



HAL
open science

Industrie 4.0 processus – Quel modèle pour une intégration réussie

Chawki El Zant

► **To cite this version:**

Chawki El Zant. Industrie 4.0 processus – Quel modèle pour une intégration réussie. Autre. HESAM Université, 2021. Français. NNT : 2021HESAE023 . tel-03677479

HAL Id: tel-03677479

<https://pastel.hal.science/tel-03677479>

Submitted on 24 May 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

ÉCOLE DOCTORALE SCIENCES DES MÉTIERS DE L'INGÉNIEUR
[Laboratoire Conception de Produits et Innovation – Campus de Paris]

THÈSE

présentée par : **Chawki EL ZANT**

soutenue le : **16 Juillet 2021**

pour obtenir le grade de : **Docteur d'HESAM Université**

préparée à : **École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers**

Spécialité : **Industrial Engineering**

Industry 4.0 Process, Which Model for A Successful Integration

THÈSE dirigée par :
[Pr AOUSSAT Améziane]

et co-encadrée par :
[Mr BENFRIHA Khaled]

Jury

M. Farid BAKIR , Pr, LIFSE, HESAM	Président
M. Abdelaziz BOURAS , Pr, College of Engineering, Qatar University (QU)	Rapporteur
M. Abdelkhalak EL HAMI , Pr, département de mécanique, INSA Rouen	Rapporteur
Mme. Rima HLEISS , Maitre de Conférences, Faculté de Génie, U. Libanaise	Examinatrice
M. Améziane AOUSSAT , Pr, LCPI, HESAM	Examineur
M. Khaled BENFRIHA , Maître de Conférences, LCPI, HESAM	Examineur
M. Patrick LE MEN , Ingénieur, MBA, Directeur Ingénieurs2000	Invité

Résumé

L'industrie 4.0 est un système dynamique et intégré permettant de contrôler l'ensemble de la chaîne de valeur du cycle de vie des produits. L'intégration verticale et horizontale et la fusion des composants physiques et virtuels sont essentielles, de même que la mise en œuvre des tendances technologiques telles que les systèmes cyber physiques et l'Internet des objets en tant que catalyseurs clés d'un haut niveau d'intégration à l'échelle mondiale. L'introduction de l'Industrie 4.0, caractérisée par des processus de fabrication intelligents et connectés, intéresse de plus en plus les entreprises qui s'efforcent de s'adapter à la demande croissante du marché et des clients. L'objectif de ce projet de doctorat est d'aider les entreprises à évoluer de la fabrication automatisée traditionnelle vers la numérisation du processus de fabrication en proposant un nouveau modèle d'intégration de l'Industrie 4.0. La variété et la complexité des aspects de l'Industrie 4.0, ainsi que les défis techniques et de gestion doivent être pris en compte pour fournir aux entreprises des approches d'intégration cohérentes sur la base d'un nouveau Framework d'intégration. L'expérimentation a été réalisée à la plateforme technologique 4.0 des Arts et Métiers, campus de Paris. Le modèle développé et le Framework proposé ont été vérifiés grâce à un travail intensif d'expérimentation et de mise en œuvre à la plateforme 4.0.

Mots-clés : Industrie 4.0, Systèmes cyber-physiques (CPS), Internet des objets (IoT), Modèles d'intégration, Transformation numérique, Framework d'intégration, Flexibilité, Modularité, Déploiement de données, Robotique avancée, Système d'exécution de fabrication.

Abstract

Industry 4.0 is a dynamic and integrated system for employing control over the entire value chain of the lifecycle of products. Vertical and horizontal integration and fusion of physical and the virtual components are critical for Industry 4.0, as well as technology trends implementation such Cyber Physical Systems and Internet of Things as key enablers of high level of integration at a global scale. Introducing Industry 4.0 as the smart and connected manufacturing processes enabler is increasingly attracting companies trying hard to adapt to the growing market and customer demands. Due to the emergence of Industry 4.0 concept, the aim of this PhD thesis is to help companies to evolve from traditional automated manufacturing to the digital manufacturing level by proposing a novel integration model of Industry 4.0. The variety and the complexity of Industry 4.0 aspects, along with technical and managerial challenges are to be taken into consideration to provide companies with successful integration approaches along with a novel integration framework. The experimentation following this research has been realized at the platform 4.0 at Arts et Métiers Institute of Technology, Paris. The developed model and the proposed framework have been verified through an intensive implementation and integration work among the experimentations done at the industrial platform 4.0.

Keywords: Industry 4.0, Cyber-Physical Systems (CPS), Internet of Things (IoT), Integration Models, Digital Transformation, Integration Framework, Flexibility, Modularity, Data Deployment, Advanced Robotics, Manufacturing Execution System.

ÉCOLE DOCTORALE SCIENCES DES MÉTIERS DE L'INGÉNIEUR
[Laboratoire Conception de Produits et Innovation – Campus de Paris]

THÈSE (Résumé en Français)

présentée par : **Chawki EL ZANT**

soutenue le : **16 Juillet 2021**

pour obtenir le grade de : **Docteur d'HESAM Université**

préparée à : **École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers**

Spécialité : **Génie Industriel**

Industrie 4.0 Processus, Quel Modèle Pour Une Intégration Réussie

THÈSE dirigée par :
[Pr AOUSSAT Améziane]

et co-encadrée par :
[Mr BENFRIHA Khaled]

Table des matières

1. Introduction	9
2. Contexte général de la 4 ^{ème} révolution industrielle	11
2.1 La numérisation des entreprises et des systèmes de production, un besoin industriel	11
2.1.1 Contexte de l'évolution industrielle 4.0	11
2.1.2 Changements et avantages de la numérisation des entreprises	13
2.2 Objectifs de la recherche dans le contexte de l' Industrie 4.0 et la transition numérique des entreprises	14
2.2.1 Continuité numérique des produits et les axes de recherche LCPI.....	14
2.2.2 Plateforme de production robotisée 4.0.....	15
2.3 Positionnement général de la présente thèse du doctorat.....	16
3. Contexte scientifique et problématique de recherche.....	17
3.1 Analyse des aspects de l'intégration des principes de l'industrie 4.0 dans les entreprises de production.....	17
3.2 Périmètre de l' intégration des principes de l' industrie 4.0 dans les entreprises de production.....	18
3.3 Projection des concepts de l'industrie 4.0 au cycle de vie du produit et positionnement de la problématique de recherche	20
3.4 Problématique, la question de la recherche.....	21
4. La numérisation des systèmes de fabrication dans le contexte de l' industrie 4.0 - Etat de l' Art	24
4.1 Intégration vertical dans le contexte de l' industrie 4.0.....	24
4.2 Revue de la flexibilité et de la modularité dans le contexte de l' Industrie 4.0.....	26
4.3 L' Evolution de Technologies de L' information et des Communications (ICT) et la structure hiérarchique traditionnelle	28
4.4 Intégration verticale et fonctionnalités de l' industrie 4.0.....	30
4.5 Analyse des architectures 4.0 existantes	32
4.6 Synthèse de positionnement par rapport à l' état de l' art.....	34
5. Hypothèse	36
5.1 Hypothèse proposée.....	36
5.3 Démarche scientifique de la résolution de l' hypothèse proposée	38
6. Modélisation des systèmes de production 4.0	40

6.1	Modélisation générale des systèmes de production 4.0	40
6.2	Modélisation des systèmes de production 4.0, cas d' un système de production existant	45
6.3	Framework de la transition numérique des systèmes de fabrication 4.0.....	47
7.	Expérimentations, application à la plateforme industrielle 4.0.....	51
7.1	Objectifs et Protocole de l' expérimentation.....	52
7.2	Déploiement du Framework proposé.....	53
7.2.1	Atelier flexible à la plateforme 4.0 :	53
7.2.2	Système de commande (contrôle) flexible de la plateforme 4.0 :	55
7.2.3	Intégration des services modulaires :	56
7.2.4	Gestion intégrée des données :	58
7.2.5	Ouverture pour une communication au niveau business de l'entreprise et les lignes de production distribuées :	59
7.3	Architecture innovante de la plateforme industrielle 4.0	59
7.3.1	Architecture système de la plateforme industrielle 4.0.....	60
7.3.2	Architecture informatique de la plateforme industrielle 4.0.....	61
7.3.3	Modèle basé sur le niveau de décision des machines de la plateforme industrielle 4.0	62
7.3.4	Synthèse	63
7.4	Une méthodologie de conception pour la configuration des processus modulaires	64
7.5	Application de l' approche modulaire mise en œuvre dans le programme de production	67
7.5.1	Opérations paramétriques standardisées.....	68
7.5.2	Modules.....	71
7.5.3	Orchestration du plan de production.....	73
7.5.4	Planification des processus de production.....	75
7.6	Application démonstrative	76
7.6.1	Etape n. 1 :	77
7.6.2	Etape n. 2 :	77
7.6.3	Référentiel de mesure proposé pour l'évaluation quantitative de la nouvelle performance :	79
7.6.4	Analyse et discussion des résultats :	82
8.	Résultats et discussion générale	85
9.	Conclusion et perspectives	88
	References.....	91

1. Introduction

L'industrie européenne est confrontée à des défis économiques essentiels en raison du rythme croissant des développements sociétaux et technologiques, tels que la diminution de la disponibilité des ressources naturelles, l'augmentation des prix de l'énergie, et la globalisation des marchés. La production industrielle est aujourd'hui tirée par la concurrence mondiale et la nécessité d'une adaptation rapide de la production aux demandes en constante évolution. Les consommateurs sont de plus en plus exigeants pour une innovation produit-service améliorée, une variété de produits, des normes de qualité plus élevées, des services d'assistance et l'immédiateté ou la satisfaction des commandes. Ces défis conduisent les entreprises industrielles à être capables de gérer l'ensemble de leur chaîne de valeur de manière agile et réactive.

Ces exigences ne peuvent pas être satisfaites que par des avancées radicales dans les processus de fabrication actuels, ainsi que par l'intégration de tous les acteurs de la chaîne de valeur de l'entreprise (fournisseurs et clients). Les aspects techniques de ces exigences sont abordés par l'application des concepts génétiques des systèmes cyber-physiques (CPS), de l'Internet des objets industriels et de l'intégration des nouvelles fonctionnalités et technologies aux systèmes de production industriels. La représentation d'objets physiques tels que les machines, les outils, les pièces et leurs équipements dans le monde numérique, avec la possibilité de communiquer avec d'autres objets, permet de construire un système de contrôle de la planification, un pilotage de la production et enfin une logistique plus flexible, plus efficace et plus transparente. Précisément, les entreprises ont besoin à la fois de structures virtuelles et physiques qui permettent une coopération étroite et une adaptation rapide tout au long du cycle de vie du produit, de l'innovation à la production et à la distribution (Erol and Schumacher, 2016). Cela nécessite également des changements au niveau des différentes couches du système de production de l'entreprise, des systèmes de contrôle au système d'information en termes de planification, d'exécution, de vente et enfin de la gestion.

