

# Implantation d'une architecture de CPS permettant l'interopérabilité des systèmes de production en contexte de PME

JEAN-REMI PIAT<sup>1,2</sup>, CHRISTOPHE DANJOU<sup>1,2</sup>, BRUNO AGARD<sup>1,2</sup>, ROBERT BEAUCHEMIN<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire en Intelligence des Données  
Département de mathématiques et génie industriel,  
École Polytechnique de Montréal, CP 6079, succursale Centre-Ville, Montréal, Québec, Canada  
jean-remi.piat@polymtl.ca, christophe.danjou@polymtl.ca, bruno.agard@polymtl.ca

<sup>2</sup> Centre Interuniversitaire de Recherche sur les Réseaux d'Entreprise, la Logistique et le Transport (CIRRELT)

<sup>3</sup> La Meunerie Milanaise, Saint-Jean-sur-Richelieu, Québec, Canada

---

**Résumé :** L'industrie 4.0 est une stratégie basée sur les nouvelles technologies pour accroître les capacités des entreprises. Des standards et des méthodes ont été développés pour, et par, les grandes entreprises afin d'intégrer les technologies de l'industrie 4.0 aux systèmes de productions et créer une industrie intelligente. Cependant, l'intégration de ces technologies reste problématique dans beaucoup d'environnements industriels et notamment dans les petites et moyennes entreprises (PMEs). D'une part, l'hétérogénéité physique et informatique des systèmes d'entreprise complexifie la création d'un cadre d'interopérabilité, et d'autre part, les limites en ressource financière, en connaissances et en culture technologique contraignent les PME dans l'adoption d'une stratégie 4.0. L'article présente une architecture de CPS (système cyber-physique) pour rendre les systèmes de pilotage plus réactifs et mettre en place un cadre d'interopérabilité. Une méthodologie d'implantation agile est proposée pour adapter cette architecture au contexte des PME. Un cas d'étude sur une meunerie biologique de la région de Montréal est introduit pour valider la méthodologie et présenter les premiers résultats.

**Abstract:** Industry 4.0 is a strategy based on emerging technologies to improve capabilities in enterprises. Standards and methods have been introduced for, or by, large firms for their own benefits to integrate industry 4.0 technologies in production systems and develop a smart factory. However, the integration of these systems is still an issue in many industrial environments, especially in small and medium enterprises (SMEs). First, physical and digital heterogeneity increases the complexity of interoperability introduction, on the other hand, the financial resources, knowledge resources and technology awareness limitations constrain SMEs in strategy 4.0 adoption. The paper presents a CPS (cyber-physical system) architecture to make the control systems more reactive and establish an interoperability frame. An agile methodology is proposed to adapt this framework in the SMEs and a case study of a Montreal biological flour milling is described to validate the methodology and present the first results.

**Mots clés – Interopérabilité, Système Cyber-Physique, Industrie 4.0, PME, Architecture.**

**Keywords – Interoperability, Cyber-Physical System, Industry 4.0, SME, Architecture.**

---

## 1 INTRODUCTION

L'industrie est en constante évolution et a déjà connu trois révolutions industrielles par le passé pour s'adapter au rythme des attentes de notre société (Drath et Horch, 2014). De nos jours, l'industrie traditionnelle doit satisfaire de nouveaux standards en fournissant des produits et des services personnalisés de haute qualité tout en maintenant le profit d'une production de masse (Lasi et al., 2014).

L'industrie 4.0 est une stratégie apparue en 2011 pour répondre à ce défi (Drath et Horch, 2014). L'industrie 4.0 s'appuie sur un ensemble de technologies et de concepts pour établir une connectivité ubiquitaire et réorganiser la chaîne de valeur (Hermann et al., 2015). L'objectif est de transformer les processus, les produits et les services par une prise de décision décentralisée en temps réel pour développer de nouvelles capacités (Danjou et al., 2017). L'industrie intelligente est

l'achèvement de ce système complètement connecté qui opère en autonomie grâce à la génération, au transfert et à l'analyse de données (Lasi et al., 2014).

Un des concepts essentiels de l'industrie 4.0 est l'interopérabilité (Hermann et al., 2015). 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). Les systèmes considérés peuvent comprendre des machines de productions spécialisées, des capteurs, des produits ou des systèmes d'information. Chaque entreprise doit sélectionner des technologies en fonction de ses propres systèmes et de ses besoins pour mettre en place son cadre d'interopérabilité et développer sa stratégie d'industrie 4.0.

Les standards et les protocoles sont des facteurs clés dans l'architecture d'une industrie intelligente (Hermann et al., 2015).

L'utilisation de standards permet d'identifier et de positionner une architecture par rapport aux autres mais aussi de comparer des concepts, des principes, des méthodes, des modèles et des outils 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 d'architecture standard coûteuse et requiert des compétences multidisciplinaires.

Le contexte des petites et moyennes entreprises (PMEs) accentue les difficultés d'implantation d'une stratégie d'industrie 4.0 (Masood et Sonntag, 2020). Les méthodes, les architectures et les technologies utilisées dans les grandes entreprises doivent être adaptées pour répondre aux contraintes financières, en ressources humaines et en connaissances des PME, tout en s'accordant avec leur environnement hétérogène qui comprend beaucoup de données dispersées et isolées.

Ceci pose la question de comment peut-on implémenter un système de pilotage réactif et flexible dans un environnement de PME de transformation agroalimentaire.

