la base de données ont aussi un code couleur particulier dont les indicateurs de performance et les statuts des objets. Ces précisions servent à clarifier le diagramme.
- Une position dans le diagramme (A3 :A6) : la position des classes est enregistrée pour réaliser certains services dans le diagramme de classe.

- Un indicateur booléen de paramètre (A7 :A8) : la représentation de la figure 5-4 peut être automatiquement modifiée pour ajouter des paramètres sur la droite des colonnes, comme le type des attributs ou leur nom en anglais. Ces paramètres sont actuellement désactivés pour des questions de lisibilité.
- Un tableau récapitulatif des attributs et de leurs métadonnées. Deux métadonnées sont répertoriées dans ce tableau, les métadonnées utilisées dans la programmation de la base de données et les métadonnées utilisées pour l'utilisation du diagramme de classe. Les métadonnées représentent :
  - Le nom en français de l'attribut qui est utilisé en entreprise
  - Le nom en anglais de l'attribut qui est utilisé en programmation
  - L'encapsulation de l'attribut : public, privée, etc.
  - Le type de l'attribut : String, float, integer, Datetime, Boolean, etc.
  - La valeur par défaut de l'attribut : pour des quantités par exemple qui doivent être initialisées à 0
  - La capacité à être nul de l'attribut : certaines valeurs ne doivent pas être nulles
  - La position de l'attribut dans la classe
  - Si l'attribut est une clé primaire : chaque classe doit en avoir une, c'est l'identifiant des objets.
  - Si l'attribut est une clé étrangère : pour les liens avec les autres classes.
  - Si la clé étrangère est un héritage
  - L'emplacement de l'attribut avant et après le projet
  - Le commentaire des auteurs sur l'attribut.

Chaque classe est donc entièrement définie dans les feuilles de calcul. Une feuille de calcul spéciale peut ensuite aller chercher les données des classes pour les afficher sur demande.

Dans la figure 5-4, les classes permettent de répondre au besoin de virtualiser les données des analyses lors des échantillonnages des lots fournisseurs. Trois classes sont principalement utilisées pour ce besoin : « entente de production », « lot fournisseur » et « analyse ». Les ententes de

production sont les futurs contrats si les échantillons des fournisseurs sont acceptés. Les points importants de cette classe sont premièrement leur lien vers les fournisseurs. Chaque entente à un fournisseur et la donnée enregistrée dans la base de données est l'identifiant du fournisseur dans l'ERP de l'entreprise. Tous les fournisseurs sont déjà enregistrés dans la base de données de l'ERP donc il suffit de connaître leurs identifiants pour récupérer toutes leurs informations dont le nom de l'entreprise, l'adresse, le contact, le numéro du contact, etc. Deuxièmement, les attributs « ID type de grains », « variété de grains » et « ID statut fournisseur » font référence à respectivement un type de grain, une variété de grain et un statut du fournisseur. Ces trois attributs sont des données qui sont fixes dans le temps (à moyen terme) car il existe un certain nombre de variétés de grains et de même pour les types et les statuts. La liste de ces statuts est donc enregistrée dans des classes spéciales qui sont définies et validées par l'entreprise mais qui ne peuvent pas être changée par les employés. Troisièmement, on remarque que la classe à un « ID » et un « ID interne ». L'ID fait référence à un nombre séquentiel distribué automatiquement et qui n'a aucune référence logique. Son seul objectif est d'identifier de façon unique un objet. L'ID interne est pour sa part défini par l'entreprise et peut faire référence à une date ou autre repère de l'objet. Ces ID internes sont fortement recommandés d'être unique, mais en cas de non unicité l'application n'est pas dérangée car elle utilise l'ID et les employés peuvent utiliser l'ensemble des autres attributs pour identifier les objets.

Les lots fournisseurs font référence aux différents lots des fournisseurs. Chaque entente peut avoir plusieurs lots mais chaque lot fournisseur n'a qu'un seul fournisseur. Cette logique est représentée dans le diagramme par le sens du lien. Une seule multiplicité est représentée dans ce diagramme qui est une relation « un à plusieurs », cela signifie que tous les objets d'une classe visée par un lien sont en relation avec un ou plusieurs objets de la classe à l'origine du lien. Le lien partant de « lot fournisseur » vers « entente de production » signifie bien : chaque entente a un ou plusieurs lots fournisseurs. Il ne peut pas y avoir de relation « plusieurs à plusieurs » dans un diagramme de base de données. C'est une règle qui engendre le fait que chaque lot fournisseur n'a qu'une seule entente de production. Une entente peut avoir plusieurs lots car ces lots sont entreposés dans les différents silos du fournisseur, d'un centre de grain ou de La Milanaise. Chaque silo, et donc chaque lot, est ensuite échantillonné et analysé. Plusieurs attributs sont définis pour chaque lot dont un statut et un numéro PO. Ce numéro PO fait référence à une commande dans l'ERP, table commande en orange. Les contrats et les lots ne sont pas enregistrés dans l'ERP car celui-ci n'a pas été

développé pour répondre à ce service. Des commandes sont donc passées sur l'ERP avec les quantités des silos pour avoir un inventaire dans l'ERP des grains disponibles à l'extérieur de La Milanaise. Ces commandes ne seront pas livrées telles quel mais seront séparées en camion pour être dispersés sur l'année. Les commandes sont séparées en deux classes car il existe physiquement deux tables dans la base de données de l'ERP.

La troisième classe importante est la classe des analyses. Pour chaque analyse effectuée sur un échantillon de grain, peu importe son type, un objet est créé et enregistré dans cette table. Les différents types d'analyse font référence aux équipements utilisés et aux analyses et ont chacun une classe qui hérite des attributs de la classe analyse. Ce lien d'héritage est représenté dans le diagramme par la couleur orange du lien. Il signifie que tous les objets des classes filles « Glutoppeak », « proche infrarouge blé », « proche infrarouge broya », « analyse commune » et « autre analyse » héritent des attributs de la classe mère « analyses ». Par exemple, si une analyse est effectuée sur le Glutoppeak, qui est un équipement spécifique, alors les données définies dans la classe « Glutoppeak » et les données de « analyse » seront enregistrées dans la base de données. Aucune donnée ne peut être enregistrée dans la table « Glutoppeak » sans avoir un enregistrement dans la table « analyse ». La classe mère contient donc tous les attributs communs à tous les types d'analyses, dont leur identifiant d'analyse et le lot fournisseur auquel elles appartiennent. Les analyses communes sont des analyses effectuées sur les échantillons des lots et sur les grains des camions qui arrivent quotidiennement alors que les autres analyses ne sont effectuées que sur les échantillons de lots. Ces analyses sont plus extensives pour évaluer les grains des fournisseurs puis une révision plus légère est effectuée lors de l'arrivée des grains chez La Milanaise.

Les dernières classes en violets sont des classes qui appartiennent à la base de données d'un équipement de production : le proche infrarouge. Cette base de données a été étudiée de la même manière que la base de données de l'ERP pour répertorier les données utiles. Ces données sont les résultats d'analyses et l'identifiant utilisé par l'équipement est l'ID d'un lot fournisseur. Cet ID était entré manuellement par les employés mais un système de code à barres va être implémenté pour pouvoir scanner le numéro interne du lot avant chaque analyse du proche infrarouge. Une logique peut ainsi être définie dans l'application pour aller récupérer les données d'analyse du proche infrarouge à partir d'un numéro interne et les enregistrer dans la base de données de l'application qui centralise les données utiles. Toutes les données représentées dans les classes ne

sont pas réenregistrées dans la base de données, seulement les données qui seront des paramètres ou des variables dans les algorithmes de valorisation de données.

Ces classes ont été validées par l'entreprise en vérifiant les attributs des tables et les liens logiques entre les tables. Une erreur dans le diagramme bloquera les employés lors de l'intégration des services dans les processus car ils ne pourront pas enregistrer et utiliser les données de la bonne façon. Par exemple, si un attribut appartient aux lots fournisseurs mais a été défini dans les ententes de production alors tous les lots d'une même entente auront la même donnée alors qu'en réalité les données peuvent différer. Si par exemple la date d'acceptation avait été définie sur les ententes alors tous les lots d'une même entente auraient eu la même date d'acceptation, ce qui peut ne pas être le cas. L'exemple de la date est facile à remarquer mais certaines données peuvent être mal définies. C'est pourquoi une approche de développement agile est préconisée pour permettre à l'entreprise de modifier l'application en fonction des besoins.

### **5.4.2 Développement d'une application RESTFUL**

Le développement de l'application RESTFUL a été réalisé avec le langage Python en utilisant certaines bibliothèques spécifiques dont Flask pour le corps de l'application et SQLAlchemy pour les requêtes SQL. Ce choix a été décidé par l'équipe de développement en fonction des compétences de chacun et des objectifs de l'entreprise. La Milanaise voulait une solution adaptée à leur contexte et donc une application modulaire. Des solutions plus rigides existent dont Django.

Ces outils permettent de définir les interfaces pour gérer les objets des classes définies précédemment comme des ressources et pour enregistrer les ressources dans une base de données. Toutes les classes ont des interfaces pour enregistrer leurs objets dans la base de données mais toutes les classes n'ont pas d'interfaces pour avoir accès aux ressources (API). Par exemple, aucune API n'est créée pour avoir accès aux classes statuts car elles ont été validées et ne doivent pas changer. Si besoin, des moteurs de base de données peuvent être utilisés pour enregistrer de nouveaux statuts mais l'opérateur réalisant la tâche doit avoir les droits. De même, la plupart des classes violettes n'ont pas d'interface d'accès car les données utiles ont été rapatriées dans la base de données de l'application et peuvent être utilisées comme les autres ressources. Les données de l'ERP ont été rendues accessibles par des interfaces de l'application car ces données peuvent être utilisées dans des tableaux de bord ou des algorithmes optimisant les processus, comme par exemple en utilisant les prix enregistrés par l'ERP.

Concrètement, suite aux développements des interfaces, le CPS fournit des services pour enregistrer des ressources, les visualiser et en supprimer en envoyant des requêtes à l'application. La suppression est généralement non accessible par tous les utilisateurs pour éviter toute erreur, même les administrateurs n'ont pas accès à la suppression car personne n'a besoin de supprimer des données, vu que l'enregistrement des données est maîtrisé. Les données devant être supprimées peuvent être archivées si elles dérangent le fonctionnement de l'application.

### **5.4.3 Connexion des sources de données**

Les sources de données de cette itération sont l'ERP, les équipements d'analyse et les employés. L'ERP est une source de type 6 (cf. 4.3.3) en collectant des données, en les stockant dans une base de données et en les transmettant. L'ERP n'a pas d'interface logiciel permettant de transmettre ses données grâce à des requêtes car il n'a pas été développé pour fournir ce service. L'équipe du projet a donc connecté directement la base de données de l'ERP pour exporter les données répertoriées dans le diagramme de classe et les rendre accessibles sans contraindre l'utilisation de l'ERP. Cette exportation a été réalisée grâce à la création de vues sur le moteur de base de données. Il est dangereux d'envoyer des requêtes directement sur les bases de données car en cas de requête massive alors l'application peut ralentir le système ERP et donc ralentir les processus de production. L'utilisation des vues n'impacte que l'application.

Les données des analyses sont obtenues sur plusieurs équipements. Chaque équipement a donc fait l'objet d'une étude pour déterminer la meilleure façon de collecter et transmettre les données. Le proche infrarouge est une source de type 4 (cf. 4.3.3) en collectant les données, en les stockant mais en ne les transmettant pas. Les données de cet équipement sont stockées dans une base de données dans le système d'exploitation de l'équipement. Cette base de données était inconnue des employés mais l'équipement pouvait être connecté au réseau donc il a été possible de réutiliser la même stratégie que pour l'ERP. Le Glutopeak, qui est un équipement spécifique, est un équipement de type 3 en collectant les données, en les stockant mais ne les transmet pas. Ses données sont stockées dans des fichiers textes encryptés et la PME n'a pas les moyens de les décrypter. Pour automatiser la collecte des données du Glutopeak, une stratégie basée sur un copier-coller et le terminal de contrôle a été utilisée. En effet, les résultats d'analyse sont affichés sur une fenêtre du logiciel du Glutopeak sur un ordinateur et le logiciel permet aux employés de copier les données. L'employé n'a donc plus besoin de recopier les résultats d'analyse mais peut les coller directement dans un

emplacement d'une page web du terminal de contrôle, qui a été créée spécialement pour comprendre le format des résultats d'analyse et pour enregistrer les données dans la base de données. Les autres équipements sont des machines purement mécaniques donc représentent des sources de type 1. Aucun système de captation n'a été trouvé pour collecter les résultats d'analyse rapidement et avec peu d'investissement. Les données de ces sources doivent donc être ajoutées manuellement par les employés dans le terminal de contrôle permettant d'envoyer une requête POST à l'application. Vu que toutes les solutions utilisent uniquement l'application web, toutes les communications utilisent le réseau internet de l'entreprise avec le protocole TCP/IP de l'application.