Ainsi, tous les fabricants doivent se préparer à entreprendre cette révolution industrielle potentielle pour rester compétitifs sur un marché turbulent et hyperconcurrentiel. Les innovations technologiques et les changements dans l'environnement des affaires affectent à la fois la performance à court terme et la pérennité à long terme des entreprises. Lorsque les orientations et les options technologiques futures sont incertaines, les entreprises doivent formuler une stratégie appropriée pour soutenir leur planification avec les développements technologiques futurs tels que l'industrie 4.0. Du point de vue tant stratégique que technologique, la transition vers l'industrie 4.0 nécessite un modèle stratégique complet qui visualise chaque étape supplémentaire vers une entreprise de fabrication entièrement numérique.

Un problème majeur survient lorsqu'une entreprise décide de passer des fonctionnalités 3.0 à 4.0, et la question principale est de savoir comment entreprendre cette transformation aux niveaux intégration,

outils et stratégie. L'intégration de nouvelles technologies et la mise au niveau des lignes de production existantes doivent être étudié en profondeur. Ainsi, un processus d'intégration doit être développé avec soin. De plus, le point initial dans cette démarche consiste à identifier le modèle de la transition numérique et ses limitations.

La présente thèse de doctorat vise à offrir un modèle de transition qui peut être utilisé comme outil conceptuel, par les académiciens et les industriels, dans la perspective d'une transformation réussie de la fabrication traditionnelle vers la numérisation des systèmes de production dans le contexte de l'Industrie 4.0. Il est évident qu'une compréhension approfondie des spécifications de l'Industrie 4.0 est un préalable au développement du modèle de transition numérique et technologique. Notre démarche scientifique consiste à développer un modèle conceptuel et l'appliquer sur un système de production traditionnel afin d'identifier les évolutions requises et de définir en conséquence un Framework de la transition numérique. Le Framework proposé sera appliqué à la plateforme industrielle 4.0 des Arts et Métiers de Paris afin d'expérimenter et valider notre approche scientifique.

L'agilité offerte par l'industrie 4.0 permet aux usines de gérer une gamme de produits plus diversifiée avec un délai de livraison plus court et de personnaliser rapidement les produits en fonction des exigences spécifiques, garantissant ainsi une plus grande réactivité aux besoins des clients. Alors que l'Industrie 4.0 offre d'énormes et nouvelles opportunités pour les entreprises ; son impact apporte également de nouveaux défis. La question dynamique de la structure verticale traditionnelle de production doit être analysée, puisque les systèmes de production doivent d'abord être capables de s'adapter aux nouveaux produits et de répondre rapidement aux fluctuations de la demande. Deuxièmement, les systèmes de production doivent permettre de déployer des données collectées à partir des machines et des capteurs afin que le système optimise ses processus.

Ce document est organisé en neuf chapitres. Après l'introduction, le chapitre 2 présente le contexte général de cette thèse de doctorat en termes de besoin industriel et besoin de recherche. Le chapitre 3 identifie le positionnement de la recherche ainsi que la problématique de la recherche. Le chapitre 4 est dédiée à l'étude bibliographique et aux défis auxquels est confronté le processus de la numérisation des systèmes de fabrication dans le contexte de l'industrie 4.0. Le chapitre 5 introduit l'hypothèse proposée. Le chapitre 6 présente le modèle suivi du Framework de la transition numérique. Dans le chapitre 7, une nouvelle architecture de transition de la fabrication numérique est développée et expliquée dans le cadre des expérimentations, suivi d'une application démonstrative. Une discussion générale des résultats sera menée dans le chapitre 8. Le chapitre 9 conclut la thèse de doctorat tout en discutant les résultats et les apports scientifiques.

2. Contexte général de la 4^{ème} révolution industrielle

Les révolutions industrielles précédentes sont à l'origine de nouvelles découvertes en termes de technologie ou de source d'énergie, alors que l'Industrie 4.0 offre une combinaison de technologies et de fonctionnalités (El Zant et al., 2021) à mettre en œuvre dans toute la chaîne de valeur d'une entreprise, ce qui rend l'industrie 4.0 un concept unique. L'industrie 4.0 n'offre pas une machine à vapeur mécanisée à ajouter à la ligne de production ou une fonctionnalité visant à optimiser le temps de production, c'est une proposition de transformation complète, une industrie interconnectée, une usine intelligente et de nouvelles approches pour améliorer les affaires.

Ce chapitre a pour objectif d'établir le lien entre les besoins industriels vis-à-vis la transition numérique des entreprises et l'objectif de notre recherche scientifique afin de préciser le positionnement général de la présente thèse de doctorat. Le contexte général de la 4^{ème} révolution industrielle ainsi que les aspects économiques et industrielles qui accompagnent l'émergence de l'Industrie 4.0 sont introduits dans la section 2.1. Le besoin industriel figurant dans la transition numérique identifié dans la section 2.1.1 est justifié par les changements et les avantages de la numérisation des entreprises identifiées dans la littérature qui seront présentés dans la section 2.1.2. La section 2.2 présente par la suite le besoin de recherche vis-à-vis la nouvelle révolution industrielle tout en positionnant parmi les axes de recherche du Laboratoire de Conception de Produits et Innovation (LCPI), et en introduisant le projet de recherche de la plateforme 4.0. La section 2.3 positionne l'objectif de la présente thèse de doctorat parmi les axes de recherche définis.

2.1 La numérisation des entreprises et des systèmes de production, un besoin industriel

Les étapes du développement des systèmes de production industrielle, de la fabrication manuelle au concept de l'Industrie 4.0, sont considérés comme un chemin au travers de quatre révolutions industrielles.

[2.1.1 Contexte de l'évolution industrielle 4.0](#)

La première révolution industrielle qui a commencé avec la mécanisation et la production d'énergie mécanique, n'a éclaté que dans un certain pays, l'Angleterre, et a amené la transition des processus manuels vers les premiers procédés de fabrication, principalement dans le secteur du textile. La deuxième révolution industrielle a été déclenchée par l'électrification qui a intégré l'industrie et la production. La 2^{ème} révolution industrielle est marquée par un large éventail de secteurs entièrement nouveaux comme l'industrie chimique, la construction mécanique, et l'agroalimentaire. Si l'énergie dans la 1^{ère} révolution industrielle était le charbon, dans la 2^{ème} révolution industrielle étaient l'électricité, le pétrole et le gaz. Le symbole de la 2^{ème} révolution industrielle est l'acier et la construction de la Tour Eiffel. Tel que c'est mentionné par Henry Ford, disant à propos de la voiture

Ford T-Model "Vous pouvez avoir n'importe quelle couleur tant qu'elle est noire", il s'agit bien d'une production de masse, sans possibilité de personnalisation des produits. La troisième révolution industrielle se caractérise par l'introduction de la microélectronique et de l'automatisation (Rojko, 2017). C'est l'ère des technologies de l'information. Des systèmes de gestion intégrés IMS ont été introduits pour réduire considérablement les coûts de gestion, ce qui représente l'un des changements majeurs dans le monde industriel. L'ensemble de la structure de l'entreprise a été affectée et réorganisée en fonctions de leur cœur de métier et séparées tels que le département de recherche et développement, les finances et le marketing (Santos et al., 2017).

Aujourd'hui, nous vivons la quatrième révolution industrielle, appelée « Industrie 4.0 » qui diffère de la révolution industrielle précédente en termes de concept et d'outils. C'est la première révolution industrielle à prendre en compte les ressources énergétiques renouvelables pour alimenter nos processus de production. Demain, les usines 4.0 seront intégrées dans des villes intelligentes et alimentées par l'énergie éolienne, solaire et géothermique selon (SenTryo, 2017). Du côté technologique, l'industrie 4.0 ne consiste pas à découvrir un nouveau phénomène mécanique, électrique ou même de communication, mais une véritable combinaison entre de nombreuses technologies nouvelles. Grâce à l'utilisation élargie de l'Internet des objets (IoT), à l'introduction de Cyber Physical Systems (CPS), Cloud Manufacturing (CM), Additive Manufacturing (AM) et de nombreuses autres technologies et actionneurs, un nouveau niveau d'industrie et de fabrication pourra être atteint. Cette révolution industrielle se caractérise principalement par la connectivité et l'interopérabilité, la flexibilité, l'intelligence, la modularité et la personnalisation de produits de masse. En d'autres termes, l'industrie 4.0 aide les entreprises à produire des produits de plus en plus individualisés avec un délai de mise sur le marché court dans le respect des exigences de la qualité. Par ailleurs, la fabrication intelligente joue un rôle important dans l'industrie 4.0, les ressources sont converties en objets intelligents afin qu'ils puissent agir, ressentir et se comporter dans un environnement intelligent (Zhong et al., 2017).

L'industrie 4.0 est une révolution industrielle enracinée dans un nouveau phénomène technologique - la numérisation. Cette numérisation / digitalisation nous permet de construire un nouveau monde virtuel à partir duquel nous pouvons diriger le monde physique. Les industries d'aujourd'hui visent à connecter tous les moyens de production pour permettre leur interaction en temps réel. Les usines 4.0 rendent possible la communication entre les différents acteurs et objets connectés d'une ligne de production grâce à des technologies telles que le Cloud, le Big Data Analytics et l'Internet des objets industriel (SenTryo, 2017).

Trois grandes dimensions économiques et industrielles sont à l'origine de l'émergence de l'Industrie 4.0. La diminution de la disponibilité des ressources naturelles, l'augmentation des prix de l'énergie,

l'augmentation de l'âge des employés et la mondialisation des marchés sont des défis majeurs dans le contexte économique. Parallèlement, les demandes des clients deviennent de plus en plus difficiles, allant de l'amélioration de l'innovation produit-service à la variété de produits avec des normes de qualité élevées et des services d'assistance renforcés, ainsi que l'immédiateté et la satisfaction des commandes. Outre les défis majeurs susmentionnés, l'avancement des technologies telles que la disponibilité des services Internet, la large utilisation des objets connectés et de l'Internet des objets (IoT) ainsi que le développement des technologies de l'information, l'infrastructure et les réseaux informatiques sont des catalyseurs clés de la numérisation des systèmes de fabrication. Dans ce contexte, la numérisation et l'intégration de l'Industrie 4.0 dans les systèmes de fabrication est une solution réfléchie contribuant à améliorer la performance industrielle et répondant aux enjeux économiques et industriels. L'évolution de l'Industrie 4.0 est progressive, cependant, son impact est considérable sur la performance de l'entreprise, la productivité, les marchés et l'industrie en général (Santos et al., 2017).

2.1.2 Changements et avantages de la numérisation des entreprises

Selon (Bodrow, 2017), la survie économique de chaque entreprise dépend de sa volonté de changer. L'industrie 4.0 applique des changements substantiels qui affectent les petites, moyennes et grandes entreprises, en particulier dans les domaines de la production, la logistique, et l'optimisation des processus de production basée sur le traitement des données.