La structure de l'article se décompose de la manière suivante : la section 2 présente l'état de l'art. Tout d'abord, nous présentons les niveaux et les standards de l'interopérabilité (section 2.1), ensuite, les systèmes cyber-physiques (Cyber-physical system CPS) sont définis et une architecture de CPS est introduite (section 2.2). La section 2.3 porte sur les difficultés d'implantation de CPS dans le contexte des PME et la section 3 présente la méthodologie d'implantation proposée. La section 4 expose un cas d'étude dans le domaine agroalimentaire. Nous présentons le contexte du cas d'étude (4.1) et montrons la mise en œuvre détaillée de la méthode proposée sur un exemple (4.2). Finalement, la section 5 rappelle les résultats et limites de la méthode proposée et propose quelques perspectives.

## 2 ÉTAT DE L'ART

Dans cette section, une architecture de système cyber-physique est décrite pour mettre en place un cadre d'interopérabilité. Le contexte des petites et moyennes entreprises (PMEs) est ensuite étudié pour comprendre leurs contraintes spécifiques.

### 2.1 Interopérabilité

L'interopérabilité est une notion essentielle dans l'ère de l'industrie 4.0 et fait l'objet d'études et de projets académiques pour en définir des structures et des méthodes d'implantation. L'institut des ingénieurs électriciens et électroniciens (IEEE) l'a défini comme étant « la capacité de deux ou plusieurs systèmes ou éléments à échanger des informations et à utiliser les informations ainsi échangées » (Geraci, 1990). Des structures et des standards ont ensuite été introduits pour comprendre, analyser et guider la mise en œuvre d'un cadre d'interopérabilité (Valle et al, 2019).

#### 2.1.1 Niveaux d'interopérabilités

L'interopérabilité peut être décomposée en trois niveaux par (EIF, 2004) :

- L'interopérabilité organisationnelle qui 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'interopérabilité sémantique qui 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.
- L'interopérabilité technique qui couvre l'ensemble des problèmes techniques pour connecter les systèmes informatiques. Son but est de faciliter les communications en utilisant des protocoles permettant les échanges de données et de messages entre les applications du système. Ce type d'interopérabilité est associé avec les composants physiques, informatiques et réseaux permettant la communication inter-machine.

Ces trois niveaux d'interopérabilité sont les plus récurrents dans la littérature, ils traitent des différents aspects du système et sont nécessaires à l'intégration d'un cadre d'interopérabilité (Valle et al., 2019; Vernadat, 2010).

#### 2.1.2 Standard

Une architecture orientée service (Service oriented architecture SOA) est une des technologies pour établir l'interopérabilité sémantique (Valle et al., 2019). Elle utilise des interfaces logicielles, appelées services, pour créer une infrastructure facilitant les interactions et les échanges d'informations entre les systèmes. Ces interfaces spécifient 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 (X. Chen et Voigt, 2020).

Une architecture SOA conserve le flux sémantique du système et fournit une forte interdépendance entre les services des trois groupes fonctionnels (la production, la qualité et le personnel) d'une entreprise (Paniagua et al., 2019). L'interdépendance de ces groupes fonctionnels forme l'intégration horizontale des systèmes d'une entreprise (ANSI/ISA-95, 2013). L'intégration verticale porte sur la connexion et la communication des systèmes à tous les niveaux pour donner à la direction des informations de production à jour et au bon moment. Les intégrations horizontale et verticale sont des notions introduites par la norme ISA-95 (ANSI/ISA-95, 2013). La norme ISA-95 contient cinq parties, publiées au début des années 2000, et définit l'interopérabilité entre le management corporatif et le système de production. La norme décrit une architecture pyramidale standard en cinq niveaux pour représenter les fonctionnalités de l'entreprise. Des systèmes d'information, dont les ERP, les MES et les SCADA, ont été développés pour fournir les services correspondant aux fonctionnalités de chaque niveau et assurer l'intégration verticale et horizontale. Ces systèmes spécialisés apportent une grande diversité et complexifient la mise en place d'un cadre d'interopérabilité. L'hétérogénéité des systèmes comprend leur fournisseur, leurs protocoles de communication, leur structure de données, leurs interfaces d'accès, leur fréquence de

communication et le volume de données échangées (Kajati et al., 2019).

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 systèmes de production 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, i.e. un client, et le fournisseur du service, i.e. un serveur, communiquent en s'échangeant des informations sur des objets qui modélisent les systèmes physiques de l'entreprise.

L'architecture pyramidale de l'ISA-95, est une représentation générique des interactions entre les différents systèmes d'une industrie (Colombo et al., 2017; Sinha et Roy, 2020). Elle définit des services nécessaires, mais pas suffisants pour les nouvelles capacités de l'industrie 4.0. De plus, la structure rigide des systèmes d'information implique une prise de décision hiérarchisée et distribuée qui n'est pas adaptée aux capacités flexibles, évolutives et réactives des nouveaux systèmes de l'industrie 4.0.

## 2.2 Système Cyber-Physique (CPS)

Dans une stratégie d'industrie 4.0, les systèmes d'entreprise sont soutenus par les nouvelles technologies, dont l'intelligence artificielle, le nuage informatique (cloud computing), l'internet des objets, les systèmes cyber-physiques, la cybersécurité, les machines autonomes, la communication inter-machines, les systèmes de simulations et la réalité augmentée (Danjou et al., 2017). L'augmentation de l'utilisation de ces technologies en industrie transforme l'environnement industriel en un système caractérisé par une forte coordination entre des éléments informatiques et physiques qui forme un système cyber-physique (Cyber-physical system CPS) industriel (Colombo et al., 2017). Ce système est le pilier de la connectivité permettant une prise de décision en temps réel et décentralisée.

### 2.2.1 Définition

Le terme CPS a été introduit en 2006 par la fondation nationale des sciences (National Science Foundation NSF) américaine pour désigner l'intégration des systèmes informatiques avec les processus physiques (Colombo et al., 2017; Sinha et Roy, 2020). Ce nouveau système enrichit les interactions entre les services des systèmes industriels pour augmenter l'intégration verticale et horizontale. Le CPS permet d'aplatir l'architecture pyramidale définie par l'ISA-95 (Riedl et al., 2014). Les relations entre les systèmes d'information de la norme ISA-95 sont réutilisées pour permettre des communications directes entre les systèmes qui devaient auparavant passer par d'autres niveaux, créer un environnement évolutif pouvant accueillir de nouveaux systèmes et enfin fournir de nouveaux services en explorant les données de tous les systèmes.