Les données des employés sont les données des contrats PDF qui sont écrits à la main par les fournisseurs et les liens entre les objets. Par exemple, le lien entre un lot fournisseur et une entente de production doit être décidé par l'employé en contact avec le fournisseur donc il a la responsabilité d'enregistrer cette information dans l'application du CPS. La collecte de ces données des employés ne peut pas être automatisée.

#### 5.4.4 Création des interfaces utilisateurs et de contrôle

Les deux infrastructures présentées dans la feuille de route dans la section 4.3.4 ont été utilisées dans cette itération. Tout d'abord, des pages internet ont été créées pour enregistrer et visualiser les ententes de production, les lots fournisseurs et les analyses. La première page présentée en figure 5-6 est une capture d'écran de la page de connexion de l'interface web.

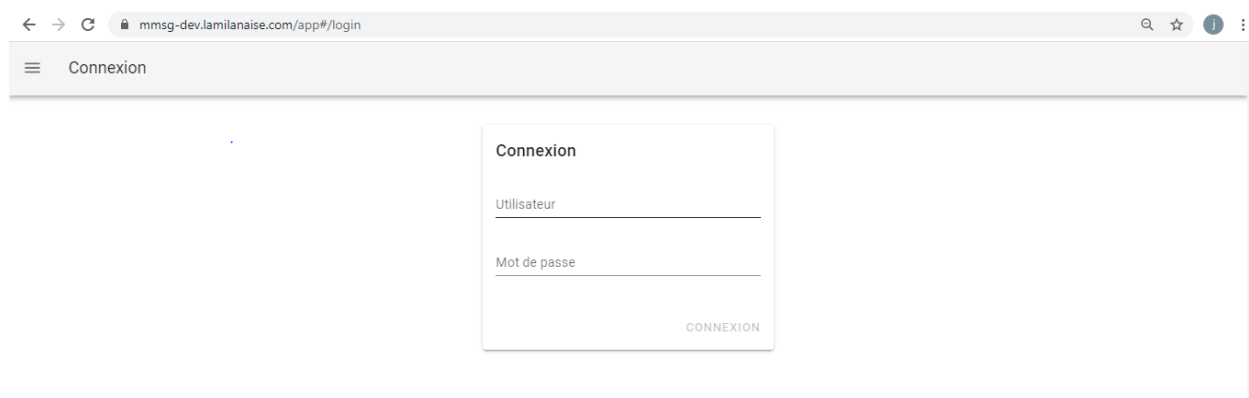


Figure 5-6 : Capture d'écran de la page de connexion de l'interface web

Sur cette capture, on remarque tout d'abord l'adresse insérée dans la barre de recherche du navigateur web. Cette adresse comprend : l'identifiant de l'application « <https://www.mmsg->

dev.lamilanaise.com » et le point d'accès à la page « /app#/login ». En entrant l'identifiant et le mot de passe et en cliquant sur connexion, une requête est envoyée à l'application pour s'authentifier. La deuxième page rencontrée sur l'application est le menu de tous les services accessibles sur l'application, voir figure 5-7.



Figure 5-7 : Capture d'écran du menu de l'application

L'application permet actuellement d'accéder à 5 ressources : la balance, les contrats de production, les lots fournisseurs, les ordres et les ressources du laboratoire. Les ordres et la balance seront détaillés dans la deuxième itération de développement. Deux services sont accessibles pour les contrats et les lots fournisseurs, les employés peuvent soit visualiser la liste des ressources enregistrées dans la base de données, soit en créer des nouvelles. La figure 5-8 est un exemple de formulaire pour ajouter une entente de production, qui deviendra un contrat si ses échantillons sont acceptés.

REINIT.
SAUVEGARDER

---

Num. Fournisseur Unik	Nom Fournisseur
Status Fournisseur	Année de récolte 2021
Numéro de contrat	Hectares
Type de blé	Variété de blé
Kilogrammes contractés	Kilogrammes produits
Kilogrammes reçus	

Figure 5-8 : Capture d'écran d'un formulaire de création d'une entente de production

Les informations à renseigner sont les données de la classe entente de production dans le diagramme de la figure 5-4. Ces données proviennent d'un modèle de contrat qui est rempli à la main par les fournisseurs. La capture de ces données ne peut donc être automatisée sans modifier fortement le processus. Les analyses ont des services similaires dans l'onglet « nouveau » (figure 5-9) et « rapport » (figure 5-10).

- Accueil
- Balance
- Historique
- Arrivage
- Contrat de production
  - Liste
  - Nouveau
- Lot fournisseur
  - Liste
  - Nouveau
- Laboratoire
  - Nouveau
  - Import Pertin
  - Import Glutopeak
  - Rapport
- Se déconnecter

Laboratoire - Nouvelle analyse

Lot fournisseur  
 R42

[+ AJOUTER UNE ANALYSE](#)

**Nouvelle analyse**

**Pour COA**

**Proche infrarouge** ● Pour COA  
31 juillet 2020 00:00 (il y a 9 mois) REINIT.

Amidon:	69.72	%
Amidon (14%):		%
Gluten Humide:	24.5	%

**Glutopeak** ● Pour COA  
31 juillet 2020 00:00 (il y a 9 mois) REINIT.

Aire 0-1:	924	(GPI)
Aire 1-2:	924	(GPI)
Aire 2-3:	497	(GPI)

**Analyses de Classement** ● Pour COA  
31 juillet 2020 00:00 (il y a 9 mois) REINIT.

Déchets commerciaux:		%
DON:	0.07	(ppm)
Impureté:	1.1	%

Figure 5-9 : Capture d'écran d'un enregistrement d'analyse

Accueil

Balance

Historique

+ Arrivage

Contrat de production

Liste

+ Nouveau

Lot fournisseur

Liste

+ Nouveau

Ordre

Liste

+ Nouveau

Laboratoire

+ Nouveau

Import Perten

Import Glutopeak

Rapport

Laboratoire - Rapport

Type de blé

Variété de blé

Numéro de lot	Date ↓	Type de grain	Variété de blé	Humidité	Protéine	Amidon	Zélini	Gluten Humide	Protéine (14%)	Amidon (14%)	P.M.T.	B.E.M.	Aire	Indice de chute
R181	2021-04-07 14:24:00	Blé de printemps	N/A	12.5	16.67	66.47	74.23	33.37	14.34		68	57	1223	379
R12	2021-04-07 14:11:12	Blé de printemps	Toundra	14.7	14.87	67.88	66.1	29.1	12.78		90	54	1287	381
R171	2021-01-20 00:00:00	N/A	N/A	14.8	15.97	67.59	70.6	31.8	13.74		72	58	1281	208
R172	2021-01-20 00:00:00	Blé de printemps	Snowbird	14.3	15.87	68.9	70.7	31.5	13.65		81	58	1293	276
R173	2021-01-20 00:00:00	N/A	N/A	16.4	15.35	67.72	67	30.3	13.2		82	55	1274	225
R174	2021-01-20 00:00:00	N/A	N/A	14.3	17.74	66.62	84.4	35.8	15.27		84	59	1425	227
R175	2021-01-20 00:00:00	N/A	Major	11.9	15.58	68.69	67	30.9	13.4		68	56	1186	277
R176	2021-01-20 00:00:00	Blé d'automne	N/A	11.8	13.87	69.89	52.1	26.9	11.92		51	46	981	389

Figure 5-10 : Capture d'écran du rapport d'analyse

La figure 5-9 présente plusieurs formulaires reprenant les données des classes filles d'analyses. Suivant si l'échantillon provient des fournisseurs, des camions d'arrivage ou d'autres analyses effectuées dans la production, l'opérateur peut choisir quel formulaire remplir. La section 5.4.3 a montré que certaines analyses ne pouvaient pas être automatisées donc l'opérateur doit venir sur cette page pour les renseigner manuellement. Les résultats de toutes les analyses sont ensuite accessibles sur la page de la figure 5-10. Des tris peuvent être effectués sur chaque colonne et des variétés et des types de blés peuvent aussi être spécifiés pour visualiser certaines ressources en particulier. Les analyses ont deux onglets spéciaux « import Perten » (figure 5-11) et « import Glutopeak » (figure 5-12).

ID échantillon	RECHERCHER	IMPORTER
R3%		

r3 - Wheat		R3 - Wheat (Meal)		r32 - Wheat		R32 - Wheat	
Amidon (14%):	58.78	Protéine (14%):	12.83	Protéine (14%):	14.97	Humidité:	11.5
Amidon:	68.34	Cendres (14%):	1.996	Protéine:	17.41	Gluten humide (14%):	39.5
Humidité:	12.9	Humidité:	12.48	Amidon:	67.25	Protéine:	19.33
Protéine (14%):	12.56			Zélaény (14%):	81.8	Amidon:	66.2
Gluten humide (14%):	28.5			Amidon (14%):	57.84	Protéine (14%):	16.62
Protéine:	14.6			Humidité:	15.4	Amidon (14%):	56.93
Zélaény (14%):	62.7			Gluten humide (14%):	35.0	Zélaény (14%):	95.4

R32 - Wheat (Meal)		r36 - Wheat		R36 - Wheat (Meal)		r37 - Wheat	
Protéine (14%):	16.72	Protéine:	13.98	Humidité:	12.0	Zélaény (14%):	47.0
Cendres (14%):	2.34	Zélaény (14%):	55.8	Protéine (14%):	11.99	Protéine (14%):	11.08
Humidité:	11.58	Protéine (14%):	12.02	Cendres (14%):	2.019	Amidon:	69.38
		Gluten humide (14%):	27.1			Humidité:	12.1

Figure 5-11 : Capture d'écran de la page web d'importation des données du proche infrarouge

Laboratoire - Import Glutopeak	
Lot fournisseur	R84
Analyse	Valeur
IMPORTER	

Figure 5-12 : Capture d'écran de la page web d'importation des données du Glutopeak

Le mot « Perten » correspond à la marque du proche infrarouge. Cet équipement a une base de données intégrée donc les données peuvent être transmises automatiquement en renseignant l'identifiant du lot fournisseur de l'échantillon et en sélectionnant le formulaire correspondant. Ce service enregistre ainsi les données sélectionnées dans la base de données. La figure 5-12 montre l'espace pour utiliser la stratégie de copier-coller expliquée dans la section 5.4.3 pour le Glutopeak. Les employés copient les résultats du logiciel de l'équipement dans la zone de gauche et l'application interprète les analyses correspondantes et leurs valeurs. Le bouton « importer » en bas à gauche enregistrera les valeurs dans la base de données.

Les tableaux de bord développés dans cette itération sont uniquement sous forme de tableaux mais lors des interviews pour récupérer les besoins en termes de tableaux de bord, les employés ont exprimé le besoin de personnaliser les tableaux et le besoin d'utiliser les données pour du traitement de données. Pour répondre à ces besoins, l'éditeur de requête Excel a été adopté pour créer des tableaux spécifiques et permettre aux employés d'une part d'avoir une autonomie pour enlever ou rajouter des colonnes dans les tableaux et d'autre part de pouvoir créer des graphiques et des tableaux croisés dynamiques, voir les figures ci-dessous.