Selon McKinsey and Company, l'Industrie 4.0 est l'intégration au secteur manufacturier d'une couche IoT en utilisant les capteurs et actionneurs, en connectant les systèmes de production à la chaîne d'approvisionnement et aux fonctions de demande du marché par des pouvoirs analytiques. Cela aura pour conséquence de réduire les risques contractuels et de limiter les interventions humaines (Santos et al., 2017). Ainsi, les structures de gestion sont censées être plus décentralisées, bien que plus spécialisées.

Selon (Schlapfer et al., 2015), entre 20 et 50% d'économies pourraient être réalisées avec une agilité accrue. Beaucoup pourrait être économisé dans la reconfiguration des équipements de production mais encore dans les changements dynamiques des produits.

(Santos et al., 2017) ont répertorié les quatre principaux avantages de l'Industrie 4.0 : Développer des processus industriels et des chaînes d'approvisionnement verts et durables, créer un nouvel avantage stratégique sur le marché, réduire les coûts grâce à des machines autonomes et assurer un développement plus rapide des produits.

(Rojko, 2017) a mentionné que l'industrie 4.0 pourrait entraîner une diminution de 10 à 30% des coûts de production et de logistique et de 10 à 20% des coûts de gestion de la qualité. De plus, de nombreux

avantages peuvent être mis en avant :

- Un délai de mise sur le marché plus court pour les nouveaux produits.
- Permettre une production de masse personnalisée sans augmenter significativement les coûts de production globaux.
- Environnement de travail plus flexible et plus convivial.
- Utilisation plus efficace des ressources naturelles et de l'énergie.

2.2 Objectifs de la recherche dans le contexte de l'Industrie 4.0 et la transition numérique des entreprises

Partant du contexte industriel qui consiste à avoir un guide permettant à l'entreprise d'adopter une transition numérique réussie vers la digitalisation des systèmes de fabrication en tenant compte du système de production existant, la question majeure qui se pose n'est plus pourquoi, mais comment ?

Ce projet de recherche s'inscrit dans le domaine du génie industriel et s'intéresse particulièrement à la numérisation des systèmes de fabrication basé sur une démarche scientifique.

2.2.1 Continuité numérique des produits et les axes de recherche LCPI

Dans le contexte révolutionnaire de l'industrie 4.0, (Benfriha, 2020) a proposé une problématique de recherche qui considère 2 axes principaux :

- Axe 1 : Transition vers les systèmes de production 4.0
- Axe 2 : Optimisation simultanée de la conception et de la fabrication

L'axe 1 porte le développement d'une démarche générique de transition vers les systèmes de production digitalisée, dont l'objectif est d'aboutir à une approche progressive de la transition numérique des entreprises (Benfriha, 2020). La transition numérique de l'entreprise nécessite une évolution du système de production et l'intégration de nouvelles briques technologiques proposés par le 4.0. Cette approche prend en considération les fonctionnalités recherchées, le niveau d'intégration et les performances visées par l'entreprise, qui par conséquent définit le périmètre de cette transition numérique en termes d'investissement au niveau technologique.

L'axe 2 aborde la phase de l'optimisation simultanée de la conception d'un produit et de son processus de fabrication en se basant sur l'exploitation des données issues d'un processus de production digitalisé. La fabrication digitalisée génère une masse de données issues de la couche IoT et d'autres processus inhérents aux phases d'industrialisation et de production. L'exploitation de ces données collectées peut générer des informations utiles à l'optimisation simultanée des processus de conception et de production d'un produit en termes de coûts, de consommation énergétique et de temps (lead-time). Cet axe renforce la continuité numérique entre différentes phases du cycle de vie du produit.

Les activités de recherche du Laboratoire Conception de Produits et Innovation (LCPI, EA 3927) de l'HESAM, Paris, s'inscrivent essentiellement dans le domaine du génie industriel telle que le montre la **Figure 1**. Par conséquent, nos travaux de recherche portent sur l'intégration des concepts et technologies 4.0 dans les systèmes de fabrication, et ont pour objectifs de développer une démarche scientifique d'aide à la décision pour la transition vers la digitalisation des systèmes de fabrication.

OBJECTIF : OPTIMISATION DU PROCESSUS DE CONCEPTION ET D'INNOVATION

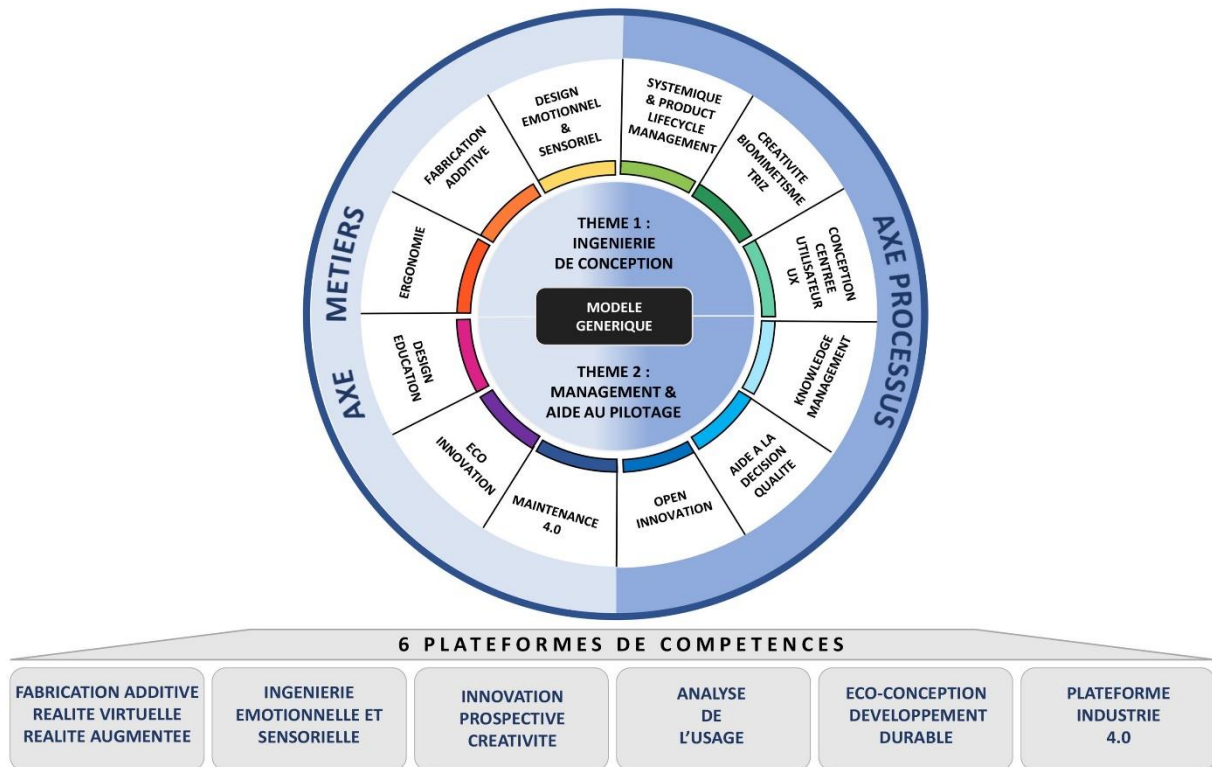


Fig. 1 Axes de recherches et des activités du Laboratoire Conception de Produits et Innovation LCPI

2.2.2 Plateforme de production robotisée 4.0

Les universités, les centres de recherche et les entreprises s'intéressent de plus en plus à l'industrie 4.0 en termes de recherches méthodologiques qui contribuent à la mise en œuvre de ces nouvelles technologies. L'objectif derrière ces efforts est d'exploiter le potentiel des nouvelles technologies et concepts, en particulier l'IoT, les processus techniques et commerciaux, la virtualisation, la flexibilité, l'interopérabilité, et l'intelligence artificielle (Rojko, 2017) afin de définir une approche méthodologique pour accompagner les entreprises dans leur projet de transitions vers la digitalisation.

Dans ce cadre, la plateforme industrielle 4.0 a été développée pour faire partie des plateformes de compétences du laboratoire CPI au sein des Arts et Métiers de Paris, en partenariat avec Le centre de formation d'apprentis (CFA) ingénieurs 2000. Cette plateforme permet d'expérimenter des modèles et architectures de systèmes de production complexe. Le 2^{ème} objectif est à caractère pédagogique. En

effet, sur la base des travaux de recherche menés, il devient possible de proposer des parcours innovants d'enseignement et de mise en situation pour l'apprentissage des principes de l'industrie 4.0.

2.3 Positionnement général de la présente thèse du doctorat

Parmi les deux axes identifiés dans la section 2.2.1, la présente thèse de doctorat est la première thèse menée au niveau de la plateforme 4.0 en considérant l'axe 1 : Transition vers les systèmes de production 4.0. L'objectif de cet axe consiste à développer une démarche scientifique de transition progressive vers la numérisation de la production, offrant ainsi de nouvelles fonctionnalités en rupture avec les modèles actuels. Il s'agit d'une approche générale qui s'impose et qui est adaptée à la trajectoire que l'entreprise se fixe, compte tenu des performances souhaitées, des fonctionnalités visées, du gap technologique attendu et de l'investissement budgétaire de l'intégration.

L'originalité de ces travaux de recherche réside dans la considération de toute les couches d'un système de production y compris le niveau technologique mais aussi bien l'architecture informatique et la couche de commande. Évidemment, l'aspect technologique, n'est pas le seul facteur de réussite, d'autres facteurs sont tellement critiques pour l'aboutissement d'un tel projet spécifiquement l'évolution des compétences. Cependant, seul l'aspect technologique sera abordé dans ce mémoire.

3. Contexte scientifique et problématique de recherche

L'objectif de ce chapitre est d'identifier la problématique de recherche dans le périmètre de la transition numérique des systèmes de fabrication dans le contexte de l'Industrie 4.0. En se basant sur une analyse de la littérature étudiée, une identification des aspects de l'industrie 4.0 est classée en fonction des différentes phases du cycle de vie du produit fabriqué afin de bien définir le positionnement et l'orientation de notre problématique de recherche. La section 3.1 analyse les aspects de l'évolution des entreprises de production vers la numérisation des processus industriels. La section 3.2 identifie le périmètre de l'intégration des principes de l'industrie 4.0 dans les entreprises de production. Dans la section 3.3, une projection des concepts de l'industrie 4.0 au cycle de vie du produit est introduite pour bien préciser le positionnement de notre problématique. La section 3.4 présente notre question de la recherche de la présente thèse de doctorat.

3.1 Analyse des aspects de l'intégration des principes de l'industrie 4.0 dans les entreprises de production

En se basant sur la littérature et aux axes de recherche identifiés, trois aspects principaux pourraient être associés à l'intégration des principes de l'Industrie 4.0 dans les entreprises, illustrés dans le **Tableau. 1**.