Les performances d'un CPS dépendent de sa capacité à collecter efficacement et analyser une grande quantité de données provenant de différentes sources pour surveiller, contrôler et optimiser l'environnement industriel de façon durable (Colombo et al., 2017). Les principaux défis sont l'hétérogénéité et la complexité des composants ainsi que les interactions entre le domaine virtuel et physique (Sinha et Roy, 2020). L'objectif est d'introduire une négociation entre les systèmes connectés permettant de reconfigurer les processus et les ressources en fonction de la dynamique de production. Les ressources humaines de l'entreprise doivent être capables d'interagir avec le CPS pour prendre des décisions, comprendre et optimiser la planification, les installations, la production, les services et la maintenance (Colombo et al., 2017 ; Sinha et Roy, 2020).

### 2.2.2 Architecture d'un CPS

Une architecture en quatre niveaux, physique, réseau, nuage informatique et terminal de contrôle, peut être considérée pour étudier les différentes technologies et problématiques d'un CPS (B. Chen et al., 2018; Wan et al., 2016; Wang et al., 2016a; Wang et al., 2016b).

Les équipements présents sur la chaîne de production forment le niveau physique. Ces systèmes sont connectés avec les équipements de communication performants du niveau réseau qui utilise des technologies informatiques pour transmettre des informations au niveau du nuage informatique. Ces technologies regroupent les protocoles SOA comme l'OPC-UA, les réseaux industriels de capteurs sans-fils (Industrial Wireless Sensors Networks IWSNs), les réseaux définis par logiciels (Software-Defined Networks SDNs), les bus de terrain et d'autres technologies informatiques. Le réseau doit 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.

Le nuage informatique regroupe les ressources informatiques pour gérer les données. Des techniques d'exploration de données sont utilisées pour créer les services nécessaires aux prises de décisions et à l'optimisation des processus. Les technologies d'exploration de données utilisent une grande quantité de données pour extraire de l'information à l'aide d'algorithmes informatiques. Ces informations servent à prévoir et modéliser des événements pour maîtriser les problèmes de productions, de qualités et de maintenance. Les résultats sont communiqués aux autres systèmes ou au terminal de contrôle qui regroupe toutes les données importantes et leurs informations connexes sur une application web appelée interface homme-machine (IHM). Cette application fournit un support efficace, spécialisé et visuel pour gérer les interactions entre les systèmes et les opérateurs.

Le CPS traite des problématiques d'interopérabilité technique et sémantique grâce aux technologies informatiques. La représentation sémantique des différents concepts et leurs liens peuvent notamment être modélisés par une ontologie qui s'appuie sur des technologies de base de données pour enrichir les modèles classiques et gérer des systèmes plus complexes et intelligents. Le CPS permet aux ressources physiques de fournir des informations et des services au domaine virtuel, mais aussi d'en recevoir malgré

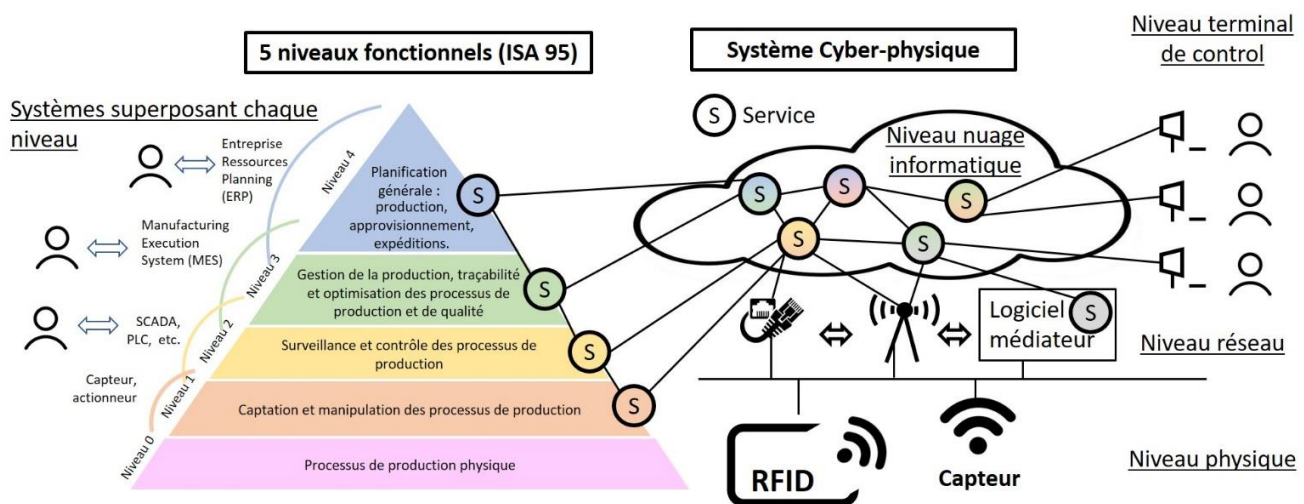


Figure 1 : Superposition d'un CPS sur l'architecture générique d'une entreprise

l'hétérogénéité des systèmes spécialisés de hautes performances du plancher de production.

Les systèmes d'information sont contraints dans leurs interfaces et ne peuvent pas accueillir tous les nouveaux systèmes alors que les CPS offrent une architecture flexible par construction. Les composants des niveaux physique et réseau ne sont pas contraints par les capacités des autres systèmes. Chaque équipement est responsable de ses services, et ceux-ci peuvent être mis en relation au niveau du nuage informatique.