Fleurage : Blé bio avec BEM < 40													
Lot	Ref ext	Contrat	PO	Num Fournisseur	Fournisseur	Type	Variété	T contractées	T reçues	T à venir	Bio	BEM	Commentaire
R154	silos 15	2020-1023-02		24803 000344	RDR Grains et Sement	Blé d'automne	Redeemer	35	0	35	Bio	36	
Meunier : Blé bio avec 40 <= BEM < 50													
Lot	Ref ext	Contrat	PO	Num Fournisseur	Fournisseur	Type	Variété	T contractées	T reçues	T à venir	Bio	BEM	Commentaire
R37	N/A	2020-0513-4		24673 001546	Ferme Genlouis	Blé de printemps	Scotia	200	0	200	Bio	40	Après dégel vers le
R2	N/A	2020-0415-1		24669 000107	Agri-Fusion 2000 inc.	Blé d'automne	Lexington	150	0	150	Bio	40	
R177	N/A	Temporaire - Agri-Fusion - Eric Brochu		25675 000107	Agri-Fusion 2000 inc.	Blé de printemps	Walton	230	0	230	Bio	43	
R150	N/A	2020-0126-2		25724 001463	Ferme Angil inc.	Blé d'automne	Zorro	25	0	25	Bio	49	à livrer chez Bonnet
Force : Blé bio avec 50 <= BEM < 60													
Lot	Ref ext	Contrat	PO	Num Fournisseur	Fournisseur	Type	Variété	T contractées	T reçues	T à venir	Bio	BEM	Commentaire
R36	N/A	2020-0513-5		24672 001546	Ferme Genlouis	Blé de printemps	Hélios	90	0	90	Bio	50	Après dégel vers le

Figure 5-13 : Capture d'écran de trois requêtes pour visualiser les données des lots

Statut de lot	Ref	Contrat	PO	Num Fournisseur	Fournisseur	Type	Variété	T contractées	T reçues	T à venir	Bio	BEM	Commentaire	Résumé
Nouveaux	N/A	2020-0207-1		0 001547	Jacques Lacroix	Blé d'automne	Gulbas	50	0	50	Bio			Par d'assaly
Nouveaux	N/A	2020-0416-1		0 001451	Ferme Lamy, Ferme 9160-1194 Gc Inc.	Blé de printemps	V'ahos	120	0	120	Bio			Par d'assaly
Accepté - Entposé centre de grain	N/A	2020-1028-1		25673 N/A		Sarrasin	Koko	60	30	30	Bio			Sarrasin
Nouveaux	N/A	2020-0513-5		0 001546	Ferme Genlouis	Blé de printemps	Hélios	90	0	90	Bio			Par d'assaly
Nouveaux	N/A	2020-1016-2		0 001552	Ferme Fleury	Blé d'automne	V'ahos	0	0	0	Bio			Par d'assaly
Nouveaux	N/A	2020-0114-1		0 001543	Ferme Desaut SEMC	Seigle	N/A	0	0	0	Bio			Seigle
Nouveaux	N/A	2020-0220-2		0 001573	Pail Desrochers	Blé de printemps	Majur	245	0	245	Transition			Transition
Nouveaux	N/A	2020-0215-1		0 001219	Ferme Chénier Inc.	Blé de printemps	Scotia	140	0	140	Bio			Par d'assaly

Figure 5-14 : Capture d'écran d'une requête résumant un grand nombre de données sur les lots

Somme de T à venir	Étiquettes de colonnes			Étiquettes de lignes
	Accepté - Entposé centre de grain	Accepté - Entposé chez agriculteur	Accepté - Livré et payé récolte	Total général
Blanc	133	395		528
Correcteur		15		15
Fleurage			25,572	25,572
Force	81	912		993
Meunier	24	230		254
Sarrasin	30	25		55
Seigle		116,5		116,5
Transition	173	597		770
<b>Total général</b>	<b>441</b>	<b>2290,5</b>	<b>25,572</b>	<b>2757,072</b>

Figure 5-15 : Capture d'écran d'un exemple de tableau croisé dynamique réalisé à part du tableau de la figure 5-14

Les trois requêtes de la figure 5-13 montrent des informations essentielles sur les lots et en particulier les tonnes contractées, les tonnes reçues et les tonnes à venir. Les trois tableaux ont les mêmes colonnes qui résument des données de différentes tables de la base de données et permettent d'avoir une vue d'ensemble des tonnages de grains à l'extérieur de la Milanaise. La fusion de données provenant de différentes tables est possible grâce aux liens du diagramme de classe qui

permettent de contextualiser les données. Les trois tableaux affichent les lots fournisseurs qui sont stockés chez les agriculteurs pour des grains de type fleurage, meunier ou force. Les employés peuvent donc rapidement savoir combien de tonnes sont stockées à l'extérieur, quels sont les lots correspondants, quels sont les fournisseurs, etc.

La figure 5-14 ne distingue pas les types de grains ni les moyens stockages (entreposé chez l'agriculteur, entreposé chez un centre de grain ou entreposé chez La Milanaise). Ce tableau permet aux employés d'avoir toutes les informations réunies au même endroit et réaliser la personnalisation voulue. Comme expliqué en 4.3.4, le fichier Excel de la capture ne contient que la requête vers le CPS et ce fichier est vide avant de s'authentifier. Chaque employé peut donc enregistrer le fichier sur son poste et soit modifier la requête pour enlever ou ajouter des colonnes à sa guise, ou créer d'autres onglets pour traiter les données. Un exemple de traitement a été réalisé avec un tableau croisé dynamique qui permet de visualiser la somme de tonnes en fonction des types de grains sur les lignes et les moyens d'entreposage en colonne. On peut notamment savoir que si la production a besoin de grain de type « Correcteur » alors il ne reste que 15 tonnes qui sont entreposées chez un agriculteur. Un tri sur le tableau de la figure 5-14 permet ensuite de récupérer son numéro de lot, son contrat, son fournisseur, etc.

## **5.5 Validation et intégration des interfaces utilisateurs et de contrôle**

Les interfaces présentées dans la section précédente permettent de répondre aux besoins concernant les analyses des échantillons de grains. Des services ont été créés pour collecter les informations des analyses et de leurs contextes, pour les transmettre à l'application, pour les stocker dans une base de données et pour les visualiser. Les analyses sont ainsi virtualisées et accessibles pour surveiller les processus, pour les utiliser dans de la valorisation de données et pour améliorer la traçabilité des grains dans la production. L'entreprise a validé ces services lors d'une réunion de présentation mais les services n'ont pas encore été intégrés dans les processus. En effet, l'équipe de développement des services n'a pas réussi à modifier la façon de travailler des employés et ce parce qu'il n'y avait pas de directeur du projet interne à l'entreprise pour gérer les modifications dans les processus. Le rôle du directeur a été abordé dans la section 4.4 et l'étude de cas montre que l'absence d'un directeur dans l'entreprise pour accompagner l'intégration des services est un facteur d'échec.

Suite à la validation des services de la première itération, et avant la prise de conscience des problèmes d'intégration, l'équipe a commencé la deuxième itération de développement sur les besoins des analyses des camions d'arrivage.

## 5.6 Développement du CPS : deuxième itération

### 5.6.1 Définition d'une structure des données

La structure de données réalisée pour cette deuxième itération du développement du CPS est en annexe B et sur la figure 5-16.

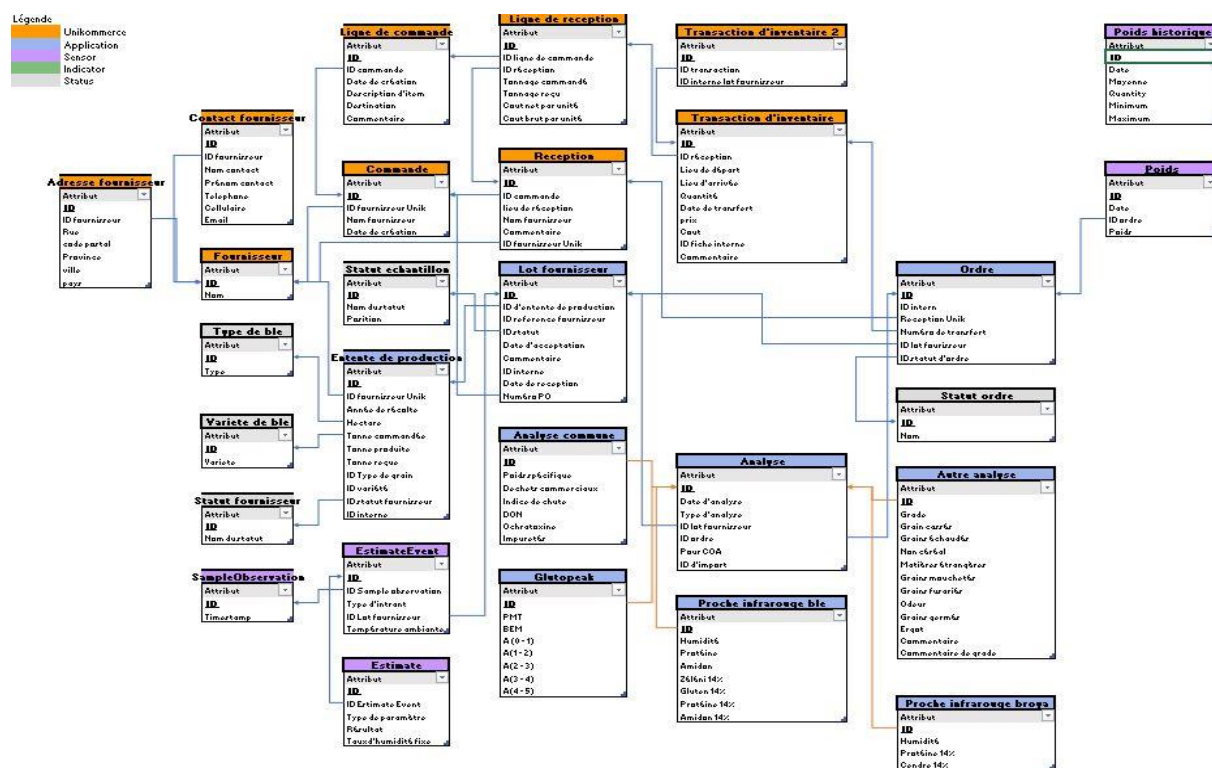


Figure 5-16 : Diagramme de classe de la deuxième itération

Ce diagramme réutilise le diagramme de la première itération mais l'enrichit avec la notion d'« ordre » pour répondre aux besoins des analyses des camions. Les ordres sont des ordres d'arrivages et correspondent aux camions arrivant à La Milanais. Chaque camion a un identifiant et un ensemble de métadonnées qui caractérise son contexte. Les classes filles analyses sont restées les mêmes car toutes les analyses de grains étaient déjà prises en compte dans la première itération. Un attribut « ID ordre » a juste été rajouté dans la classe mère « analyse » pour pouvoir créer des

objets analyses reliés à des ordres. Cette nouvelle classe est aussi reliée à plusieurs classes de l'ERP (en orange). Dans les processus de l'ERP, une commande est passée suite à l'acceptation des échantillons avec la quantité entière du lot. Cette commande est ensuite séparée en « relâches » qui correspondent aux camions. L'entreprise n'utilise pas les identifiants de ces relâches mais en crée un nouveau car une relâche peut contenir plusieurs ordres car plusieurs camions peuvent être nécessaires ainsi que des conteneurs sur rail ou par bateau. Tous les moyens de transport utilisés ont un numéro d'ordre qui leur est attribué. L'équipe de développement n'a pas décidé de virtualiser ces numéros car premièrement, ils ne sont pas utiles pour la valorisation de données et deuxièmement ils sont actuellement gérés sur un tableur qui ne peut pas être supprimé. En effet, la traçabilité des approvisionnements est la responsabilité d'un employé qui gère l'approvisionnement de plusieurs sites de l'entreprise donc virtualiser le processus pour le site de l'étude de cas ne fera que dédoubler le travail de cet employé qui travaillera sur deux infrastructures différentes. Les relâches de l'ERP ont des informations comme le prix, la date, la quantité commandée, etc. et font l'objet de bons de réception. Ces bons enregistrent la quantité réelle reçue par La Milanais donc stockent la quantité reçue pour chacun de nos ordres. Les dernières classes de cette itération sont les classes de la balance.

La balance est un système identifié dans l'analyse de la situation initiale comme un système isolé. Cette balance mesure le poids d'un camion avant et après le déchargement pour en déduire le poids des grains. Au début du projet, un système de pinsons était utilisé pour graver le poids avant et après sur une feuille de bon de réception qui était ensuite enregistré dans l'ERP. Entre la pesée et l'enregistrement, un délai de 3 jours était parfois observé le temps de transmettre la feuille et qu'elle soit traitée. L'entreprise a donc jugé intéressant de connecter la balance au CPS pour enregistrer la pesée automatique et que les personnes de l'administration puissent enregistrer la valeur dans l'ERP juste après la pesée. L'information est dédoublée mais les deux systèmes ne l'utilisent pas de la même façon. L'ERP utilise la pesée pour des problématiques de comptabilité et de traçabilité alors que le CPS décentralise cette information en temps réel. La stratégie pour collecter, transmettre et stocker les données de la balance sera détaillée en 5.6.3

## **5.6.2 Développement d'une application RESTFUL**

De la même manière que dans la section 5.4.2, des interfaces pour stocker et gérer les ressources du diagramme de classes de la deuxième itération ont été créées puis testées.

### 5.6.3 Connexion des sources de données

Les équipements d'analyse et l'ERP ont déjà été connectés dans la première itération donc cette section s'intéresse seulement à la connexion de la balance pour camion. La balance était une source de type 2 (cf. 4.3.3) en collectant les données mais en ne les stockant pas et ne les transmettait pas. En effet, la balance ne faisait qu'afficher les poids pour les chauffeurs et les pinçait sur le bon de réception. Après une étude du système de la balance, l'équipe a remarqué que les données étaient des données analogiques qui étaient communiquées à l'afficheur extérieur et à la machine de pinçage. La stratégie mise en place a donc été de connecter un système médiateur sur la balance pour récupérer le signal analogique, le transformer en signal numérique et le transmettre à l'application.