Tableau. 1 Aspects de l'intégration de l'Industrie 4.0 dans les entreprises (Bodrow, 2017)

Trois aspects principaux pour la numérisation des systèmes de production dans les entreprises de fabrication	
L'application des systèmes cyber-physiques CPS et de l'Internet des objets industriel IoT, en implémentant des blocs CPS avec un contrôle décentralisé via un réseau avancé	Changements dans la production
Adaptation des systèmes d'exécution de fabrication MES et les Progiciels de gestion intégré ERP pour intégrer les processus de fabrication et d'affaires en ajoutant des niveaux plus élevés de flexibilité en termes de contrôle et de connectivité	Changements dans la logistique
Traitement des big data collectées à partir des processus, des machines et des produits	Influence du big data et du cloud

Selon (Bodrow, 2017), trois aspects principaux sont nécessaires pour réaliser l'intégration des principes de l'Industrie 4.0 et pour appliquer potentiellement ses fonctionnalités promises dans les entreprises de fabrication. Les changements dans la production sont dus à l'application des systèmes cyber-physiques et de l'IoT industriel au travers des contrôleurs décentralisés via un réseau avancé. Les changements dans la logistique sont pris en compte en adaptant les systèmes d'exécution de fabrication MES et les systèmes de gestion des Ressources et Plannings ERP pour renforcer les processus de fabrication et d'affaires en ajoutant des niveaux plus élevés de flexibilité en termes de management et de connectivité. Enfin, l'influence du Big Data et du Cloud concerne le traitement et le déploiement de données collectées

à partir des différents processus de production, des machines et des produits par l'utilisation du Edge Computing et du Cloud Computing.

La classification de ces aspects proposés par (Bodrow, 2017) est soutenue par (Dalenogare et al., 2018), est basée sur les trois avantages principaux qui caractérisent l'industrie de futur d'un point de vue intégration technologique: l'intégration verticale, l'intégration horizontale et la 'end-to-end' ingénierie. L'intégration verticale fait référence à l'intégration des systèmes de technologies de l'information et de la communication (ICT) à différents niveaux hiérarchiques d'une organisation, notamment entre les niveaux de production et le niveau de gestion. D'autre part, l'intégration horizontale consiste en une collaboration entre les entreprises au niveau d'une chaîne d'approvisionnement, avec un échange de ressources et d'informations en temps réel. Enfin, l'ingénierie end-to-end est l'intégration de l'ingénierie dans toute la chaîne de valeur d'un produit, de son développement jusqu'à l'après-vente. Cette dernière dimension est assurée principalement par le traitement et le déploiement des données et de leur traitement dans les systèmes de fabrication.

3.2 Périmètre de l'intégration des principes de l'industrie 4.0 dans les entreprises de production

(Frank et al., 2019) ont affirmé que le concept de l'Industrie 4.0 représente une nouvelle étape industrielle des systèmes de fabrication par l'intégration d'un ensemble de technologies émergentes et convergentes qui ajoutent de la valeur à l'ensemble du cycle de vie du produit. En référence à (Frank et al., 2019), les technologies de l'Industrie 4.0 peuvent être séparées en deux couches différentes en fonction de leur objectif principal:

« Technologies front-end » de l'Industrie 4.0, considère la transformation des activités de fabrication basées sur les technologies émergentes « Production Intelligente » (Smart Manufacturing) et la manière dont les produits sont proposés « Produits Intelligents » (Smart Products). De même, il prend également en compte la façon dont les matières premières et les produits sont livrés « Chaîne de Valeur Intelligente » (Smart Supply Chain) et les conditions dont les salariés exercent leurs activités en s'appuyant sur le soutien des technologies émergentes « Environnement de Travail Intelligente » (Smart Working Environment). Nous évoquons cette couche technologique « technologies frontales » parce que les quatre dimensions « intelligentes » concernent les besoins opérationnels et les exigences du marché. Ces technologies partagent le même objectif d'application finale concernant la chaîne de valeur des entreprises, comme le montre la flèche schématique dans la **figure 2**. Il convient de noter que la dimension centrale de la couche technologique frontale est la fabrication intelligente, tandis que les autres dimensions sont interconnectées à celle-ci.

« Technologies de base », qui comprend les technologies fournissant la connectivité et l'intelligence pour les technologies frontales, permet d'aborder le concept Industrie 4.0. En effet, les technologies de

base permettent aux technologies frontales d'être connectées dans un système de fabrication intégré et complet.

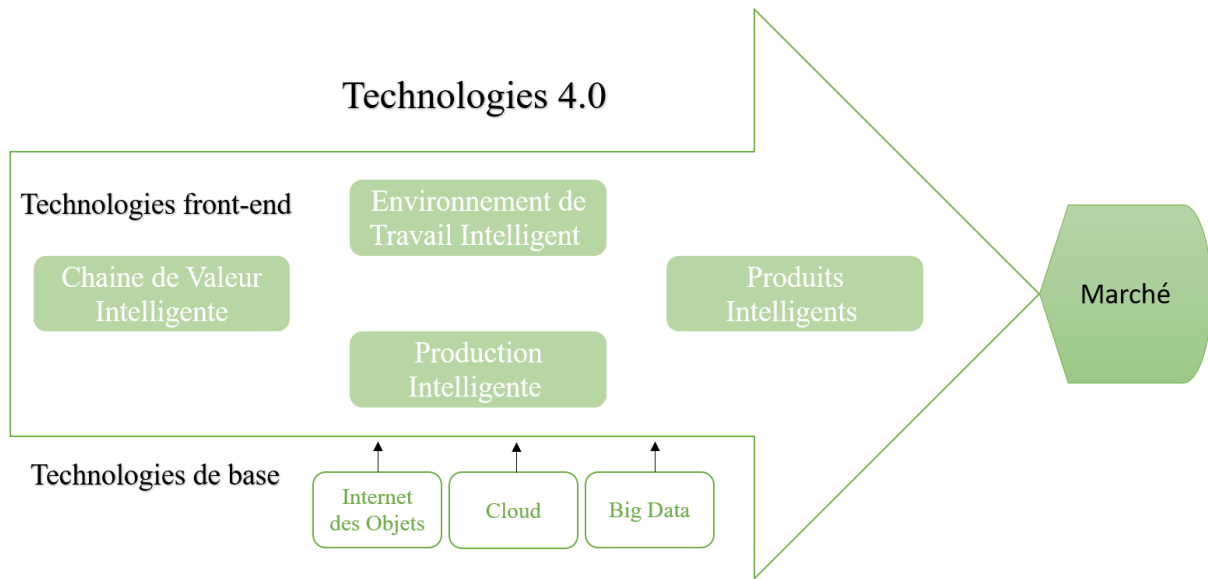


Fig. 2. Structure / Cadre théorique des technologies de l'industrie 4.0 (Frank et al., 2019)

Cette nouvelle initiative industrielle exige une évolution sociotechnique du rôle humain dans les systèmes de production, dans lequel toutes les activités de travail de la chaîne de valeur seront réalisées avec des approches intelligentes (Smart Working) et ancrées dans les technologies de l'information et de la communication (ICT).

L'industrie 4.0 est enracinée dans la fabrication avancée ou également appelée concept de fabrication intelligente, ce qui signifie un système adaptable où les lignes flexibles ajustent automatiquement les processus de production à plusieurs types de produits et à des conditions changeantes. Cela permet d'augmenter la qualité, la productivité et la flexibilité et peut aider à réaliser des produits personnalisés à grande échelle.

L'industrie 4.0 considère également l'échange d'informations et l'intégration de la chaîne d'approvisionnement (appelée Smart Supply Chain), la synchronisation de la production avec les fournisseurs pour réduire les délais de livraison et les distorsions de l'information qui produisent des effets de bullwhip. Cette intégration permet également aux entreprises de combiner des ressources dans l'approche de fabrication collaborative, leur permettant de se concentrer sur leur cœur de métier à plus forte valeur ajoutée.

Les technologies intégrées dans les produits finaux (produits intelligents) font également partie du concept plus large de l'industrie 4.0. Les produits intelligents peuvent fournir des informations en retour pour le développement de nouveaux produits et de fournir de nouveaux services et solutions au client. Ainsi, certains chercheurs considèrent les produits intelligents comme le deuxième objectif principal de

l'Industrie 4.0, car ils permettent de nouveaux modèles commerciaux tels que les systèmes produit-service, qui créent de nouvelles opportunités pour les fabricants et les prestataires de services.

Au cœur du concept de l'Industrie 4.0, **les technologies de fabrication intelligente constituent le pilier central des activités opérationnelles internes**, tandis que les produits intelligents prennent en compte la valeur ajoutée externe des produits, lorsque les informations et les données des clients sont intégrées au système de production. La fabrication intelligente considère les technologies pour la fabrication des produits (système de production), tandis que les produits intelligents considèrent les technologies liées à l'offre de produits.

Par conséquent, nous supposons que la fabrication intelligente est le point de départ et le premier objectif de l'industrie 4.0, tandis que le produit intelligent est son extension. Cette vision suit l'évolution chronologique récente du concept Industrie 4.0, qui trouve ses racines d'abord dans les systèmes de fabrication avancés et ses connexions avec d'autres processus de l'entreprise. En ce qui concerne la dimension Smart Manufacturing, les principales technologies associées comprennent six objectifs principaux : l'intégration verticale, la virtualisation, l'automatisation, la traçabilité, la flexibilité et la gestion de l'énergie, et seront abordées dans la section état de l'art.

Finalement, il convient également de mentionner que la chaîne d'approvisionnement intelligente s'est concentrée sur la connexion du système de fabrication avec la chaîne d'approvisionnement et est donc concernée par l'intégration horizontale, tandis que le l'emploi intelligent fournit un support pour différents besoins du système de production de l'Industrie 4.0 et se concentre sur l'intégration du travailleur dans le système de fabrication intelligente. A cet effet, l'environnement de travail intelligent a deux dimensions. La première dimension envisage d'accompagner les travailleurs vis-à-vis l'intégration de nouvelles technologies et de les aider dans les tâches de maintenance et d'exploitation. La deuxième dimension est fortement liée à l'intégration de la fabrication intelligente et s'intéresse à supporter les ingénieurs de production dans l'exploitation du nouveau système de fabrication.