Le CPS permet aussi d'implanter un système de pilotage plus réactif en distribuant le pouvoir décisionnel de façon hétérarchique (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). 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 temps de communication. Dans un système de contrôle hiérarchique, la communication des informations entre les niveaux, la prise de décision et l'application des décisions génèrent des latences et des instabilités (Trentesaux, 2009). 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.

### 2.3 Contexte PME

La majorité des recherches sur l'industrie 4.0 sont réalisées par et pour de grandes organisations et des entreprises multinationales (EMNs) (Mittal et al., 2018 ; Masood et Sonntag, 2020). Les stratégies d'industrie 4.0 utilisent des standards et des protocoles pour créer des systèmes complexes. Les modèles, les architectures et les technologies ainsi développés et utilisés sont liés entre eux pour permettre le développement de nouvelles capacités. L'utilisation non systématique des standards dans les PME crée des différences entre les PME et avec les EMNs au niveau de leur fonctionnement, de leur structure et de leurs ressources (Masood et Sonntag, 2020). Les environnements uniques des PME rendent la recherche de modèles et de méthodes difficile.

Les défis auxquels les PME font face ont été répertoriés dans la littérature (X. Chen et Voigt, 2020 ; Jordan et al., 2017 ; Masood et Sonntag, 2020). Premièrement, les PME rencontrent des limitations financières lors de la mise en place des projets technologiques complexes de l'industrie 4.0. Deuxièmement, ces projets nécessitent des connaissances pour personnaliser l'intégration des systèmes informatiques dans un environnement hétérogène. Des compétences générales en programmation, en ingénierie, en technologie et en management sont nécessaires pour évaluer le projet et des connaissances spécialisées sur les technologies utilisées et sur le domaine industriel sont ensuite requises. Troisièmement, la culture technologique de la PME joue un rôle important sur les difficultés et les bénéfices que va apporter le projet. Le manque d'expériences, de connaissances et de partage sur les principes d'industrie 4.0 en PME rend l'adoption et l'implantation difficile.

Une étude a été effectuée pour évaluer les facteurs influençant les défis rencontrés et les bénéfices apportés par la mise en place d'un CPS (Masood et Sonntag, 2020). Les bénéfices regroupent la réduction des coûts et l'augmentation de l'efficacité, de la qualité et de la flexibilité des opérations. L'étude montre que les bénéfices sont plus conséquents dans les plus grandes PME et dans celles ayant une conscience des principes d'industrie 4.0. En revanche, la complexité des processus de production et des technologies utilisées augmente les difficultés d'implantation du projet.



### 3 METHODOLOGIE D'IMPLANTATION

L'État de l'art montre que les stratégies et les technologies d'industries 4.0 se basent sur des standards pour implanter de nouveaux concepts, comme l'interopérabilité, et apporter de nouvelles capacités et de nouveaux services dans l'entreprise. Les systèmes cyber-physiques (CPS) sont une des technologies développées dans les grandes entreprises pour connecter l'ensemble des processus physiques au monde virtuel. Leur architecture permet de réutiliser les services des systèmes existants et de les coupler avec des services d'autres systèmes isolés pour développer un système de pilotage flexible et réactif. Dans les PME, le développement d'un CPS est contraint d'une part, par l'absence de certains standards et services des systèmes d'informations des grandes entreprises et d'autre part, par les limites en ressources financières, en connaissances et en culture technologique.

Nous proposons donc une méthodologie pour définir les services et les fonctionnalités d'une architecture standard ISA-95 en contexte de PME ainsi que pour mettre en place une structure de CPS évolutive, flexible et adaptée. La figure 1 schématise le CPS superposant l'architecture ISA-95 générique d'une entreprise. L'architecture ISA-95 de gauche explicite les cinq niveaux fonctionnels essentiels avec la prise de décision hiérarchique des systèmes d'information tandis que l'architecture de droite représente la vision hétéroarchitecturale et flexible de la stratégie 4.0. Une approche basée sur les besoins de l'atelier de production permet de faciliter la virtualisation des processus physiques (Jordan et al., 2017 ; Lu et Xu, 2018). La figure 2 présente les quatre phases d'implantations utilisées dans le cas d'étude. Cette méthodologie repose sur des pratiques agiles qui sont très utilisées dans le développement de logiciels informatiques (Lu et Xu, 2018).

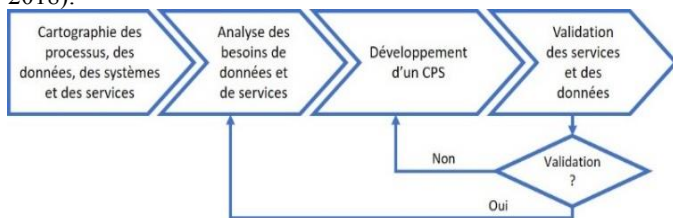


Figure 2 : Méthodologie d'implantation d'un CPS.

#### 3.1 Phase 1 : Cartographie des processus, des données, des systèmes et des services.

Dans cette première phase, l'objectif est de cartographier les données et les services utilisés sur la chaîne de valeur. Cette démarche commence par une cartographie des processus pour définir la chaîne de valeur de l'étude. Les différentes données manipulées par les opérateurs et les systèmes sont ensuite répertoriées. Pour finir, chaque donnée est associée à un système qui sera étudié pour connaître ses standards, ses protocoles et les services qu'il offre.

#### 3.2 Phase 2 : Analyse des besoins de données et de services

L'identification des besoins est un processus pour définir les ressources de production à virtualiser. La connaissance des différentes caractéristiques d'un CPS et la cartographie de l'existant permettent de déterminer les données et les services manquants pour répondre aux exigences du système.