Une carte électronique Raspberry PI a été utilisée pour se connecter à la balance et héberger le programme informatique. Ce programme permet de gérer les signaux d'entrées en utilisant le protocole de la balance et d'interpréter les données. Ces données sont ensuite transmises à l'application en utilisant une requête. On remarque sur la figure 5-16 qu'il existe deux classes pour la balance. La classe du haut est un historique de la balance tandis que celle du bas contextualise les données. La balance fournit un signal analogique toutes les 5 secondes mais cette durée est trop précise pour peser un camion qui reste plusieurs minutes en moyenne sur la balance. Le système médiateur lisse donc le signal en envoyant le maximum, le minimum, la moyenne et la date des valeurs toutes les minutes. Ces valeurs n'étant pas contextualisées, les employés ont besoin d'associer un poids avec un ordre sur le terminal de contrôle. Les données sélectionnées sont ensuite enregistrées dans la table « poids ».

Le système médiateur de la balance permet de faire le lien entre le protocole de communication de la balance qui utilise des données analogiques et le protocole de l'application qui utilise une connexion aux réseaux, filières ou WIFI, pour transmettre des données numériques et des objets informatiques.

### 5.6.4 Création des interfaces utilisateurs et de contrôle

Quatre pages web sont prévues pour gérer et visualiser les ordres, les analyses et les pesées de la balance. Tout d'abord, les analyses n'ont pas fait l'objet de nouvelle interface, il est simplement possible de renseigner des identifiants d'ordres pour les analyses là où dans la première itération

seuls les identifiants de lots fournisseurs fonctionnaient. Les pages des ordres reprennent le même modèle que les contrats de production et les lots fournisseurs avec une page « nouveau » et une page « liste », voir figure 5-7 du menu de l'application. Pour la balance de camion, deux nouvelles pages ont été créées, elles apparaissent sur le menu et sont représentées sur les figures ci-dessous.

Balance - Arrivage

ENVOYER

214.406779661017 Kg @ 11/06/2021, 14:12:00

Conteneur	Ordre	Date d'enregistrement ↕ ①	Heure d'enregistrement ↕ ②	Poids (Kg)
	192115	2020-11-11	07:24:58	54790
	192098	2020-11-13	13:10:27	19050
	192121	2020-11-13	13:16:41	58680
	192131	2020-11-16	13:49:57	45140
	192124	2020-11-17	12:07:32	48700
	192138	2020-11-17	12:53:18	59240
	192140	2020-11-18	06:41:54	57610
	192145	2020-11-18	10:47:41	19130
	192141	2020-11-18	11:18:04	57930

Figure 5-17 : Capture d'écran de l'interface pour associer un poids à un ordre

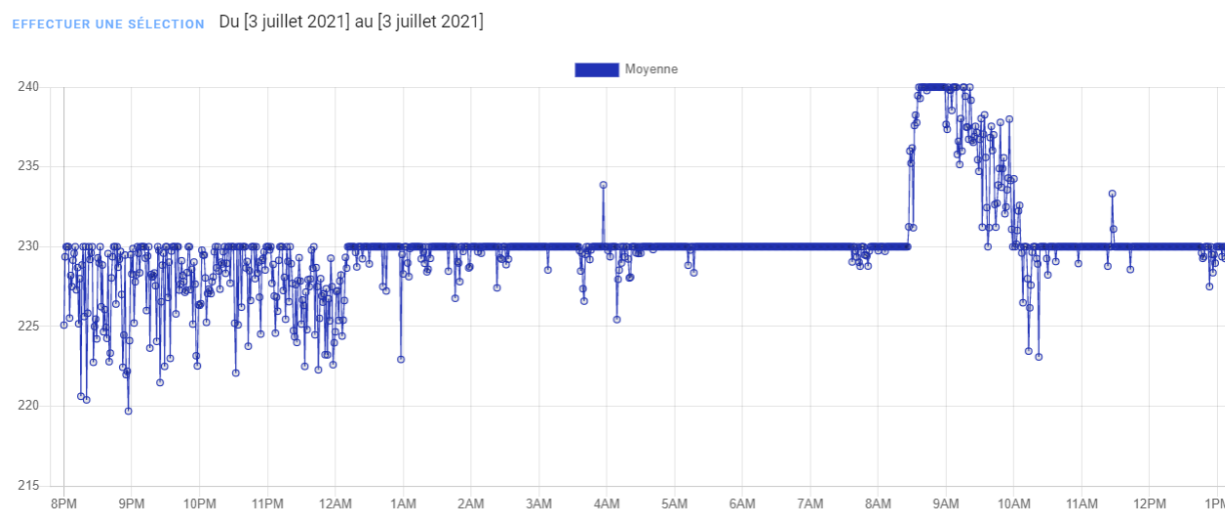


Figure 5-18 : Capture d'écran du graphique de l'historique des pesées sur la journée du 3 juillet 2021

La page web de la figure 5-17 fournit le service d'association entre les ordres et les poids. La barre du haut permet de sélectionner un ordre et le champ en rouge montre la pesée sélectionnée. En cliquant sur le bouton « envoyer », l'association sera enregistrée dans la table « poids » et sera affichée dans le tableau de la figure 5-17.

La figure 5-18 montre l'historique des poids. On remarque que le système n'est pas encore complètement opérationnel car les enregistrements ont une moyenne à 230 tonnes alors que

l'objectif s'est d'être à 0 tant qu'il n'y a pas de camion et lorsqu'un camion monte sur la balance alors la moyenne par minute s'affiche pendant les quelques minutes où le camion reste sur la balance. C'est une de ces moyennes par minute qu'un employé doit associer à un ordre. Les moyennes ne seront pas constantes pour un même camion mais les tests ont montré que les variations étaient négligeables sur un camion de 30 tonnes.

Les interfaces n'ont pas encore été validées ni intégrées aux processus, elles sont encore dans la phase de développement.

## **5.7 Problématiques en développement**

D'autres problématiques ont commencé à être traitées dans le développement du CPS.

### **5.7.1 Connexion du SCADA**

Le SCADA est le système d'information qui collecte et stocke toutes les données des équipements de production. Il intervient dans le processus de production juste après les analyses avec la gestion des silos. La base de données du SCADA est donc une source de données essentielle pour la valorisation des données. Cependant, au début du projet, le SCADA fonctionnait sur un poste isolé dans la salle de contrôle de production et sa base de données était inaccessible. Cette isolation était voulue par l'entreprise car le SCADA est aussi le système de contrôle de la production donc c'est un système critique. Le moulin ne peut pas fonctionner sans le SCADA. De gros efforts de mise à jour des licences et des ordinateurs ont été réalisés pour mettre en place une stratégie sécuritaire permettant la transmission des données du SCADA vers le CPS. La solution mise en place relève de compétences en informatique, en réseau et en système d'information qui ne seront pas expliquées dans ce mémoire. La solution trouvée par les experts et les responsables de la production permet depuis peu aux données et informations utiles du SCADA d'être stockées simultanément sur le SCADA et sur le CPS. Aucune requête n'est donc envoyée à la base de données du SCADA, ce qui assure la sécurité du système critique. La base de données du SCADA doit maintenant être cartographiée pour déterminer les données utiles. Les données sont déjà contextualisées avec un identifiant de course de production qui est stocké avec les enregistrements des données des équipements.

Un point important du SCADA est la fréquence d'enregistrement des données. L'entreprise a choisi de collecter les données des systèmes de production aux 10 minutes. Ce choix permet d'éviter

beaucoup de problèmes de bande passante qui sont des problèmes importants dans l'IoT. Cependant, les techniques de traitement de données seront contraintes par cette précision.

### 5.7.2 Collecte des données grâce à un capteur

Certains équipements de production de l'entreprise sont des sources de données de types 1 (cf. 4.3.3) qui ne collectent pas leurs données. Ces équipements sont soit des équipements non connectés comme les équipements d'analyse des grains et de la farine, soit des équipements connectés qui ont aussi des réglages manuels. Les réglages de ces machines sont parfois des besoins pour la valorisation des données et c'est le cas du réglage de l'écartement des rouleaux de broyage. Cet écartement impacte fortement sur le broyage des grains et donc la qualité de la farine. Certains opérateurs ont les compétences pour analyser les analyses des farines effectuées pendant la production pour régler les broyeurs et optimiser la production. Le CPS peut soutenir ces activités en collectant les données automatiquement, en les transmettant au CPS et en les analysant pour de l'aide à la décision et de la surveillance.

La stratégie pour une source de données de type 1 est d'identifier la meilleure façon de capter les données et d'utiliser un système médiateur pour transmettre ces données au CPS. Dans le cas des rouleaux du broyeur, des photos ont été prises pour analyser le système de réglage des rouleaux, voir figure ci-dessous.



Figure 5-19 : Photos du système mécanique de réglage des rouleaux de broyage

Sur la photo de gauche qui est une vue de face du système, on peut voir la molette de réglage utilisée par les opérateurs pour régler la distance entre les rouleaux. Cette molette affiche l'écartement en minute sur le cadran d'affichage mais cette valeur n'est stockée sur aucun support physique ou virtuel. Cette molette peut aussi être remarquée sur la gauche de la photo de droite qui est une vue de côté. Cette molette est ensuite reliée à un arbre avec une vis sans fin. La suite du système est cachée par les moteurs des rouleaux donc les plans du broyeur ont été étudiés sur la figure 5-20.

### **CONTROL MONITOR**

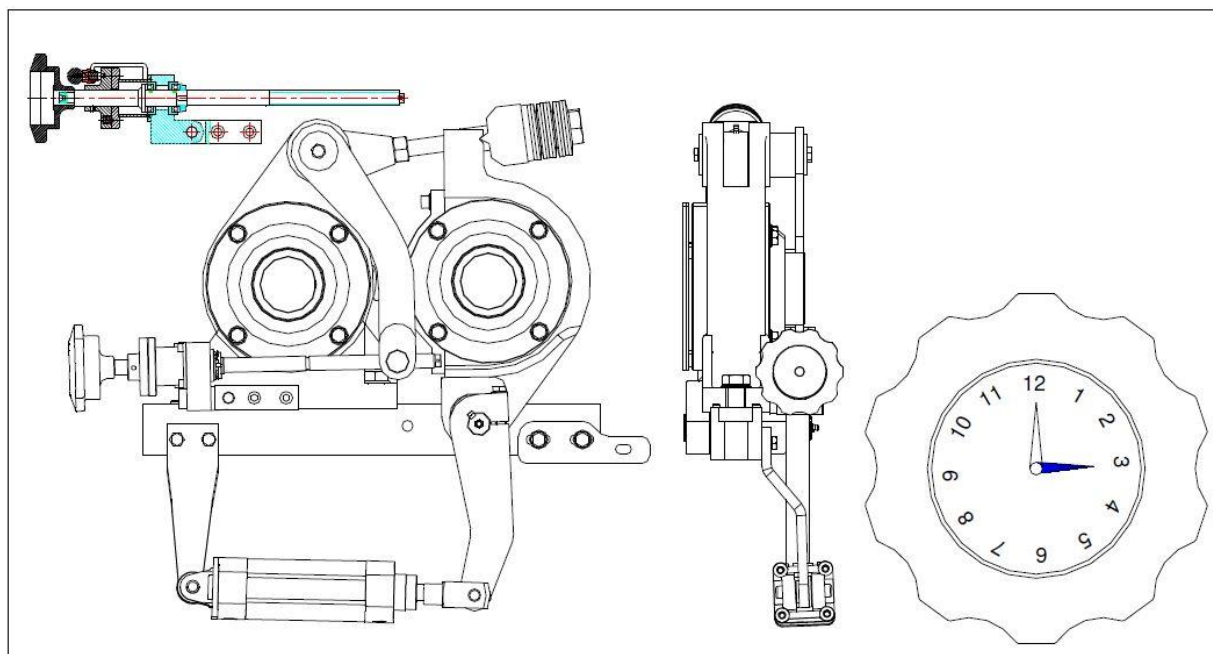


Figure 5-20 : Plan des vues de face et de côté du système mécanique de serrage des rouleaux.

On retrouve sur la figure 5-20 la vue de côté et la vue de face du système. On remarque que sur la vue de gauche qui est la vue de côté, que l'arbre de la molette est relié à un bras qui est relié à l'arbre d'un des rouleaux. La vis sans fin de l'arbre de la molette permet de déplacer le bras et donc l'arbre des rouleaux. Une vue détaillée de l'arbre de la molette est montrée en haut à gauche de la figure 5-20. C'est sur cet arbre qu'il est possible de mettre en place un système de captation pour récupérer la position de la molette et en déduire l'écartement des rouleaux.

Le capteur répondant à ce problème est un encodeur rotatif. Il consiste à fournir un signal électrique proportionnel à un angle ou changement d'angle. Deux types d'encodeurs existent : les encodeurs

incrémentaux et absolus (Novanta, 2021). Les encodeurs incrémentaux signalent un changement angulaire, cela signifie que pour connaître la position de l'encodeur alors il a besoin d'un point de référence. Les encodeurs absolus signalent quant à leur position par rapport à une échelle ou une plage. Dans notre étude, les encodeurs incrémentaux ont été sélectionnés car ils sont en moyenne moins chers et les encodeurs absolus sont généralement contraints à une plage d'un tour alors que la molette du broyeur fait plusieurs tours sur elle-même. La technologie des encodeurs incrémentaux fournit les informations de position sous la forme d'une série d'impulsions. Ces impulsions détectent le déplacement angulaire et la direction du changement de position, ils sont donc très adaptés pour récupérer les changements d'écartement des rouleaux. L'étalonnage du capteur peut aussi être réalisé en serrant les rouleaux au maximum.