3.3 Projection des concepts de l'industrie 4.0 au cycle de vie du produit et positionnement de la problématique de recherche

Sur la base de la catégorisation proposée par (Frank et al., 2019), chaque dimension pourrait être associée à une phase du cycle de vie du produit d'un point de vue technique. Comme le montre la **Figure 3**, l'intégration des aspects de l'Industrie 4.0 dans les entreprises de fabrication est associée aux différentes phases du cycle de vie du produit. L'objectif de cette figure est de mettre en évidence notre intérêt pour **la dimension Fabrication** et donc de clarifier **notre positionnement de recherche axé sur la numérisation des systèmes de fabrication dans le contexte de l'industrie 4.0 et notamment en termes de transformation digitale des entreprises**. L'aspect Smart Product concerne principalement la phase de conception en adaptant le Product-Service-Systems (PSS) comme modèle de conception. Ce

modèle est basé sur l'intégration des capteurs et des logiciels au produit dans la perspective d'intégrer le concept d'orientation service aux produits connectés. Le Smart Working Environment concerne essentiellement la phase d'industrialisation du cycle de vie du produit, en intégrant des outils innovants de support aux opérateurs et en assistant les ingénieurs de production dans les tâches de la production et de la planification. L'aspect Systèmes de Production Intelligents concerne directement la phase de fabrication, et représente l'objectif principal de ces travaux de recherche qui seront discutés dans la section suivante. Le système de production intelligent ou le système de fabrication flexible concerne principalement la flexibilité et l'intégration verticale. Enfin, la Smart Supply Chain est associée aux services liés au produit sur l'ensemble de la chaîne de valeur concernée principalement par l'intégration horizontale.

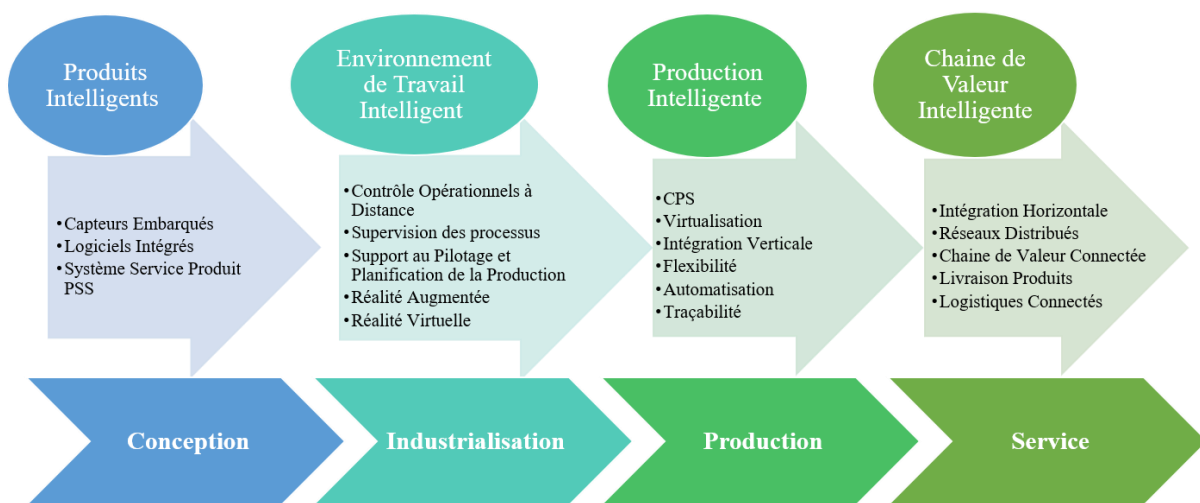


Fig. 3 Projection de l'intégration des principes de l'Industrie 4.0 dans les entreprises de production

En synthèse, nos travaux de recherche portent sur l'intégration des concepts et technologies 4.0 dans les systèmes de fabrication. A cet effet, nous sommes amenés à développer un modèle d'aide à la décision pour aider les entreprises dans la numérisation des systèmes de fabrication dans le but d'améliorer la flexibilité et la performance des systèmes et processus de production, ainsi que la qualité du produit grâce aux données générées et à leur exploitation.

3.4 Problématique, la question de la recherche

Les entreprises de production peuvent se concentrer sur les différents besoins qu'elles peuvent avoir lorsqu'elles accordent la priorité à la mise en œuvre des technologies de fabrication intelligente susmentionnées afin d'atteindre un niveau de maturité compatibles avec l'Industrie 4.0.

Cela suggère que les technologies de fabrication intelligentes peuvent être interdépendantes et créer une synergie active pour l'industrie 4.0. Cette intégration synergique « Smart Manufacturing » soutenues par l'intégration technologiques comme outils de la 'numérisation' s'insère potentiellement dans la

configuration et l'évolution fonctionnelle des 'processus de production', ce qui produit un effet direct à l'évolution de l'architecture du système de fabrication. Les nouveaux systèmes de fabrication sont en mesure d'ajuster leurs capacités de production et d'utiliser des fonctionnalités avancées. La flexibilité des systèmes de fabrication s'applique non seulement aux composants matériels d'une usine tels que les robots et les machines, mais également à son infrastructure des technologies de l'information et de la communication (ICT) composée de ressources de calcul, de stockage et de réseaux.

L'IoT aboutit aux systèmes cyber-physiques CPS qui consiste à intégrer des objets physiques de l'usine avec la dimension virtuelle de l'usine, y compris les données intégrées, l'intelligence artificielle et la simulation. Par conséquent, les entreprises manufacturières qui visent un niveau de maturité plus élevé de l'Industrie 4.0 devraient adopter systématiquement la plupart des technologies de fabrication intelligente, car ces technologies sont interdépendantes. L'adoption de cette technologie avancée aboutit à son tour à la génération de données, qui une fois traitées, contribuent à améliorer et optimiser les processus de production.

Cette analyse nous conduit à définir le positionnement de notre problématique de recherche **Quel modèle pour une transition réussie vers la numérisation des systèmes de fabrication 4.0 ?** qui se situe au croisement de trois domaines définis par la **Figure 4**, la 'numérisation', le 'système de fabrication', et les 'processus de production'. L'évolution du système de fabrication dans le contexte de l'Industrie 4.0 est considérée comme le point de départ pour répondre à la question de recherche identifiée. Cette évolution devra tout d'abord prendre en considération la situation actuelle du système de fabrication pour établir par la suite sa transition numérique en lui assurant des fonctionnalités avancées. La numérisation se figure dans les outils technologiques proposés par l'Industrie 4.0 pour appliquer les fonctionnalités visées au système de production. Les fonctionnalités et les technologies avancées intégrées dans le système de production s'imbriquent apparemment dans l'évolution et la numérisation des différents processus de production dans l'objectif d'améliorer leur performance.

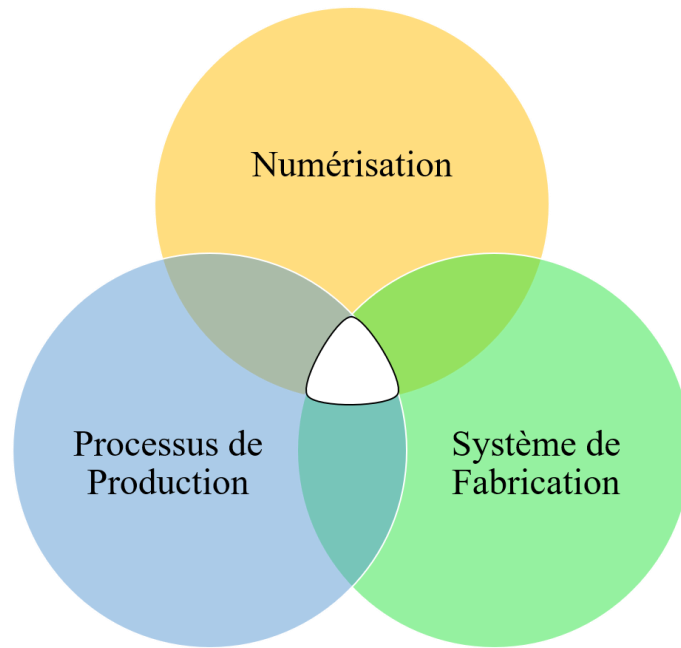


Fig. 4 Positionnement de la problématique de recherche

La définition de ces trois dimensions nous aide à orienter notre direction de recherche afin de répondre à la problématique identifiée. A ce stade, notre démarche consiste à dresser un état de l'art élargi afin d'identifier les concepts fondamentaux nécessaires à la construction d'un modèle de système de production 4.0 dans l'objectif de guider les entreprises dans la transition numérique des systèmes de production. Ces concepts de natures différentes mais complémentaires devraient s'imbriquer, s'interfacier et s'interconnecter afin de créer un système cohérent productif et assez détaillé pour un déploiement pragmatique. Le modèle proposé sera accompagné par un Framework de transition numérique des systèmes de production comme outil de support visant à guider l'intégration numérique 4.0 dans les systèmes de production existants.

4. La numérisation des systèmes de fabrication dans le contexte de l'industrie 4.0 – Etat de l'Art

Les défis auxquels est confrontée l'intégration des technologies 4.0 dans les systèmes de fabrication peuvent être classés en deux dimensions principales, la dimension stratégique et la dimension technique. La première dimension concerne la stratégie et la perspective d'évolution de l'entreprise en ce qui concerne ses activités principales. Les technologies 4.0 et la numérisation poussent considérablement les entreprises à s'adapter au marché saturé et mondialisé, où la production en quantité « production de masse » n'est plus adaptée à la demande de plus en plus individualisée « personnalisation de masse ». Face à ce problème, la réactivité et l'adaptabilité des systèmes de production sont des atouts majeurs face à ce type de demande (Erol and Schumacher, 2016). Ainsi, l'évolution des systèmes de production devient nécessaire et impérative afin de s'adapter aux défis commerciaux. Par conséquent, des défis techniques se posent, plusieurs travaux ont indiqué que les investissements élevés, la complexité, le savoir-faire requis ainsi que l'inadéquation de l'infrastructure informatique existante et des technologies perturbent l'intégration verticale et horizontale. Ces défis nous conduisent à vérifier la capacité des systèmes de fabrication existants à s'adapter à la numérisation en tenant compte de son architecture et de son infrastructure informatique.

La section suivante est consacrée au classement des enjeux liés à l'intégration de la technologie 4.0 dans les systèmes de fabrication qui s'imbriquent dans la dimension de 'l'intégration verticale'. Ce classement prend en considération les trois domaines identifiés dans le chapitre précédent 'Système de Production', 'Numérisation' et 'Processus de Production' afin de répondre à notre problématique de recherche. Les concepts principaux identifiés dans la section 4.1 précisent la flexibilité, la modularité, les technologies de l'information et des communications (ICT), et l'intégration verticale sont présentés respectivement dans les sections qui suivent. Ensuite, une analyse bibliographique des architectures et modèles récentes proposées dans la littérature sera menée dans la section 4.5. Finalement, la section 4.6 apporte une synthèse de positionnement par rapport à l'état de l'art.

4.1 Intégration vertical dans le contexte de l'industrie 4.0

Les résultats détaillés de l'état de l'art concernant les défis stratégiques et techniques nous ont conduit à identifier les concepts principaux de l'évolution des systèmes de fabrication dans le contexte de l'Industrie 4.0. Ces concepts s'agissent d'une superposition de principes et de briques technologiques qui concernent les différents domaines affectés par la numérisation des systèmes de production comme le montre la **Figure 5**.