L'utilisation d'une méthode de développement agile permet de répondre aux besoins de façon dynamique. Cette méthode permet de délivrer des interfaces logicielles continuellement pour répondre aux changements permanents des besoins (Abrahamsson, 2002). Chaque identification d'un besoin fait l'objet d'une période de développement et d'une mise en place rapide. Les modifications des besoins existants et l'ajout de nouveaux besoins sont pris en compte et implémentés de façon dynamique.

#### 3.3 Phase 3 : Développement d'un système cyber-physique

La mise en place du système répond à un besoin en fournissant l'accès à de nouvelles données et en créant de nouveaux services. Une stratégie de migration permet de réutiliser les réseaux existants et de former de nouvelles communications entre les systèmes à certains points d'accès. Les boucles de contrôle existantes ne changent pas et de nouveaux services sont disponibles (Riedl et al., 2014).

L'objectif du système est de mettre en place un cadre d'interopérabilité grâce à une architecture en quatre niveaux d'un CPS. La connexion entre les systèmes aux niveaux physique et réseaux du CPS assure l'interopérabilité technique du système. Les interfaces logicielles doivent ensuite pouvoir coopérer et échanger des données pour assurer l'interopérabilité sémantique et créer des services dans le nuage informatique. La capacité du système à trouver l'information que l'utilisateur veut dans l'industrie, nécessite de faire la transition entre l'architecture de gauche de la figure 1 vers une architecture de CPS qui autorise les interactions entre l'ensemble des partenaires du système.

L'interopérabilité sémantique peut être construite à partir d'une ontologie ou plus simplement grâce à un diagramme de classe qui modélise les données partagées et leurs relations. Le diagramme de classe permet de décrire le contenu, la source et le but des données appartenant aux différents systèmes utilisés en entreprise et de créer une hiérarchie cohérente. Le format d'échange des données est défini pour qu'elles soient gérées de la même façon sur tous les équipements. L'utilisation des systèmes médiateurs embarqués permet de standardiser le format d'échange sans gérer les appareils individuellement (Riedl et al., 2014). Le diagramme est construit à partir de la cartographie de la première phase et prend en compte les problématiques des différents niveaux d'un CPS. Cette approche reste problématique pour des systèmes complexes avec beaucoup de systèmes hétérogènes (Chungoora et al., 2013).

Finalement, les services sont rendus accessibles aux employés à travers un terminal de contrôle décentralisé. Ce terminal permet la communication entre les systèmes et les employés pour assurer l'interopérabilité organisationnelle.

#### 3.4 Phase 4 : Validation des données et des services

Des tests informatiques sont effectués pour vérifier l'ensemble des échanges de services entre les systèmes et valider la réponse aux besoins. Cette étape conduit soit à la phase trois de développement du CPS si le projet est rejeté (figure 2), soit à la phase deux d'identification des besoins pour définir un nouveau projet.

Le suivi d'indicateurs de performance permet de valider les caractéristiques du CPS à tous les niveaux. Deux indicateurs peuvent être considérés : le nombre de données enregistrées par

unité de temps et la latence du système. Le nombre de données permet de maîtriser l'espace informatique du système et de mettre en place une solution cohérente. La latence correspond au délai entre la demande d'un service et la réponse, elle est critique pour tous les systèmes intégrant des problématiques de réponse en temps réel (Trinks, 2019).

#### 4 CAS D'ETUDE

##### 4.1 Contexte

Le partenaire industriel dans lequel nous avons implanté un CPS est La Milanaise, une meunerie biologique dans la région de Montréal. L'entreprise appartient au secteur agroalimentaire qui impose de nombreuses réglementations sur la production pour garantir la qualité et la sécurité de ses produits (X. Chen et Voigt, 2020). De plus, les grains utilisés pour la production sont cultivés sans l'utilisation de produit chimique, 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. Une stratégie industrie 4.0 a donc été envisagée pour enrichir les systèmes actuels qui ne supportent pas la diversité des équipements de productions et les besoins informatiques des modèles de prédiction. L'objectif est d'optimiser et d'augmenter la réactivité du pilotage de production dans un environnement de PME hétérogène, fluctuant et rigoureux.

Le partenaire offre un contexte relativement favorable, parmi les PME, pour implanter un CPS d'après les critères de (Masood et Sonntag, 2020) vus en section 2.3. L'entreprise est considérée comme une grande PME avec plus de 50 employés et le processus de transformation est peu complexe avec un flux linéaire et continu (figures 3 et 4). Cependant, la culture technologique est encore peu mature d'après l'étude de Masood. D'une part, l'entreprise a des infrastructures récentes et très automatisées, et la direction encourage le développement technologique et les investissements dans le domaine. D'autre part, les employés sont peu formés aux technologies et aux concepts d'industries 4.0.

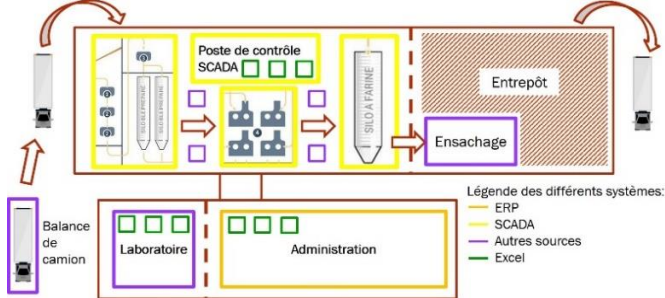


Figure 3 : Schématisation des systèmes utilisés pour le processus de transformation

L'entreprise contient plusieurs sources de données hétérogènes (figure 3) : le système de gestion ERP (en orange), le système de contrôle SCADA (en jaune), les fichiers Excels (en vert) et les autres sources dont les machines isolées (en violet). L'ensemble de ces systèmes forment un environnement complexe avec peu de coopération.