Suite à la sélection de la solution, un prototype a été réalisé avec un encodeur à 20 pulsations avec l'aide d'une carte Raspberry PI. La stratégie de programmation est exactement la même que pour la balance : la carte électronique est connectée aux capteurs pour récupérer le signal électronique puis la logique du système médiateur transforme ce signal en données numériques qu'il transmet ensuite au CPS à l'aide d'une requête POST. Tous les signaux du capteur ne peuvent pas être transmis au CPS à chaque mouvement à cause de la bande passante donc un programme a été embarqué sur la carte pour premièrement éviter d'envoyer un changement de position à cause des vibrations du broyeur. Deuxièmement, le système médiateur n'envoie une requête qu'à la fin du changement de position. En effet, une boucle permet de détecter s'il y a un changement de position, dès qu'un changement est détecté et qu'il est supérieur au seuil de vibration alors la carte électronique enregistre dans une variable les changements et si pendant 3 secondes il n'y a plus de modification alors une requête est envoyée avec la nouvelle position de la molette. Cette stratégie basée sur un événement déclencheur permet de réduire le flux d'information.

Après validation du prototype alors l'entreprise peut se procurer un capteur plus précis pouvant envoyant plusieurs centaines et jusqu'à des milliers de pulsations par tour. Les critères pour sélectionner le capteur sont les prix des solutions, la précision nécessaire pour la valorisation des données et les possibilités d'intégration du capteur sur les équipements de production. Les problématiques d'intégration ont été identifiées dans la feuille de route comme une des plus grandes problématiques pour collecter les données d'une source de type 1. En effet, on voit sur le plan détaillé de l'arbre de la molette de la figure 5-20 (en haut à gauche), qu'il est possible d'intégrer le

capteur au bout de l'arbre. Une étude sur la machine réelle est encore nécessaire pour vérifier l'emplacement et l'accessibilité des câbles.

Le prototype montre cependant le potentiel d'un tel capteur. En effet, les données en temps réel récupérées par l'encodeur angulaire peuvent être couplées avec d'autres données du CPS pour fournir aux employés des services de surveillance en temps réel. Par exemple, l'écartement des rouleaux peut être mis en relation avec l'ampérage des moteurs des broyeurs et les résultats des analyses de qualité de la farine. Une représentation de ce couplage est représentée sur la figure 5-21 à l'aide de l'architecture du CPS.

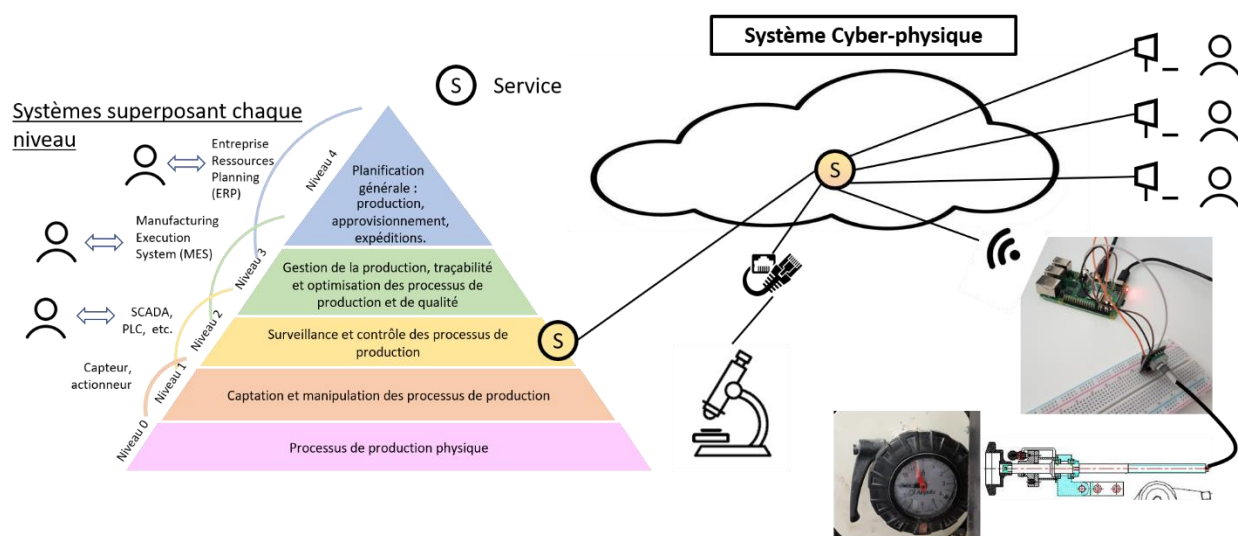


Figure 5-21 : Architecture du CPS avec le prototype de l'encodeur connecté à la molette, les analyses de farine et les services du SCADA.

On remarque tout d'abord l'architecture du prototype avec l'encodeur de rotation connecté au bout de l'arbre de la molette et à la carte électronique qui peut transmettre les données au nuage informatique du CPS. La liaison entre la Raspberry PI et le CPS peut être WIFI mais une solution filaire est préconisée car l'environnement de production contient beaucoup d'équipement métallique et une mauvaise réception réseau. Tous les équipements sont notamment connectés par fils aux PLC et autres accès réseau. Le système du milieu représente la connexion des équipements d'analyses de farine. Ces analyses sont réalisées toutes les heures pour surveiller la qualité de farine produite et utilisent le proche infrarouge qui a déjà été connecté dans la section 5.4.3. Finalement, l'ampérage est une des données enregistrées sur le SCADA qui peut être accessible avec le CPS comme vu dans la section 5.7.1. L'ampérage correspond à l'intensité du courant des moteurs pour

broyer les grains. Si les rouleaux sont proches alors les moteurs auront un gros ampérage pour leur permettre de broyer les grains et inversement.

Le broyage des grains a un impact important sur la qualité de la farine donc l'écartement des rouleaux et l'intensité du courant des moteurs peuvent être mis en relation avec les résultats d'analyse. Le service du CPS utilisant ces trois données peut notamment être un graphique montrant l'écartement et l'ampérage des rouleaux en temps réel et les résultats d'analyse heure par heure. Des algorithmes de valorisation de données peuvent aussi être développés pour de l'aide à la décision. Ces algorithmes utilisent les données historiques pour déterminer en temps réel sur l'écartement optimal pour maximiser la qualité de la farine. Le projet étant en phase de développement, la problématique des algorithmes n'a pas encore été traitée.

### **5.7.3 Valorisation des données**

La valorisation des données est le levier le plus efficace pour améliorer les performances industrielles de l'entreprise et représente l'objectif principal de l'adoption d'un CPS. La valorisation des données apporte des nouvelles connaissances sur les processus qui aident pour les prises de décisions. Cependant, on a vu qu'il était nécessaire de collecter, transmettre et stocker des données avant de pouvoir les traiter et que plus la quantité et la variété des données sont grandes et plus grands est le potentiel des données. Dans notre étude de cas, seul le début de la chaîne de production a été traité. Plusieurs projets sont en développement en utilisant notamment l'écartement des rouleaux de broyage pour en déduire la qualité de la farine. Ce mémoire est notamment un des sous-objectifs d'un projet qui vise à définir les paramètres caractérisant une farine de bonne qualité et déterminer les paramètres des grains et les variables des équipements qui influencent chaque paramètre de qualité des farines. Des données de toute la chaîne de production sont donc nécessaires et des premières analyses ont déjà été réalisées avec une collecte manuelle de données.

## CHAPITRE 6 DISCUSSION SUR LA FEUILLE DE ROUTE

### 6.1 Bénéfices du CPS

Le premier bénéfice du CPS est la gestion du cycle de vie des données de l'entreprise. Tout d'abord, les données de La Milanaise sont collectées et transmises au CPS. Les stratégies basées sur les systèmes médiateurs, sur la connexion aux systèmes d'information et sur la technologie orientée service ont été présentées dans le chapitre 4. Ces stratégies ont permis à la Milanaise de connecter la balance pour camion, le proche infrarouge du laboratoire, l'ERP et le SCADA. De plus, le prototype de capteur montre que la plupart des systèmes de captation disponibles sur le marché peuvent être connecter au CPS. Ces stratégies remplissent la fonction de connexion d'un CPS (cf. 2.3.1.1.1) et les systèmes médiateurs permettent aussi d'utiliser la fonction de conversion (cf. 2.3.1.1.2). Ensuite, l'étape de stockage des données est possible de par le diagramme de classe et le lien de l'application RESTFUL vers une base de données. Des données auparavant dispersées dans l'entreprise sont maintenant centralisées au niveau du CPS et sont accessibles dans toute l'entreprise. L'étape de traitement est aussi possible grâce à la création de services sur l'application. Ces services représentent les fonctions conversion et cyber (cf. 2.3.1.1) du CPS. Cependant, l'intégration au CPS de fonctions avancées d'exploration des données n'a pas été détaillé dans la feuille de route car ce n'était pas dans le périmètre du projet. Finalement, les chapitre 4 et 5 ont montré que la visualisation des données était possible grâce aux interfaces web et l'éditeur de requêtes Excel et que les données pouvaient être appliquées dans les systèmes de contrôle grâce notamment aux API du CPS. Ces deux dernières gestions des données permettre de mettre en place les fonctions cognition et configuration du CPS (cf. 2.3.1.1).

La conséquence de cette gestion des données est premièrement la surveillance en temps réel des processus et l'accessibilité décentralisée aux informations. Toutes les données et les informations stockées et centralisées sur le CPS sont accessibles en temps par tous les employés sur toutes les plateformes supportant les interfaces web et connectées au réseau de l'entreprise. Les managers et les opérateurs peuvent ainsi avoir une meilleure vue d'ensemble des situations lors de leurs prises de décisions.

Le CPS a aussi permis de mieux intégrer les systèmes dans les processus de l'entreprise en les connectant pour pouvoir réutiliser leurs données et leurs services. Plusieurs problèmes techniques

ont été résolues et les données ont été structurées de manière cohérente pour que toutes les données puissent être mises en relation et contextualisées. Cette intégration est un élément essentiel des CPS qui permet de réorganiser les systèmes pour tendre vers une architecture hétérarchique et décentralisée (cf. 2.3.2). La Milanaise a une organisation hiérarchisée et distribuée dans le sens où les activités sont distribuées dans différents départements et que des relations hiérarchiques existent entre tous les employés d'un même département. Le CPS a déjà permis de décentraliser les informations au niveau nuage informatique mais l'entreprise a décidé de garder un pouvoir décisionnel humain, hiérarchique et distribué. Le CPS est théoriquement capable de créer des systèmes autonomes avec une décentralisation des prises de décisions grâce à la collecte des données, à leur traitement et à leur application. Cependant, le système de contrôle de La Milanaise est le système SCADA et ce système a été jugé trop critique pour autoriser les connexions au CPS et accepter des instructions. Une structure hétérarchique au sens large peut néanmoins être mise en place grâce à la décentralisation des informations et aux systèmes d'aide à la décision. Les employés de cette structure n'ont plus de liens hiérarchiques entre eux dans leur processus donc l'équipe en question doit avoir les mêmes informations, les mêmes connaissances et les mêmes responsabilités. Cette structure permet d'augmenter la réactivité car les prises de décision sont plus rapides et les communications entre les niveaux hiérarchiques sont réduites.

Grâce à une meilleure intégration des systèmes et à la décentralisation des informations, les CPS peuvent appliquer les techniques de valorisation de données sur des plus grandes quantités et sur des plus grandes variétés de données. L'acquisition des données est aussi plus rapide avec moins de communication. Les CPS permettent donc d'augmenter le potentiel d'utilisation des données. La section 5.7.3 a mentionné que la valorisation de données n'était pas encore implantée mais qu'un projet était actuellement en cours pour étudier les possibilités et les meilleurs moyens de développer des avantages concurrentiels. Les avantages de la valorisation de données tels que l'amélioration de la qualité et de la productivité prennent du temps et nécessitent d'avoir accès à une quantité et une variété de données suffisante et d'intégrer les algorithmes à une infrastructure les supportant et ayant accès aux données. Le CPS répond à ces problématiques. La Milanaise ne dépend pas de ses systèmes d'informations pour traiter ses données mais peut utiliser son CPS qui centralise les données de toutes les sources connectées et offre la possibilité de développer des algorithmes spécialisés. Le CPS est aussi plus flexible pour ajouter une nouvelle source de données.