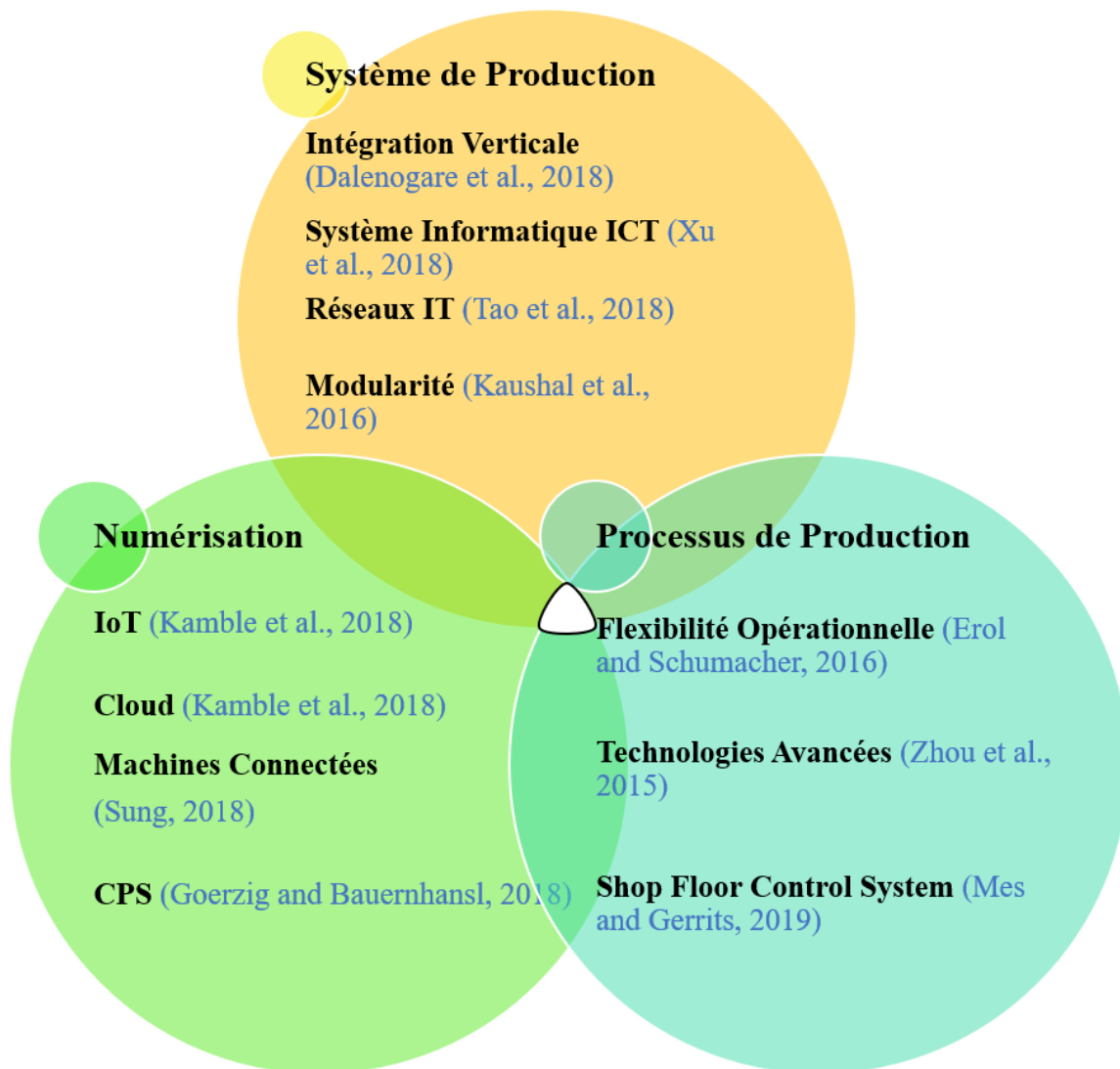


Fig. 5 Concepts principaux de la numérisation des systèmes de production

En fait, la diversité des défis et problématiques d'intégration identifiées, nous ont incité à entreprendre un travail de synthèse et de classification. La **Figure 6** classe les défis identifiés ci-dessus et les attribue à un sujet central, en considérant la dimension de l'intégration verticale comme l'enjeu principal de la transition numérique des systèmes de production. Tout d'abord, les ICT et le système informatique de production sont une dimension essentielle identifiée dans la littérature, considérés comme un principal frein aux évolutions nécessaires pour s'adapter à la nouvelle configuration du système de fabrication numérique (Xu et al., 2018a). Parallèlement, la conception du système informatique porte un autre défi, en particulier lorsqu'il s'agit de faire face aux technologies de pointe, de mettre en œuvre des services spécifiques dans le système de fabrication (Bodrow, 2017) ou encore d'adapter le cloud computing pour améliorer l'analyse des données (Kamble, 2018). Deuxièmement, la modularité des systèmes de fabrication est un autre défi majeur identifié par (Kaushal et al., 2016). Le concept de modularité comprend plusieurs aspects tels que le développement des CPS et leur intégration dans le système de fabrication (Goerzig and Bauernhansl, 2018) ainsi que le déploiement de la modularité dans le système

de contrôle de l'atelier SFCS (Mes and Gerrits, 2019). Troisièmement, le système de fabrication flexible dans le contexte de l'industrie 4.0 est un défi majeur (Theorin et al., 2017), qui comprend la question de la mise en œuvre des technologies avancées (Zhou et al., 2015), le déploiement des opérations flexibles en atelier (Erol and Schumacher, 2016) et la configuration des machines connectées. Enfin, ces divers défis clés pourraient tous être classés dans le périmètre de l'intégration verticale (Dalenogare et al., 2018), qui concerne en outre la dimension infrastructure informatique (Rojko, 2017), la mise en œuvre de l'IoT (Kamble et al., 2018), ainsi que les problématiques d'intégration de données (Rüßmann et al., 2015).

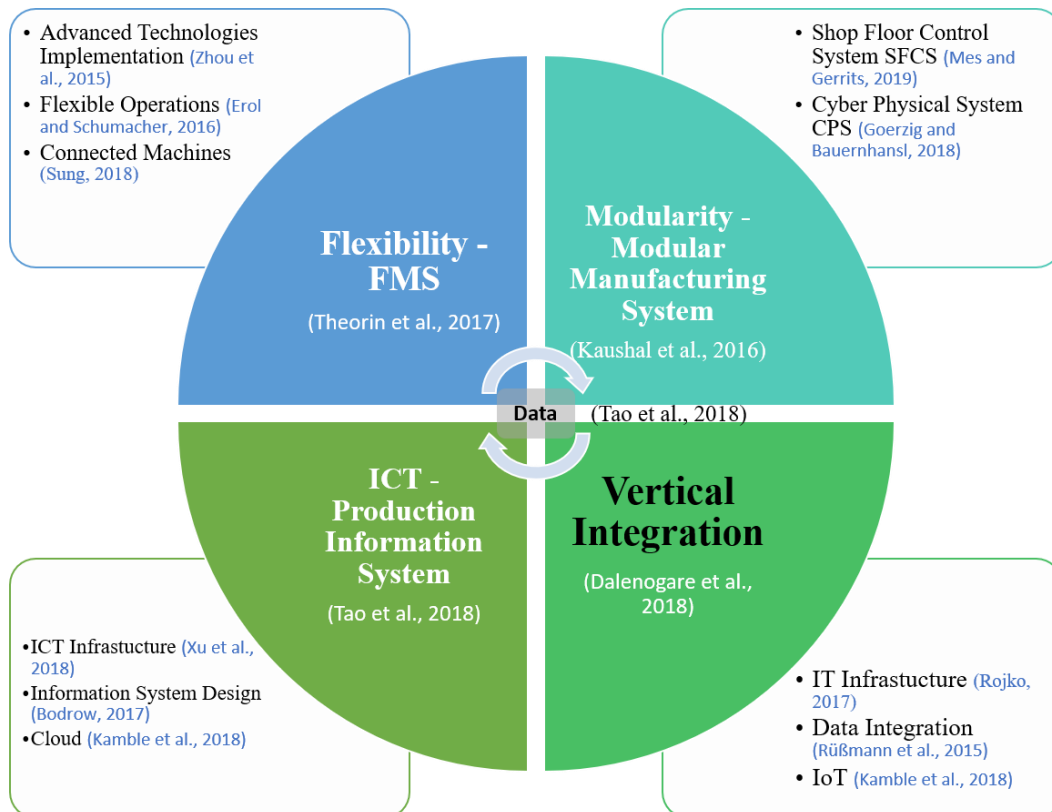


Fig. 6 Cadre des défis d'intégration de l'industrie 4.0 dans les systèmes de fabrication

Suite à cette analyse des concepts et des défis de la numérisation des systèmes de production, nous proposons dans la section suivante un état de l'art dédié aux concepts de la flexibilité et de la modularité. Dans la section 3, nous passons en revue le système de contrôle de l'atelier et la structure ICT traditionnelle. L'intégration verticale en faveur des fonctionnalités 4.0 est présentée dans la section 4.

4.2 Revue de la flexibilité et de la modularité dans le contexte de l'Industrie 4.0

Face à la demande de plus en plus individualisée « personnalisation de masse », la réactivité et l'adaptabilité des systèmes de production est un atout majeur pour répondre aux fluctuations de la demande (Erol and Schumacher, 2016).

Plusieurs recherches conventionnelles ont été menées dans le cadre de la personnalisation du produit notamment sur le principe de la reconfiguration des plans de production avant l'émergence de l'Industrie 4.0. (Schierholt, 2001) a identifié le concept de reconfiguration de processus qui vise à simplifier la génération de plan de production pour une nouvelle variante de produit. A cet effet, Schierholt (Schierholt, 2001) a identifié deux principes pour les systèmes de reconfiguration des plans de production : la reconfiguration interactive et la configuration basée sur l'automatisation. (Zheng et al., 2008) ont proposé un « Systematic Knowledge Model » pour plusieurs variantes de produits et ont appliqué une méthode de reconfiguration rapide par l'application de règles standards pour la reconfiguration. Une approche basée sur « Tree Unification » est proposée par (Zhang and Rodrigues, 2009) pour développer des plans génériques à partir des données de production en lien avec des familles de produits, ce qui permet aux entreprises de répondre à une diversité de produits personnalisés au moindre coûts et délais.

Alors que, dans le contexte de l'industrie 4.0, une reconfiguration de processus peut être envisagée grâce à la flexibilité des systèmes de production. Cette nouvelle révolution industrielle se caractérise principalement d'une part par des machines de production connectées et interopérables qui sont pilotées intelligemment. Et d'autre part, par de nouvelles fonctionnalités telles que la flexibilité, la prédiction, la modularité et la personnalisation de masse des produits. En d'autres termes, l'industrie 4.0 facilite la reconfiguration des processus afin de fabriquer des produits de plus en plus individualisés avec un délai de mise sur le marché court et conformes à la qualité requise. Beaucoup pourrait être économisé dans la reconfiguration et la réutilisation des équipements de production ou encore des changements dynamiques du produit selon (Schlapfer et al., 2015).