##### 4.2 Mise en œuvre de la démarche

###### 4.2.1 Phase 1 : Cartographie des processus, des données, des systèmes et des services.

Dans cette première phase, une cartographie des processus utilisant le formalisme de l'institut national américain des standards (American National Standards Institute ANSI) a été réalisée pour définir la chaîne de valeur (figure 4).

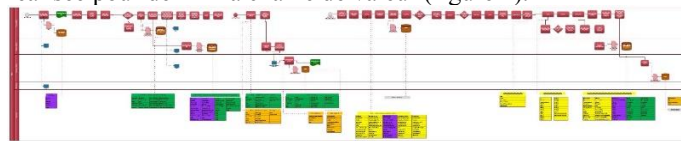


Figure 4 : Cartographie des processus enrichie avec les données manipulées et leur source

Le formalisme ANSI a été enrichi dans notre étude pour répertorier les données manipulées lors du processus de transformation sur le couloir du bas (figure 4) et pour la source des données avec un code couleur identique à la figure 3. Le nombre de données en vert montre que beaucoup de données étaient enregistrées sur des fichiers Excels. Ces données étaient isolées, statiques et dispersées dans l'entreprise.

###### 4.2.2 Phase 2 : Analyse des besoins de données et de services.

La cartographie de la phase 1 nous a permis de comparer les services et les données utilisées dans notre cas d'étude avec les services fournis par l'architecture ISA-95 de la figure 1. Nous avons schématisé l'architecture au début du projet sur la figure 5.

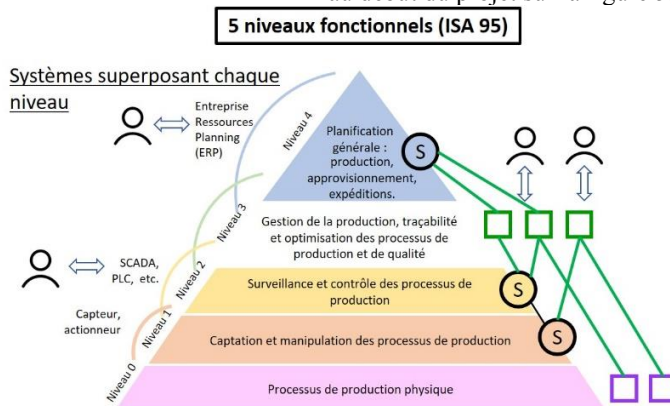


Figure 5 : Architecture des systèmes au début du projet.

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 fournis par les fichiers Excel. Les services offerts par ces fichiers sont l'ordonnancement, la collecte des données de production, la gestion des ordres de production et le suivi de la qualité. Ces fichiers représentent les premiers besoins en données et en service à virtualiser, car les services développés dans un CPS nécessitent les données opérationnelles des systèmes d'information standards.

On a observé que beaucoup de données peuvent être virtualisées donc nous avons divisé le développement du système par besoin pour suivre une implémentation agile. Nous avons commencé par mettre en place un CPS sur le début du processus de transformation : le choix des fournisseurs pour les grains de blé. La figure 6 représente les différentes sources et le format des données manipulées pour cette première partie.

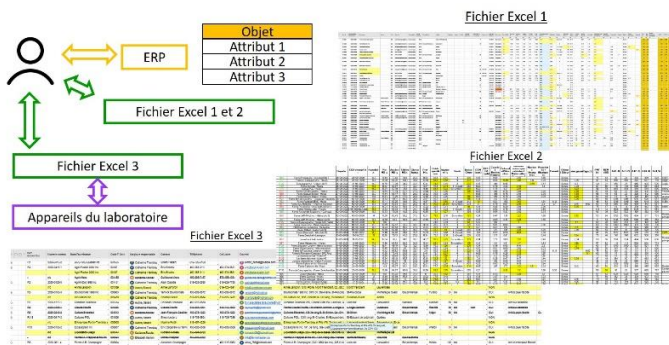


Figure 6 : Sources et format des données utilisées lors du choix des fournisseurs

La première source de données étudiée a été l'ERP de l'entreprise. Ses données cartographiées dans la phase un ont été associées avec les attributs des tables de la base de données relationnelle de l'ERP pour pouvoir les réutiliser dans le CPS. La deuxième source de données comprenait les fichiers Excel retenus et la troisième source regroupait les appareils de mesure du laboratoire. Ces appareils sont des machines spécialisées pour mesurer les caractéristiques d'un grain de blé. Les données et les services fournis par ces deux dernières sources étaient nos besoins à virtualiser.

#### 4.3 Phase 3 : Mise en place d'un système cyber-physique

La mise en place d'un cadre d'interopérabilité pour ce besoin représente la communication entre les données des appareils de mesure du laboratoire, les données des fichiers Excels et des données de l'ERP.

L'interopérabilité technique a nécessité de connecter tous les appareils du laboratoire pour récupérer leurs données d'analyse. Les protocoles de sauvegarde de données ont été étudiés pour connaître le format des données et leur emplacement. Trois formats ont été rencontrés : soit l'appareil avait un format propriétaire nécessitant une interface particulière pour lire les données, soit les données étaient enregistrées dans une base de données relationnelle, ou soit l'appareil fournissait des données analogiques pouvant être analysées par un système médiateur.

L'architecture utilisée pour connecter les systèmes est basée sur une architecture traditionnelle comprenant des programmes informatiques embarqués sur les machines de production pour contrôler le flux de données sur le réseau, gérer les chemins de routage et transférer les données de production. Ces systèmes forment le niveau physique de notre CPS.

Le niveau réseau a été utilisé pour connecter les machines au domaine virtuel. La technologie utilisée pour notre problématique est le réseau Ethernet et le réseau WIFI de l'entreprise.