Pour finir, la mise en place du CPS a permis d'améliorer la maturité de l'entreprise d'après le modèle de Müller et al. Nous avons vu dans l'analyse de la situation initiale de la section 5.3 que La Milanaise était une PME « planificatrice au stage préliminaire » car elle percevait des opportunités grâce aux technologies de l'industrie 4.0. Le projet décrit dans ce mémoire a permis de développer un CPS mais nous avons vu que des problématiques d'intégration restent à résoudre pour que le CPS soit utilisé dans les processus de production. Deux itérations de la feuille de route ont donc permis à La Milanaise d'être plus mature mais elle n'est pas encore considérée comme « utilisateur de l'industrie 4.0 ».

Les premiers exemples de bénéfice d'une stratégie d'industrie 4.0 en PME ont commencé à être documentés dans la littérature (Frank et al., 2019; Mittal et al., 2020; Müller et al., 2018) mais tous les bénéfices n'ont pas encore été étudiés. Dans l'étude de cas présentée, l'entreprise a encore besoin d'intégrer les technologies dans plusieurs parties de leurs processus pour avoir accès à plus de bénéfices et d'avantage concurrentiel. Un des exemples de bénéfices accessibles pour les PME est leur intégration dans une chaîne logistique digitalisée. Cet objectif ne dépend pas que d'une entreprise et soulève des problématiques d'interopérabilité entre plusieurs entreprises mais les bénéfices au niveau de la traçabilité des produits peuvent apporter beaucoup d'avantages concurrentiels. Les technologies RFID ou codes à barres peuvent notamment être des solutions pour récupérer ou transmettre des informations sur les produits entrants ou extrants. Pour La Milanaise, l'objectif principal est d'étendre le CPS à toute la chaîne de production pour bénéficier de la valorisation de données sur tous ses processus. Cet objectif peut être décomposé pour faire l'objet des prochaines itérations de développement.

## **6.2 Discussion sur les défis**

Plusieurs défis avaient été identifiés dans la revue de littérature des PME et des CPS. La feuille de route prend en compte ces défis donc il est possible de revenir sur les réponses aux défis proposées dans l'étude de cas.

Tout d'abord, le premier défi qui a été identifié dans la littérature est un manque de ressources financières. Ce manque a été résolu en partie grâce à un partenariat avec le ministère de l'agriculture, des pêcheries et de l'alimentation québécois (MAPAQ) et une université. Ce partenariat a été concrétisé par la création de deux masters en recherche et d'un doctorat. Ce mémoire est le résultat d'un premier master.

Les ressources des projets académiques présentés ci-dessus ont aussi participé aux manques d'expertise des PME. L'utilisation de projet académique a notamment été identifiée comme un facteur de succès dans la revue de littérature. L'entreprise a aussi fait appel à un consultant en informatique. Pour ce type de projet, plusieurs compétences sont nécessaires : des compétences sur les outils d'industrie 4.0, des compétences en gestion de projets technologiques, des compétences en développement logiciel, des compétences en cybersécurité, des compétences en réseau, des compétences en valorisation des données et des connaissances des processus industriels du contexte du projet.

Le manque de standard a été adressé par la feuille de route en utilisant des standards communs comme le TCP-IP. Les standards industriels inconnus par le partenaire industriel n'ont pas été utilisés mais des standards comme l'OPC-UA ou la norme ISA-95 ont été étudiés pour réutiliser certaines de leurs solutions comme l'architecture orientée service.

La culture d'entreprise a été identifiée comme un facteur de succès et a été abordé dans la feuille de route. L'équipe du projet a impliqué un maximum de parties prenantes tout au long du développement du CPS pour partager les besoins de l'entreprise et les bénéfices des technologies. Cependant, les outils développés dans la première itération n'ont pas été adoptés dans l'entreprise. Ce manque d'adoption est dû au manque d'un directeur de projet dans l'entreprise pouvant redéfinir les responsabilités des employés pour y ajouter l'utilisation des outils et ainsi intégrer les solutions aux processus. Nous pensons que le CPS n'a pas été intégré dans le processus dans le sens où les interfaces n'étaient pas utilisées dans les réunions d'équipe et les données ne sont pas mises à jour régulièrement. L'état d'avancement du CPS étant encore jeune, très peu de bénéfices et de tableaux de bord sont accessibles sur les terminaux de contrôle. Les bénéfices du CPS n'ont donc pas été assez clairement compris par les employés pour qu'ils l'utilisent alors qu'ils ont d'autres responsabilités. Ce phénomène peut faire référence à de la résistance au changement. C'est pourquoi un directeur de projet est essentiel pour que les employés utilisent les terminaux et mettent à jour les données dans la base de données. Suite à deux itérations de développement, les limites et les possibilités des technologies sont comprises par une partie des employés impliqués dans les processus étudiés. La culture d'entreprise évolue, ce qui permet à l'entreprise de continuer dans les itérations pour acquérir de plus en plus de bénéfices grâce au CPS.

La situation initiale de l'entreprise était plutôt favorable au début du projet (cf. 5.2) avec plus de 50 employés, des processus peu complexes et une culture d'entreprise encore peu mature. Grâce à l'expérience de ce projet, la situation dans l'entreprise est propice au développement d'une stratégie d'industrie 4.0. L'entreprise a plusieurs facteurs de succès et même si certaines barrières sont encore présentes, l'avancée du projet a convaincu la direction de La Milanaise à poursuivre les efforts.

Le défi de la complexité des technologies de l'industrie 4.0 pour les PME est difficilement solvable. La feuille de route utilise des compétences jugées accessibles par les entreprises mais des concepts comme les CPS et l'interopérabilité sont encore très rares en PME. C'est pourquoi des compétences dans les outils de l'industrie 4.0 sont recommandées pour ce type de projet et c'est aussi pourquoi la situation de La Milanaise, qui a un partenariat académique, est propice à la mise en place d'une stratégie d'industrie 4.0.

Le développement de la culture d'entreprise a un impact direct sur la vision à court terme d'une PME. En effet, c'est en comprenant les tenants et les aboutissants du projet que la PME peut adapter sa stratégie avec la stratégie développée dans la feuille de route. L'utilisation d'une méthode agile permet aussi de fournir des résultats régulièrement pour montrer à la PME les avancées et garder des boucles de validation et de développement.

Le dernier défi est la cybersécurité du système. Ce défi est présent dans toutes les entreprises, grandes ou petites, et représente une des problématiques du projet les plus importantes pour la direction de La Milanaise. Les technologies utilisées pour développer l'application RESTFUL intègre des solutions avec des tokens d'authentification. Ces solutions sont jugées performantes dans la littérature et le consultant informatique de la PME qui est responsable de la sécurité des réseaux a aussi approuvé cette solution. Des mesures supplémentaires ont aussi été adoptées comme l'absence d'accès à l'application pour les employés ne travaillant pas sur le site ou encore avec la stratégie d'isolation du système de production SCADA.

## CHAPITRE 7 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

La valorisation des données repose sur la gestion du cycle de vie des données qui comprend la collecte, la transmission, le stockage, le traitement, la visualisation et l'application. Dans ce cycle, les sources de données de l'entreprise, dont les équipements, les produits, les clients, les employés, les systèmes d'information et les réseaux, jouent un rôle très important car elles définissent les données présentes dans l'entreprise. Cependant, ces sources doivent pouvoir communiquer et coopérer avec les autres systèmes pour leur permettre de gérer l'ensemble du cycle de vie des données. Cette problématique de connexion entre les sources correspond au concept d'interopérabilité des systèmes. L'interopérabilité a été présentée dans la revue de littérature comme un élément essentiel pour bénéficier de la valorisation de données en entreprise. La revue de littérature a aussi montré que les questions d'interopérabilité n'ont pas encore été traitées dans les PME. En effet, les PME sont des environnements contraints par leurs ressources financières, leurs expertises, leur culture d'entreprise, leur adoption des standards, leur situation initiale, leur familiarité avec les technologies complexes et leur stratégie à court terme. Des approches ont été répertoriées pour accompagner les PME dans l'adoption des technologies de l'industrie 4.0 mais très peu d'études pratiques sont présentes dans la littérature et aucune étude ne traite de l'interopérabilité de systèmes. De plus, les solutions utilisées par les grandes entreprises pour définir un cadre d'interopérabilité, dont les systèmes d'information complexes et les standards industriels, ne sont pas adaptées pour les PME de par leurs contraintes intrinsèques et la rigidité des solutions qui ne sont pas cohérentes avec la flexibilité des PME. L'utilisation d'un système cyber-physique (CPS) a néanmoins été identifiée dans la littérature comme une technologie de l'industrie 4.0 pouvant répondre aux problématiques d'interopérabilité. Cette technologie est la base de connectivité de l'entreprise et permet d'intégrer les technologies d'information et de communication (TIC) dans les processus physiques en virtualisant les données. Son objectif est donc de gérer l'ensemble du cycle de vie des données de l'entreprise en intégrant les données du cycle de vie des produits, de la chaîne de valeur et de tous les niveaux hiérarchiques. De même que pour l'interopérabilité, les méthodes d'implantation des CPS reposent sur des architectures complexes et des standards qui ne sont pas accessibles pour beaucoup de PME.

Nous avons donc proposé une feuille de route pour accompagner les PME dans l'implantation d'un CPS qui répond aux problématiques de connexion des sources de données et qui offre une infrastructure supportant la valorisation des données massives. Cette feuille de route est une

approche agile composée de quatre étapes principales, avec l'analyse de la situation initiale, la définition des besoins et le développement du CPS, et d'une étape de validation et d'intégration. L'étape de développement du CPS est aussi décomposée en définition d'une structure de données, développement d'une application RESTFUL, connexion des sources de données et création des interfaces utilisateurs et de contrôles. Cette feuille de route a été mise en œuvre dans une étude de cas chez un partenaire industriel. Ce partenaire est La Milanaise, une meunerie biologique de la région de Montréal. La Milanaise présente des problématiques d'interopérabilité pour connecter ses sources de données donc un CPS a été implanté grâce à la feuille de route proposée. Cette étude de cas a permis de montrer les avantages du CPS en termes de gestion du cycle de vie des données et d'interopérabilité. Elle a aussi permis de souligner la difficulté d'intégration des services du CPS dans les processus. La littérature considère souvent que les technologies sont faciles à implanter mais très peu d'articles discutent des problèmes d'intégration et d'adoption des solutions. Plusieurs facteurs impactent l'intégration des CPS et en particulier les cultures technologique et organisationnelle. L'utilisation de la feuille sur deux itérations a déjà permis à l'entreprise de développer sa connaissance dans les outils et dans les possibilités de l'industrie 4.0. Cependant, les employés ont encore besoin de prendre du temps pour utiliser les outils développés. Les employés ont des responsabilités dans les processus donc l'ajout d'un CPS nécessite de modifier l'organisation et les processus pour y intégrer ce nouvel outil, or ces changements sont difficiles à gérer. Nous soulignons la nécessité d'un responsable dans l'entreprise pour modifier les responsabilités des employés et l'organisation de l'entreprise.

La contribution principale de ce mémoire est la feuille de route qui a été développée spécialement pour les PME ainsi que les technologies utilisées pour mettre en place un CPS. L'utilisation de la feuille de route a été détaillée dans un contexte industriel avec la mise en œuvre de toutes les étapes sur deux itérations de développement et de validation. Cette étude de cas empirique a montré qu'un CPS pouvait être développé dans un contexte de PME et comment il était possible de répondre aux défis des PME. Plusieurs limites sont néanmoins à souligner :

- La feuille de route n'a été implémentée que dans un cas particulier donc les résultats peuvent avoir des contraintes supplémentaires dans d'autres environnements.
- Un des environnements probablement peu adaptés pour cette feuille de route est l'environnement des grandes entreprises. En effet, les grandes entreprises ont des processus

complexes avec plusieurs modèles d'affaires. Les outils tels que le diagramme de classe ou les services web de l'application RESTFUL doivent notamment être ajustés pour convenir respectivement à la complexité de la structure des données et à la grande quantité des communications intermachines. Les limites d'efficacité d'une application RESTFUL comportant des systèmes médiateurs et des communications en temps réel sont des problématiques très contraignantes dans des environnements comportant de nombreuses sources de données. Les solutions de la feuille de route sont cependant très adaptées aux contextes des PME qui présentent beaucoup de moins de sources que les grandes entreprises et des processus plus simples.