Cependant, plusieurs travaux de recherche sont en cours afin d'introduire des solutions rapides, efficaces et rentables en vue d'améliorer la fabrication flexible dans les lignes de production existantes. Basé sur des technologies de l'industrie 4.0 telles que ; le Big Data et l'analyse, les systèmes robotiques autonomes, le cloud computing, l'Internet des objets industriel, la simulation et le prototypage, la fabrication additive, la réalité augmentée, l'Intégration horizontale et verticale et la cybersécurité (Rüßmann et al., 2015), le système de fabrication peut accroître la flexibilité des processus de fabrication (Kamble et al., 2018).

D'un autre côté, (Mes and Gerrits, 2019) ont abordé le fait que les systèmes de contrôle hiérarchiques ne sont pas en adéquation avec le besoin de produire une gamme diversifiée. Par conséquent, des concepts de fabrication flexibles et reconfigurables ont été introduits sur le principe de modules de commande autonomes et intelligents. Ces modules interagissent dynamiquement les uns avec les autres pour atteindre des objectifs de performance. Certains industriels comme ABB (Bloch et al., 2018) ont commencé à développer ce que l'on appelle le Modular Type Package (MTP), une initiative visant à

modifier l'infrastructure du processus de contrôle dans l'atelier, ouvrant la voie au concept « Small Automation » tel que défini par (Strategy&, 2015). Selon (Mourtzis et al., 2016) la planification des processus assistée par ordinateur (CAPP) doit prendre en compte des variantes de produit personnalisées dans un environnement de fabrication dynamique, plutôt que de fonctionner indépendamment des données de production de l'atelier et de souffrir du manque d'interfaçage avec les systèmes informatiques. En revanche, ils ont proposé un système orienté services basé sur le cloud computing pour faciliter la collaboration en temps réel entre la planification adaptative et l'exécution des processus en tenant compte de la disponibilité des machines.

La flexibilité des machines de production et la modularité des opérations de fabrication sont deux concepts indissociables pour réaliser de nouvelles fonctionnalités en termes de production flexible. Le FMS est une exigence préalable à la mise en œuvre d'un processus modulaire d'opérations de fabrication. Cela signifie que les machines fonctionneront indépendamment ou en coordination avec les humains pour fabriquer des produits orientés client (Sung, 2018). Afin d'atteindre ces objectifs dans l'industrie, une attention particulière doit être accordée à plusieurs niveaux de fabrication, en particulier les machines (outils et équipements d'atelier) et les systèmes de contrôle et d'exécution de la fabrication.

4.3 L'Evolution de Technologies de L'information et des Communications (ICT) et la structure hiérarchique traditionnelle

Les technologies de l'information et des communications (ICT) mettent l'accent sur le rôle des communications, des ordinateurs, des logiciels, du stockage et les plateformes numériques d'échange entre les différents acteurs afin d'exploiter et agir sur les informations. La structure traditionnelle des ICT dans les systèmes de production conventionnels est présentée par la pyramide CIM de fabrication intégrée par ordinateur **Fig. 7**.

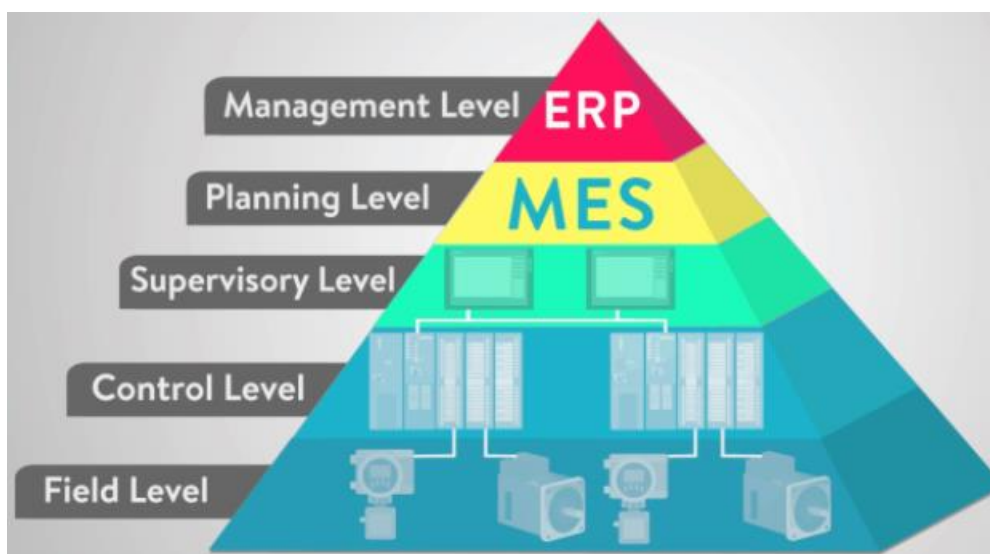


Fig. 7 Pyramide CIM

Au niveau de la gestion de l'entreprise, les commandes sont traitées dans le système ERP en termes de planification des ressources d'entreprise, de planification des activités, de gestion de la chaîne d'approvisionnement, des ventes et distribution et enfin en termes de comptabilité et de gestion des ressources humaines. Dans les outils ERP traditionnels, le processus de décision est centralisé au plus haut niveau de la pyramide d'automatisation. La plupart des solutions ERP disponibles ne prennent pas en charge une adaptation rapide dans la planification de la production en raison d'événements imprévus (Rojko, 2017).

Au deuxième niveau de la pyramide, le système d'exécution de la fabrication reçoit les ordres de fabrication et transmet à son tour les commandes à la couche API / contrôleurs pour exécuter le programme de production respectif d'un certain produit, exploitant ainsi les lignes de production et les machines. Le MES a plusieurs fonctionnalités, y compris le reporting de production, l'ordonnancement, la répartition, le suivi des produits, l'historisation, les opérations de maintenance, l'analyse des performances, et il couvre des aspects tels que la gestion de l'atelier et la communication avec les systèmes (commerciaux) de l'entreprise (Santos et al., 2017). Cette structure hiérarchique traditionnelle souffre de nombreuses limitations en ce qui concerne la flexibilité, l'évolution de l'environnement de production, la dynamique du flux de commandes des clients et l'objectif de personnalisation de masse, car de nombreuses solutions MES existantes ne sont pas distribuées aux éléments de l'atelier et ont une architecture centralisée (Rojko, 2017). Par ailleurs, l'acquisition de données est localisée au niveau des automates programmables, des contrôleurs de robot et les microcontrôleurs.

Dans le cas d'une production entièrement automatisée, la flexibilité est un des défis considérables au niveau du contrôleur. En effet, une fois le processus figé dans la couche API de l'interface de programmation d'application, seule la reprogrammation des contrôleurs permet d'utiliser l'atelier pour une autre tâche que celle déjà active. Pour chaque nouveau produit, il sera nécessaire de créer et de redévelopper un nouveau programme, permettant de fabriquer un autre produit plutôt que l'ancien. Cette situation représente l'architecture industrielle conventionnelle. (Karnouskos et al., 2010) ont affirmé que la communication et la mise en réseau pour l'échange de données entre les appareils et les services, y compris les capteurs, les appareils, les contrôleurs PLC, le MES et l'ERP, doivent être adaptés pour une production dynamique au sein de l'Industrie 4.0. Selon (Theorin, 2012), les entreprises de fabrication doivent reconfigurer les usines de production dans un court laps de temps, et par conséquent, des dispositifs d'automatisation flexibles et adaptables - capables d'être faciles à intégrer, configurer, étendre et réutiliser - sont nécessaires. Lorsque les tâches de contrôle deviennent de plus en plus complexes, les systèmes de contrôle souffrent d'un manque de flux d'informations bien structurés entre la planification des processus et leur mise en œuvre en raison du faible niveau d'implémentation des méthodes de programmation spécifiques au fournisseur (Ollinger et al., 2014) qui peut générer un effort de réingénierie des programmes de contrôle (Theorin, 2012).

Le dernier niveau de la pyramide d'automatisation est le niveau machines. Contrairement aux deux couches supérieures, ce niveau dispose d'un contrôle naturellement indépendant (Rojko, 2017). D'un autre côté et répondant aux initiatives de production flexibles, les machines doivent fonctionner indépendamment ou en coordination avec les humains pour produire une fabrication orientée client. De ce fait, la configuration de la machine doit être adaptée afin d'évoluer vers une entité indépendante capable de collecter des données, de les analyser et de les interpréter (Sung, 2018).

Dans la continuité, l'industrie 4.0 est principalement représentée par le CPS, l'IoT et le cloud computing (Henning et al., 2013; Hermann et al., 2016; Jasperneite, 2012; Lasi et al., 2014; Moeuf, 2018). L'IoT est le principal catalyseur des systèmes de fabrication avancés tels que le cloud computing, de même, il est un support principal pour le développement d'usines intelligentes (Thames and Schaefer, 2016). Le CPS permet un niveau plus élevé d'intégration et de coordination entre les éléments physiques et informatiques (Gürdür et al., 2016). Les recherches indiquent qu'avec l'introduction du CPS, les machines pourront communiquer entre elles en s'appuyant sur des systèmes de contrôle décentralisés et donc contribuer à l'optimisation de la production. L'industrie 4.0 comprend généralement de nombreux composants complexes et a de larges applications dans de nombreux secteurs industriels (Xu et al., 2018b).

4.4 Intégration verticale et fonctionnalités de l'industrie 4.0

(Frank et al., 2019) ont subdivisé les technologies liées à la dimension Smart Manufacturing en six objectifs principaux : intégration verticale, virtualisation, automatisation, traçabilité, flexibilité et gestion de l'énergie.

L'intégration verticale de l'usine comprend des systèmes (ICT) avancés qui intègrent tous les niveaux hiérarchiques de l'entreprise - de l'atelier aux niveaux intermédiaire et supérieur - aidant les actions de prise de décision à être moins dépendantes de l'intervention humaine. Pour atteindre l'intégration verticale, la première étape niveau atelier est la numérisation de tous les objets et paramètres physiques avec des capteurs, des actionneurs et des automates programmables. Les données sont ensuite collectées par le contrôle de supervision et l'acquisition de données (SCADA), afin de piloter la production et le diagnostic en atelier. Au niveau de la gestion des informations, Le Manufacturing Execution System MES obtient des données de SCADA, fournissant le statut de la production au système ERP. Lorsque tous les systèmes sont correctement intégrés, les informations sur les ordres de fabrication circulent également en sens inverse (en aval), de l'ERP au MES puis au SCADA, aidant à établir un lien transparent entre les ressources de l'entreprise et le management des ordres de fabrication. Par conséquent, l'intégration verticale offre plus de transparence et de contrôle du processus de production et contribue à améliorer la prise de décision en atelier. Le Smart Manufacturing intègre des machines en réseau dans l'atelier via une communication de machine à machine (M2M), ce qui contribue à améliorer

l'adaptabilité à différents types de produits. Le M2M consiste en un système de communication avec interopérabilité, qui rend les machines capables de se comprendre, facilitant leur adaptation dans les lignes de fabrication.