Le niveau nuage informatique contient la plateforme virtuelle supportant la base de données et les ressources informatiques pour les interfaces. Les données sont manipulées par des interfaces intermédiaires et des interfaces de haut niveau grâce à une architecture client-serveur RESTFUL développée avec Python. La complexité de l'environnement et le manque de ressource dans la PME ont orienté notre choix vers un diagramme de classe au lieu d'une ontologie. Les objets du diagramme ont été créés à

partir des fichiers Excel (figure 7) et des données des appareils de mesure.

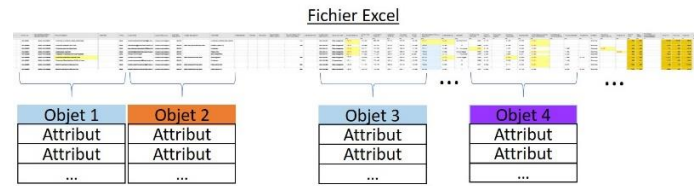


Figure 7 : Processus de création des objets.

La source des objets a été représentée par la couleur des tables : les classes appartenant à la base de données existante de l'ERP en orange, les données nouvellement virtualisées en bleu, et les données des autres sources utilisant des programmes embarqués ou d'autres bases de données en violet. Les relations entre les objets ont ensuite été définies sur le diagramme de classe (figure 8).

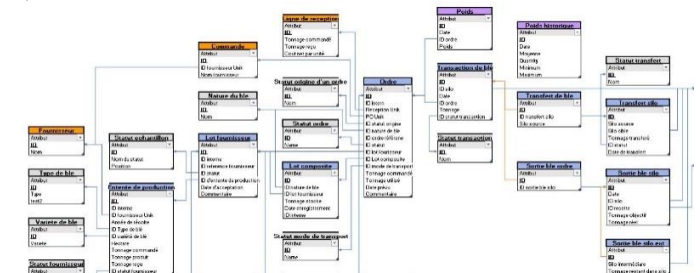


Figure 8 : Présentation d'une partie du diagramme de classe

Ce diagramme utilise le formalisme du langage de modélisation unifié (UML) et affiche seulement le nom utilisateur des objets et de leurs attributs pour conserver la lisibilité du diagramme. Des métadonnées ont ensuite été définies pour chaque attribut : leur nom informatique, leur type, leur modificateur de visibilité, leur capacité à être nul, leur valeur par défaut et un commentaire d'explication. Les métadonnées sur les objets ont été répertoriées dans un espace relié aux classes pour enrichir le formalisme.

Les interfaces gérant les objets de la base de données offrent des services pouvant communiquer avec les autres interfaces. Les communications sont basées sur des événements déclencheurs et peuvent être synchrones ou asynchrones en fonction du choix de design. Les événements permettent de réduire les données échangées en acceptant la communication uniquement sous certaines conditions (Riedl et al., 2014). Les communications synchrones sont principalement utilisées par les interfaces embarquées pour assurer la liaison en temps réel et signaler des événements comme des erreurs.

Le niveau du nuage informatique du CPS centralise les services des différents appareils de mesure et assure leur interopérabilité sémantique. Les analyses peuvent donc être gérées sur l'interface homme-machine de l'application web du niveau terminal de contrôle. L'accès aux résultats sur tous les appareils informatiques connectés aux réseaux de l'entreprise permet une prise de décision décentralisée et en temps réel.

#### 4.4 Phase 4 : Validation des données

Trois boucles de développement ont été effectuées pour s'assurer que les services développés répondaient aux exigences et aux besoins. Les indicateurs de performances ont ensuite été calculés



pour maîtriser la solution. Aucune stratégie d'optimisation du nombre de données enregistrées n'a été développée car les résultats d'analyses sont des valeurs remarquables discrètes. Le délai de récupération des données n'a pas été calculé, car aucune problématique de temps réel n'a été retenue.

#### 4.5 Analyse des résultats

La mise en place d'un CPS pour les choix des fournisseurs a permis à la PME de créer une base de données sur le nuage informatique de l'entreprise. L'information a ainsi pu être décentralisée de façon à avoir l'accès aux mêmes informations en temps réel et sur toutes les plateformes. Les résultats d'analyse des grains ont pu être étudiés pour classer les fournisseurs en fonction de leurs grains. Un seul système sera utilisé sur toute la chaîne de production pour pouvoir réutiliser les données virtualisées dans les prochaines interfaces pour créer des relations entre la qualité de la production et les grains des fournisseurs.

Finalement, l'implantation d'un CPS pour cette première partie a permis à l'entreprise de découvrir les limites et les possibilités de l'industrie 4.0 dans la PME. Les possibilités du système en termes d'optimisation des processus et de qualité ont confirmé la décision de la direction d'investir dans l'industrie 4.0. Le suivi du projet a amélioré la culture technologique et la culture d'industrie 4.0 des employés. Les principales limites sont des limites de cultures technologiques. D'une part, des limites technologies ont été spécifiées pour s'adapter aux connaissances et aux compétences des ressources humaines du projet. D'autres part, la direction a dû mobiliser l'ensemble des employés pour développer la culture technologique de l'entreprise et promouvoir l'implication des employés dans le projet et dans l'utilisation des systèmes développés.

## 5 CONCLUSION

L'objectif était de mettre en place une architecture de CPS pour assurer l'interopérabilité entre l'ensemble des systèmes d'une PME. Nous avons proposé une méthodologie agile pour adapter une architecture de CPS utilisée dans les grandes entreprises à un environnement de PME. La méthode s'appuie sur 4 phases et a été testée dans une meunerie biologique de la région de Montréal. Le projet est encore récent, mais a déjà apporté des résultats significatifs pour l'entreprise au niveau de leurs choix de fournisseurs et de l'analyse des matières premières. La définition de la méthode et le développement de la culture technologique sur une première problématique nous permettent d'étendre le CPS aux processus de production plus complexes. Une des perspectives est de généraliser l'architecture du CPS à l'ensemble de la chaîne de valeur pour avoir un système de pilotage réactif qui peut s'adapter à la qualité des matières premières. La direction a décidé de ne pas automatiser le CPS et de garder un pouvoir décisionnel humain mais le CPS permettra de responsabiliser les opérateurs de production pour créer une organisation hétéroarchitecturale au sens large, plus réactive localement.