- Les solutions introduites dans la feuille de route nécessitent des compétences spécifiques, ce qui reste une limite pour beaucoup de PME, malgré l'effort de choisir des technologies accessibles aux PME. Cette feuille de route permet néanmoins d'expliquer les besoins et les possibilités pour accompagner les PME dans leur transition.
- Le manque de validation du cadre d'interopérabilité dans l'étude de cas nous empêche de conclure sur sa mise en œuvre.
- Le manque de mise en pratique et d'explication des bénéfices de la valorisation des données reste une limite de la feuille de route, même si des pistes ont été présentées.
- La solution d'autonomie est aussi une limite. Cette solution n'a pas été implantée mais des possibilités ont été expliquées pour créer des boucles automatiques avec le système de contrôle SCADA. Cependant, ce système est absent dans beaucoup de PME donc tout besoin d'automatisation doit faire l'objet de recherche de solutions, qui peuvent être par exemple l'utilisation des systèmes médiateurs.
- Les risques de la surveillance décentralisée et en temps réel n'ont pas été abordés dans ce mémoire. La transparence des processus engendre une surveillance des employés qui peut faire peur aux employés et aux managers à cause de la traçabilité des erreurs donc elle peut augmenter la résistance aux changements dans l'entreprise.
- La feuille de route ne préconise pas de délais dans ces étapes car beaucoup de facteurs vont affecter la réalisation des différents jalons. Ces facteurs sont les compétences de l'équipe, la culture d'entreprise, la complexité des processus et des systèmes de l'entreprise, la présence

de machine à commande numérique, les délais de livraison en cas de nouveaux capteurs ou équipements technologiques, la volonté de l'entreprise, etc. Chacun de ces facteurs impacte la réalisation de la feuille de route, mais les délais de développement doivent être de l'ordre de semaines pour pouvoir garder les employés dans les boucles de développement et répondre aux besoins de façon dynamique.

Les perspectives pour la suite des itérations sont tout d'abord de généraliser l'architecture de CPS à l'ensemble de la chaîne de valeur de l'entreprise. Le CPS pourra ensuite gérer les données nécessaires à la valorisation des données. La surveillance des processus et l'accès aux informations en temps réel apportent déjà des avantages à l'entreprise mais les techniques de valorisation des données ont un plus gros potentiel. L'aide à la décision est un de ces avantages qui permet de passer d'une prise de décision basée sur l'expérience humaine à une prise de décision basée sur les données historiques et massives. Le système de pilotage pourra ainsi être intelligent et réactif pour adapter la production à la qualité des matières premières. Une autre perspective est d'étudier la compatibilité des solutions mises en place avec des technologies plus complexes comme les outils d'IoT, les standards industriels ou les systèmes multi-agents. Enfin, les bénéfices et les impacts des CPS sur les PME sont encore peu détaillé dans la littérature, et en particulier les impacts environnementaux.

## RÉFÉRENCES

- Ahmadi, A., Cherifi, C., Cheutet, V., & Ouzrout, Y. (2017). *A review of CPS 5 components architecture for manufacturing based on standards*. 11th International Conference on Software, Knowledge, Information Management and Applications (SKIMA). <https://doi.org/10.1109/skima.2017.8294091>
- ANSI/ISA-95. (2013). *Enterprise-Control System Intergration*.
- Basl, J. (2017). Pilot Study of Readiness of Czech Companies to Implement the Principles of Industry 4.0. *Management and Production Engineering Review*, 8(2), 3-8. <https://doi.org/10.1515/mper-2017-0012>
- Chen, B., Wan, J., Shu, L., Li, P., Mukherjee, M., & Yin, B. (2018). Smart Factory of Industry 4.0: Key Technologies, Application Case, and Challenges. *IEEE Access*, 6, 6505-6519. <https://doi.org/10.1109/access.2017.2783682>
- Chen, X., & Voigt, T. (2020). Implementation of the Manufacturing Execution System in the food and beverage industry. *Journal of Food Engineering*, 278, 109932. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.109932>
- Chen, Z., Zhang, X., & He, K. (2017). *Research on the Technical Architecture for Building CPS and Its Application on a Mobile Phone Factory*. 2017 5th International Conference on Enterprise Systems (ES). <https://doi.org/10.1109/es.2017.20>
- Colli, M., Berger, U., Bockholt, M., Madsen, O., Møller, C., & Wæhrens, B. V. (2019). A maturity assessment approach for conceiving context-specific roadmaps in the Industry 4.0 era. *Annual Reviews in Control*, 48, 165-177. <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2019.06.001>
- Colombo, A. W., Karnouskos, S., Kaynak, O., Shi, Y., & Yin, S. (2017). Industrial Cyberphysical Systems: A Backbone of the Fourth Industrial Revolution. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 11(1), 6-16. <https://doi.org/10.1109/mie.2017.2648857>
- Dalenogare, L. S., Benitez, G. B., Ayala, N. F., & Frank, A. G. (2018). The expected contribution of Industry 4.0 technologies for industrial performance. *International Journal of Production Economics*, 204, 383-394. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2018.08.019>
- Danjou, C., Rivest, L., & Pellerin, R. (2017). Le passage au numérique : Industrie 4.0 : des pistes pour aborder l'ère du numérique et de la connectivité. *CEFRIO*.
- Drath, R., & Horch, A. (2014). Industrie 4.0: Hit or Hype? *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 8(2), 56-58. <https://doi.org/10.1109/mie.2014.2312079>
- Duffy, N. (1999). Database Design for Mere Mortals: A Hands-On Guide to Relational Database Design. *New Library World*, 100(3), 147-147. <https://doi.org/10.1108/nlw.1999.100.3.147.5>
- EC. (2003). *SME definition*. [https://ec.europa.eu/growth/smes/sme-definition\\_en](https://ec.europa.eu/growth/smes/sme-definition_en)
- EIF. (2004). *European Interoperability Framework, Version 1.0*.
- EIF. (2017). *New European Interoperability Framework*.
- Faller, C., & Feldmüller, D. (2015). Industry 4.0 Learning Factory for regional SMEs. *Procedia CIRP*, 32, 88-91. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.02.117>

- Frank, A. G., Dalenogare, L. S., & Ayala, N. F. (2019). Industry 4.0 technologies: Implementation patterns in manufacturing companies. *International Journal of Production Economics*, 210, 15-26. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.01.004>
- Ganzarain, J., & Errasti, N. (2016). Three stage maturity model in SME's toward industry 4.0. *Journal of Industrial Engineering and Management*, 9(5), 1119. <https://doi.org/10.3926/jiem.2073>
- Ghobakhloo, M. (2018). The future of manufacturing industry: a strategic roadmap toward Industry 4.0. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 29(6), 910-936. <https://doi.org/10.1108/jmtm-02-2018-0057>
- Goerzig, D., & Bauernhansl, T. (2018). Enterprise Architectures for the Digital Transformation in Small and Medium-sized Enterprises. *Procedia CIRP*, 67, 540-545. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.12.257>
- Hedberg, T., Helu, M., & Sprock, T. (2018). *A Standards and Technology Roadmap for Scalable Distributed Manufacturing Systems*. Volume 3: Manufacturing Equipment and Systems. <https://doi.org/10.1115/msec2018-6550>
- Hermann, M., Pentek, T., & Otto, B. (2015). *Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios*. 49th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS). <https://doi.org/10.1109/hicss.2016.488>
- Horváth, D., & Szabó, R. Z. (2019). Driving forces and barriers of Industry 4.0: Do multinational and small and medium-sized companies have equal opportunities? *Technological Forecasting and Social Change*, 146, 119-132. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2019.05.021>
- IEEE (édit.). (1990). *IEEE Standard Computer Dictionary: A Compilation of IEEE Standard Computer Glossaries*.
- ISO-2382-1. (1993). *Information technology—Vocabulary—Part 1: Fundamental terms*, International Organization for Standardization.
- Issa, A., Hatiboglu, B., Bildstein, A., & Bauernhansl, T. (2018). Industrie 4.0 roadmap: Framework for digital transformation based on the concepts of capability maturity and alignment. *Procedia CIRP*, 72, 973-978. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.03.151>
- Jiang, J.-R. (2017). *An improved Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0 smart factories*. International Conference on Applied System Innovation (ICASI). <https://doi.org/10.1109/icas.2017.7988589>
- Jordan, F., Bernardy, A., Stroh, M., Horeis, J., & Stich, V. (9-13 July 2017). *Requirements-Based Matching Approach to Configure Cyber-Physical Systems for SMEs*. Portland International Conference on Management of Engineering and Technology (PICMET), Portland, USA. <https://doi.org/10.23919/picmet.2017.8125442>
- Kagermann, H. H., J.; Hellinder, A. & Wahlster, W. (2013). *Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0: Securing the future of German manufacturing industry* final report of the Industrie 4.0 Working Group: Forschungsunion.

- Kajati, E., Papcun, P., Liu, C., Zhong, R. Y., Koziorek, J., & Zolotova, I. (2019). Cloud based cyber-physical systems: Network evaluation study. *Advanced Engineering Informatics*, 42, 100988. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2019.100988>
- Kolla, S., Minufekr, M., & Plapper, P. (2019). Deriving essential components of lean and industry 4.0 assessment model for manufacturing SMEs. *Procedia CIRP*, 81, 753-758. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.03.189>
- Kolluru, K. K., Paniagua, C., Van Deventer, J., Eliasson, J., Delsing, J., & Delong, R. J. (2018). An AAA solution for securing industrial IoT devices using next generation access control. *IEEE Industrial Cyber-Physical Systems (ICPS)*. <https://doi.org/10.1109/icphys.2018.8390799>
- Lam, A. N., & Haugen, O. (2019). *Implementing OPC-UA services for Industrial Cyber-Physical Systems in Service-Oriented Architecture*. IECON 2019 - 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. <https://doi.org/10.1109/iecon.2019.8926972>
- Lasi, H., Fettke, P., Kemper, H.-G., Feld, T., & Hoffmann, M. (2014). Industry 4.0. *Business & Information Systems Engineering*, 6(4), 239-242. <https://doi.org/10.1007/s12599-014-0334-4>
- Lee, J., Bagheri, B., & Kao, H.-A. (2015). A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*, 3, 18-23. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2014.12.001>
- Lee, J. Y., Yoon, J. S., & Kim, B. H. (2017). A big data analytics platform for smart factories in small and medium-sized manufacturing enterprises: An empirical case study of a die casting factory. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 18(10), 1353-1361. <https://doi.org/10.1007/s12541-017-0161-x>
- Liao, Y., Deschamps, F., Loures, E. D. F. R., & Ramos, L. F. P. (2017). Past, present and future of Industry 4.0 - a systematic literature review and research agenda proposal. *International Journal of Production Research*, 55(12), 3609-3629. <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1308576>
- Lu, Y., & Xu, X. (2018). Resource virtualization: A core technology for developing cyber-physical production systems. *Journal of Manufacturing Systems*, 47, 128-140. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2018.05.003>
- MAPAQ. (2019). *Agriculture biologique*. <https://www.mapaq.gouv.qc.ca/fr/Productions/Production/agriculturebiologique/Pages/ali-mentsbio.aspx>
- Masood, T., & Sonntag, P. (2020). Industry 4.0: Adoption challenges and benefits for SMEs. *Computers in Industry*, 121, 103261. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2020.103261>
- Meissner, H., Ilse, R., & Aurich, J. C. (2017). Analysis of Control Architectures in the Context of Industry 4.0. *Procedia CIRP*, 62, 165-169. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.06.113>
- Mittal, S., Khan, M. A., Purohit, J. K., Menon, K., Romero, D., & Wuest, T. (2020). A smart manufacturing adoption framework for SMEs. *International Journal of Production Research*, 58(5), 1555-1573. <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1661540>

- Mittal, S., Khan, M. A., Romero, D., & Wuest, T. (2018). A critical review of smart manufacturing & Industry 4.0 maturity models: Implications for small and medium-sized enterprises (SMEs). *Journal of Manufacturing Systems*, 49, 194-214. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2018.10.005>
- Moeuf, A., Lamouri, S., Pellerin, R., Tamayo-Giraldo, S., Tobon-Valencia, E., & Eburdy, R. (2020). Identification of critical success factors, risks and opportunities of Industry 4.0 in SMEs. *International Journal of Production Research*, 58(5), 1384-1400. <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1636323>
- Moeuf, A., Pellerin, R., Lamouri, S., Tamayo-Giraldo, S., & Barbaray, R. (2018). The industrial management of SMEs in the era of Industry 4.0. *International Journal of Production Research*, 56(3), 1118-1136. <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1372647>
- Müller, J. M., Buliga, O., & Voigt, K.-I. (2018). Fortune favors the prepared: How SMEs approach business model innovations in Industry 4.0. *Technological Forecasting and Social Change*, 132, 2-17. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2017.12.019>
- Muller, M., Wings, E., & Bergmann, L. (2017). *Developing open source cyber-physical systems for service-oriented architectures using OPC UA*. IEEE 15th International Conference on Industrial Informatics (INDIN). <https://doi.org/10.1109/indin.2017.8104751>
- [#98 est un type de document non défini dans ce style].
- Novanta. (2021). *Codeurs absolus et codeurs incrémentaux*. Celera Motion. <https://www.celeramotion.com/zettlex/fr/assistance/documents-techniques/codeurs-absolus-et-codeurs-incrementaux/>
- Paniagua, C., Eliasson, J., & Delsing, J. (2019). *Interoperability Mismatch Challenges in Heterogeneous SOA-based Systems*. IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), Australia. <https://doi.org/10.1109/icit.2019.8754991>
- Pinto, B., Silva, F. J. G., Costa, T., Campilho, R. D. S. G., & Pereira, M. T. (2019). A Strategic Model to take the First Step Towards Industry 4.0 in SMEs. *Procedia Manufacturing*, 38, 637-645. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.01.082>
- Pivoto, D. G. S., De Almeida, L. F. F., Da Rosa Righi, R., Rodrigues, J. J. P. C., Lugli, A. B., & Alberti, A. M. (2021). Cyber-physical systems architectures for industrial internet of things applications in Industry 4.0: A literature review. *Journal of Manufacturing Systems*, 58, 176-192. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.11.017>
- Prause, M. (2019). Challenges of Industry 4.0 Technology Adoption for SMEs: The Case of Japan. *Sustainability*, 11(20), 5807. <https://doi.org/10.3390/su11205807>
- Reix, R., Fallery, B., Kalika, M., & Rowe, F. (2016). *Systèmes d'Information et Management des Organisations - 7ème édition*. Vuibert Gestion.
- Riedl, M., Zipper, H., Meier, M., & Diedrich, C. (2014). Cyber-physical systems alter automation architectures. *Annual Reviews in Control*, 38(1), 123-133. <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2014.03.012>
- Schumacher, A., Nemeth, T., & Sihn, W. (2019). Roadmapping towards industrial digitalization based on an Industry 4.0 maturity model for manufacturing enterprises. *Procedia CIRP*, 79, 409-414. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.02.110>

- Sinha, D., & Roy, R. (2020). Reviewing Cyber-Physical System as a Part of Smart Factory in Industry 4.0. *IEEE Engineering Management Review*, 48(2), 103-117. <https://doi.org/10.1109/emr.2020.2992606>
- Stentoft, J., Adsbøll Wickstrøm, K., Philipsen, K., & Haug, A. (2020). Drivers and barriers for Industry 4.0 readiness and practice: empirical evidence from small and medium-sized manufacturers. *Production Planning & Control*, 1-18. <https://doi.org/10.1080/09537287.2020.1768318>
- Sufian, A. T., Abdullah, B. M., Ateeq, M., Wah, R., & Clements, D. (2019). *A Roadmap Towards the Smart Factory*. 12th International Conference on Developments in eSystems Engineering (DeSE). <https://doi.org/10.1109/dese.2019.00182>
- Tao, F., Qi, Q., Liu, A., & Kusiak, A. (2018). Data-driven smart manufacturing. *Journal of Manufacturing Systems*, 48, 157-169. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2018.01.006>
- Trabesinger, S., Pichler, R., Schall, D., & Gfrerer, R. (2019). Connectivity as a prior challenge in establishing CPPS on basis of heterogeneous IT-software environments. *Procedia Manufacturing*, 31, 370-376. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.03.058>
- Trentesaux, D. (2007). Les systèmes de pilotage hétéarchiques : innovations réelles ou modèles stériles ? *Journal Européen des Systèmes Automatisés (JESA)*, 41(9-10), 1165-1202. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01876131>
- Trentesaux, D. (2009). Distributed control of production systems. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 22, 971-978. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2009.05.001>
- Valle, P. H. D., Garcés, L., & Nakagawa, E. Y. (2019). *A Typology of Architectural Strategies for Interoperability*. Proceedings of the XIII Brazilian Symposium on Software Components, Architectures, and Reuse, Salvador, Brazil. <https://doi.org/10.1145/3357141.3357144>
- Vernadat, F. B. (2010). Technical, semantic and organizational issues of enterprise interoperability and networking. *Annual Reviews in Control*, 34(1), 139-144. <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2010.02.009>
- Wan, J., Tang, S., Shu, Z., Li, D., Wang, S., Imran, M., & Vasilakos, A. (2016). Software-Defined Industrial Internet of Things in the Context of Industry 4.0. *IEEE Sensors Journal*, 1-1. <https://doi.org/10.1109/jsen.2016.2565621>
- Wang, S., Wan, J., Li, D., & Zhang, C. (2016). Implementing Smart Factory of Industrie 4.0: An Outlook. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 12(1), 3159805. <https://doi.org/10.1155/2016/3159805>
- Wang, S., Wan, J., Zhang, D., Li, D., & Zhang, C. (2016). Towards smart factory for industry 4.0: a self-organized multi-agent system with big data based feedback and coordination. *Computer Networks*, 101, 158-168. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2015.12.017>
- You, Z., & Feng, L. (2020). Integration of Industry 4.0 Related Technologies in Construction Industry: A Framework of Cyber-Physical System. *IEEE Access*, 8, 122908-122922. <https://doi.org/10.1109/access.2020.3007206>
- Zakoldaev, D. A. (2019). *The interoperability of cyber-physical systems in digital manufacturing of the Industry 4.0*.

Zezulka, F., Marcon, P., Vesely, I., & Sajdl, O. (2016). Industry 4.0 – An Introduction in the phenomenon. *IFAC-PapersOnLine*, 49(25), 8-12.  
<https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.12.002>

## ANNEXE A DIAGRAMME DE CLASSE DE LA PREMIÈRE ITÉRATION DU DÉVELOPPEMENT DU CPS

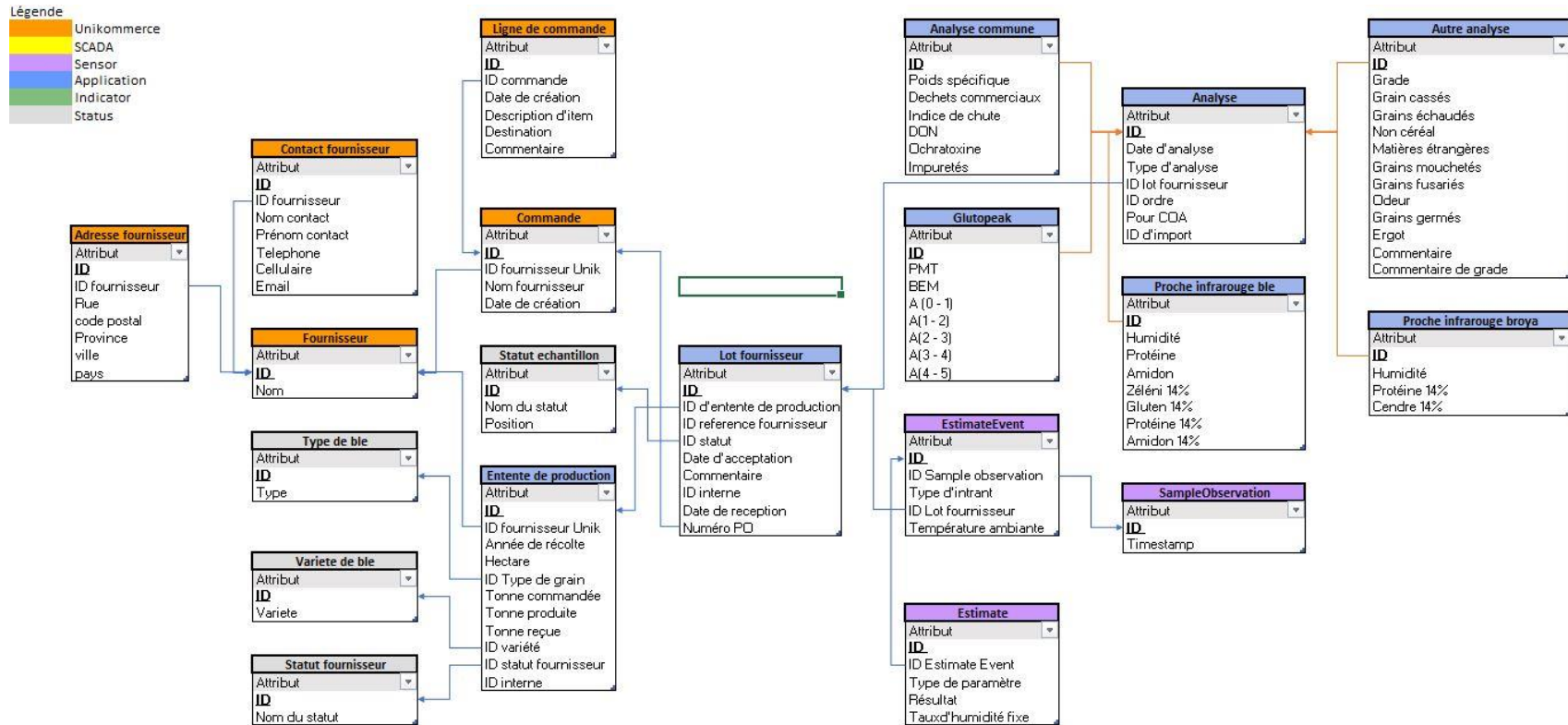


Figure A-1 : Diagramme de classe de la première itération

## ANNEXE B DIAGRAMME DE CLASSE DE LA DEUXIÈME ITÉRATION

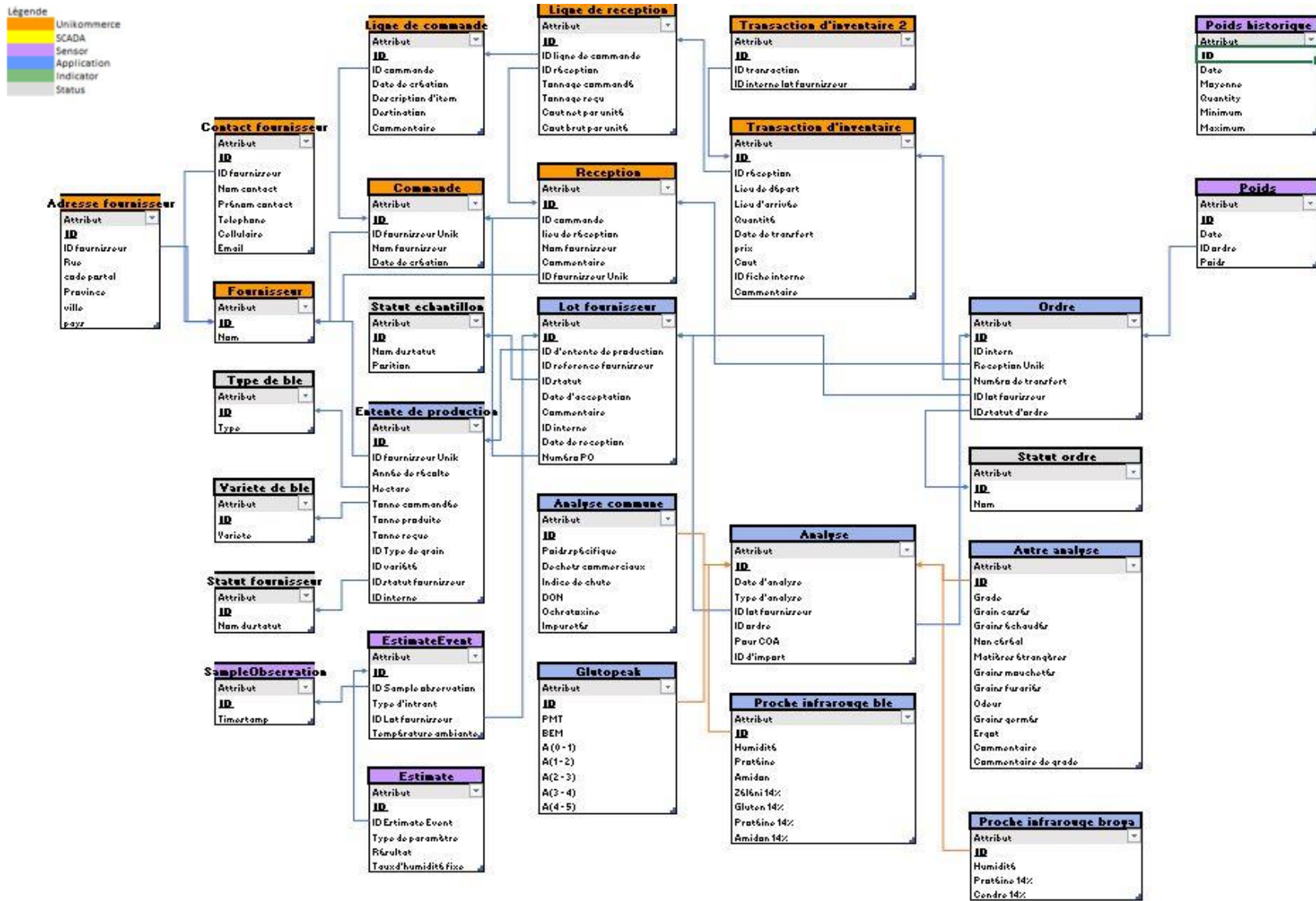


Figure B-2 : Diagramme de classe de la deuxième itération