### Remerciements

Nous tenons à remercier notre partenaire industriel, La Milanaise, d'avoir participé au développement de ce travail ainsi que le MAPAQ (projet IA119053) pour leur soutien financier.

## 6 REFERENCES

- Abrahamsson, P. (2002). Agile software development methods: Review and analysis. *VTT Publications*(478), 3-107.
- ANSI/ISA-95. (2013). *Enterprise-Control System Intergration*. In.
- 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. doi: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. doi:10.1016/j.jfoodeng.2020.109932
- Chungoora, N., Young, R. I., Gunendran, G., Palmer, C., Usman, Z., Anjum, N. A., . . . Case, K. (2013). A model-driven ontology approach for manufacturing system interoperability and knowledge sharing. *Computers in Industry*, 64(4), 392-401. doi:10.1016/j.compind.2013.01.003
- 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. doi:10.1109/mie.2017.2648857
- Danjou, C., Rivest, L., & Pellerin, R. (2017). *Douze positionnements stratégiques pour l'Industrie 4.0 : entre processus, produit et service, de la surveillance à l'autonomie*. Paper presented at the CIGI 2017 : 12ème Congrès International de Génie Industriel, Compiègne, France, 3-5 mai.
- Drath, R., & Horch, A. (2014). Industrie 4.0: Hit or Hype? [Industry Forum]. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 8(2), 56-58. doi:10.1109/mie.2014.2312079
- EIF. (2004). *European Interoperability Framework, Version 1.0*.
- Geraci A. (1991). *IEEE Standard Computer Dictionary: Compilation of IEEE Standard Computer Glossaries*. New York: Inst. Elect. Electron. Eng. Inc
- Hermann, M., Pentek, T., & Otto, B. (2015, 2016). *Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios*.
- IEC-62541-1. (2020). International Electrotechnical Commission IEC TR 62541-1. OPC UNIFIED ARCHITECTURE – Part 1: Overview and concepts.
- ISO-2382-1. (1993). Information technology—Vocabulary—Part 1: Fundamental terms, International Organization for Standardization. In. Geneva (Switzerland).
- Jordan, F., Bernardy, A., Stroh, M., Horeis, J., & Stich, V. (2017, 9-13 July). *Requirements-Based Matching Approach to Configure Cyber-Physical Systems for SMEs*. Paper presented at the Portland International Conference on Management of Engineering and Technology (PICMET), Portland, USA.
- 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. doi:10.1016/j.aei.2019.100988
- Lasi, H., Fettke, P., Kemper, H.-G., Feld, T., & Hoffmann, M. (2014). Industry 4.0. *Business & Information Systems Engineering*, 6(4), 239-242. doi:10.1007/s12599-014-0334-4
- Lu, Y., & Xu, X. (2018). Resource virtualization: A core technology for developing cyber-physical production



- systems. *Journal of Manufacturing Systems*, 47, 128-140. doi:10.1016/j.jmsy.2018.05.003
- Masood, T., & Sonntag, P. (2020). Industry 4.0: Adoption challenges and benefits for SMEs. *Computers in Industry*, 121, 103261. doi:10.1016/j.compind.2020.103261
- MAPAQ. (2019). *Agriculture biologique*. Tiré de: <https://www.mapaq.gouv.qc.ca/fr/Productions/Production/agriculturebiologique/Pages/alimentsbio.aspx>
- 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. doi:10.1016/j.jmsy.2018.10.005
- Paniagua, C., Eliasson, J., & Delsing, J. (2019, 13-15 Feb). *Interoperability Mismatch Challenges in Heterogeneous SOA-based Systems*. Paper presented at the IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), Australia.
- Riedl, M., Zipper, H., Meier, M., & Diedrich, C. (2014). Cyber-physical systems alter automation architectures. *Annual Reviews in Control*, 38(1), 123-133. doi:10.1016/j.arcontrol.2014.03.012
- 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. doi:10.1109/emr.2020.2992606
- Trentesaux, D. (2007). Les systèmes de pilotage hétéroarchitecturés : innovations réelles ou modèles stériles ?, *Journal Européen des Systèmes Automatisés (JESA)*, 41, 1165-1202
- Trentesaux, D. (2009). Distributed control of production systems. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 22, 971-978. doi:10.1016/j.engappai.2009.05.001
- Trinks, S. (2019). *Image mining for real time fault detection within the smart factory*. Paper presented at the IEEE 21st Conference on Business Informatics (CBI), Moscow, Russia.
- Valle, P. H. D., Garcés, L., & Nakagawa, E. Y. (2019, Sept). *A Typology of Architectural Strategies for Interoperability*. Paper presented at the Proceedings of the XIII Brazilian Symposium on Software Components, Architectures, and Reuse, Salvador, Brazil.
- Vernadat, F. B. (2010). Technical, semantic and organizational issues of enterprise interoperability and networking. *Annual Reviews in Control*, 34(1), 139-144. doi: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. doi:10.1109/jsen.2016.2565621
- Wang, S., Wan, J., Li, D., & Zhang, C. (2016a). Implementing Smart Factory of Industrie 4.0: An Outlook. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 12(1), 3159805. doi:10.1155/2016/3159805
- Wang, S., Wan, J., Zhang, D., Li, D., & Zhang, C. (2016b). 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. doi:10.1016/j.comnet.2015.12.017