Cette capacité est prise en charge par la mise en service d'un émulateur virtuel, qui émule les différents codes PLC des machines et valide les procédures de configuration, évitant ainsi les temps d'arrêt prolongés dus à la longue configuration de l'équipement. Cette simulation est plus performante avec la fabrication numérique, qui, outre les codes PLC, considère également les données de tous les objets virtualisés de l'atelier, puis simule les processus des opérations, en tenant compte de plusieurs paramètres pouvant affecter la production. La fabrication intelligente favorise également une robotisation améliorée. En effet, les robots peuvent effectuer des tâches avec plus de précision que par le passé, augmentant la productivité tout en étant beaucoup moins sujets à la fatigue.

De plus, l'intelligence artificielle prend en charge la production 4.0 de plusieurs manières. Dans les machines, des outils analytiques avancés peuvent analyser les données collectées à partir de capteurs pour surveiller et prévoir les pannes des machines, les surcharges ou tout autre problème. Cela ouvre la voie à une maintenance prédictive qui permet d'éviter les temps d'arrêt dus à des pannes inattendues pendant le processus de production. Les machines dotées d'une intelligence artificielle peuvent également identifier automatiquement les non-conformités des produits dans les premières étapes du processus de production, augmentant ainsi le contrôle qualité et réduisant les coûts de production. En outre, l'intelligence artificielle complète également des systèmes comme l'ERP, prévoyant les demandes de production à long terme et les transformant en commandes de production quotidiennes, en tenant compte des commandes de dernière minute et des restrictions d'exploitation.

Concernant la traçabilité interne, des capteurs sont intégrés aux matières premières et aux produits finis dans l'entrepôt de l'usine. La traçabilité interne peut soutenir des systèmes adaptables avec des lignes flexibles, dans lesquelles les machines lisent les exigences des produits dans les capteurs embarqués et effectuent les actions nécessaires à leur fabrication. Les lignes flexibles peuvent également comprendre des machines modulaires qui sont facilement connectées à une ligne de fabrication avec une configuration minimale. Cela permet la production de différents types de produits en petits lots, avec une perte de productivité minimale. Enfin, pour améliorer l'efficacité de l'usine, la fabrication intelligente comprend également la gestion de l'énergie (surveillance et amélioration de l'efficacité énergétique). La surveillance de l'efficacité repose sur la collecte de données de la consommation d'énergie dans les réseaux électriques, tandis que son amélioration est obtenue grâce à des systèmes intelligents de gestion de l'énergie qui planifient des étapes intensives de production à des moments où les tarifs d'électricité sont favorables, par exemple.

Pour résumer, (Lin et al., 2019) ont évoqué l'importance d'améliorer les systèmes de fabrication pour faire face aux événements externes imprévisibles et à la complexité interne, en particulier lorsque le système de contrôle hiérarchique traditionnel est centralisé, rigide et incapable d'agir rapidement pour répondre aux changements et les dysfonctionnements. Quatre éléments clés sont identifiés par (Lin et al., 2019) pour l'évolution des systèmes de fabrication comme représenté par la **Fig. 8**: Agilité pour la gestion des événements imprévus, Adaptabilité pour la diversité des produits, Efficacité pour l'optimisation des processus et Réorganisation pour créer de nouvelles fonctionnalités.

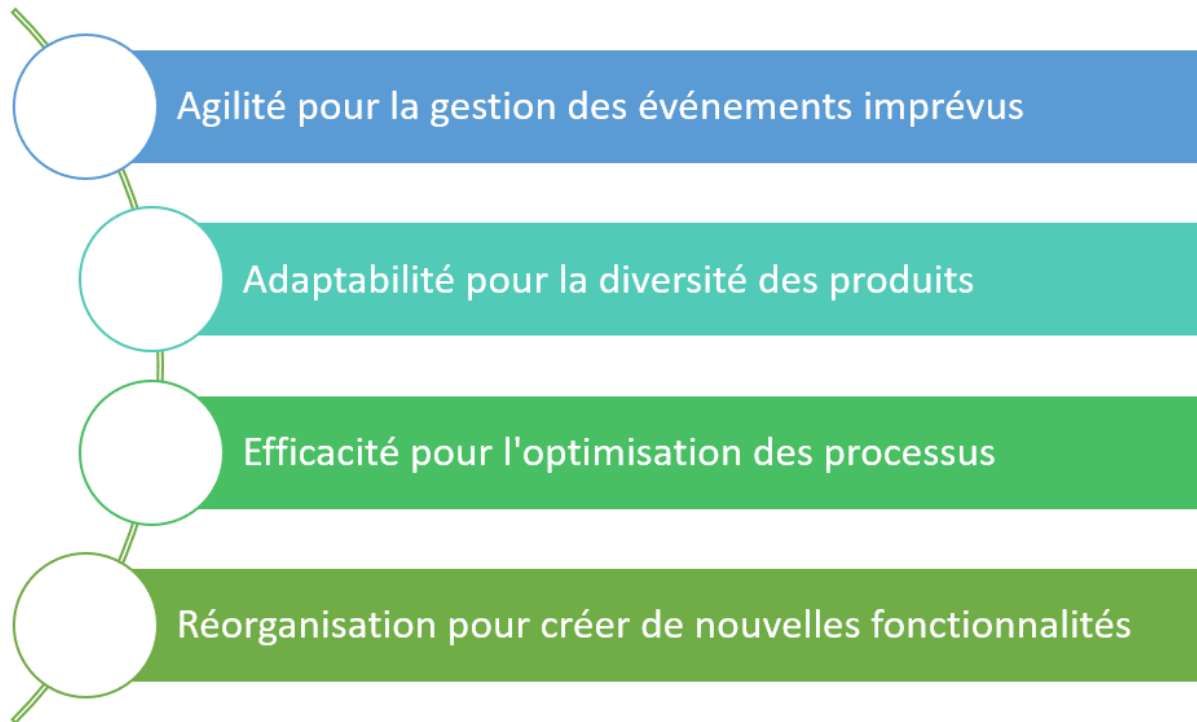


Fig. 8 Éléments clés pour l'évolution des systèmes de fabrication (Lin et al., 2019)

4.5 Analyse des architectures 4.0 existantes

Dans l'analyse bibliographique de ce chapitre, nous évoquons quelques architectures innovantes dans la littérature qui ont été présentées dans le document de thèse principal afin de répondre aux attentes de l'industrie 4.0. L'objectif de l'analyse des architectures 4.0 existantes est de définir un positionnement original par rapport à l'état de l'art qui nous mène par la suite à identifier notre hypothèse de recherche.

(Lin et al., 2019) ont proposé une architecture de contrôle de fabrication cyber-physique, prenant en considération les faiblesses de la pyramide CIM traditionnelle en termes de limitations et de complexité en ce qui concerne la reconfiguration de la ligne de production via le MES, et le manque de mise à jour en temps réel entre le système ERP et le MES s'agissant de l'état de la production. Par conséquent, une autre architecture a été proposée basée sur la transformation de machines en entités CPS avec des capteurs embarqués, connectées entre elles et communiquant directement avec une plateforme cloud /

fog computing jouant le rôle de gestion des opérations. Les microcontrôleurs industriels MCU ont été utilisés pour contrôler les machines et interagir entre elles avec la plateforme cloud. Ce système a la capacité d'auto-prédire et d'auto-diagnostiquer les données traitées à l'aide de techniques d'apprentissage via le cloud.

De même pour la plateforme cloud du modèle mentionné, (Bonnard et al., 2019) a proposé une plateforme de big data / analytics pour la mise en œuvre de l'Industrie 4.0 dans les PME. Cette architecture consiste à utiliser une interface de programmation (API ou API web) qui respecte les contraintes d'architecture REST (Representational State Transfer) collectant des données à partir des objets connectés, d'automates, de SCADA, de MES et d'ERP conçus dans une architecture orientée services, publiés via une interface Web ou une application mobile et connectée à une base de données MySQL. La plateforme prend en charge plusieurs protocoles permettant la communication avec différentes entités de l'atelier telles que OPC-UA, Modbus ou Profibus, la communication sans fil ou Ethernet. Les données collectées seront stockées sur une machine locale afin d'être ensuite envoyées via API REST vers le serveur cloud. La plateforme offre la possibilité de traitement de données par l'IA analytique et les algorithmes génétiques, ce qui permet un soutien aux décisions.

(Zdravković et al., 2018) ont principalement abordé la dynamique du système et la dynamique de l'environnement en utilisant une automatisation intelligente où les ressources de production sont capables de prendre des décisions afin d'optimiser l'exécution du processus. Par conséquent, le système IoT de l'atelier pourrait fournir des moyens plus agiles de configuration du système de production. La communication entre les machines basée sur des agents utilitaires en tant que centres de travail dans un système multi-agents holonique, conduit à améliorer le processus de prise de décision.

(Block et al., 2018) ont introduit une approche PPC de planification et de contrôle de la production, basée sur le concept d'utilisation de CPS connectés, collectant des données lorsqu'aucune base de données centrale n'est requise, partageant des informations avec d'autres CPS et contenant un modèle de l'objet physique considéré. Les Données de simulation de fabrication de base CMSD sont utilisées par (Block et al., 2018) pour l'échange de données et lié à AutomationML afin d'assurer la communication avec les processus de niveau supérieur et le MES. Les CPS décentralisés sont considérés comme un niveau de calcul de périphérie puisque toutes les données sont traitées et simulées sur la machine CPS. Enfin, un PPC événementiel est déployé dans une station centrale pour encapsuler des unités dans une architecture SOA orientée services.

En plus, plusieurs études de recherche considèrent la dimension management des feuilles de route génériques de transition numérique dans les entreprises. Nous citons (Kamble et al., 2018) qui ont proposé un Framework de l'industrie 4.0 construit avec trois composants, les technologies de l'industrie

4.0, l'intégration des processus et les résultats de cette intégration. En se basant sur une revue approfondie, ce Framework a été proposé compte tenu des installations promises des technologies de l'industrie 4.0 et de sa capacité pour intégrer les processus et les activités de l'entreprise, dans l'objectif de rendre le système de fabrication plus flexible, économique et respectueux de l'environnement.

Un modèle en trois étapes pour la transformation de l'Industrie 4.0 « Envision, Enable, Enact » est proposé par (Erol and Schumacher, 2016). L'objectif principal du modèle est de guider les entreprises dans le développement de leurs objectifs spécifiques ainsi que d'un ensemble de mesures pour atteindre leur vision et leur feuille de route spécifiques. (Ghobakhloo, 2018) propose une feuille de route stratégique pour la transition Industrie 4.0, prenant en compte l'ensemble de la chaîne d'approvisionnement et de valeur de l'entreprise, sous forme de recommandations visant à faciliter la transition vers l'Industrie 4.0

Cependant, notre démarche qui sera contextualisée à travers l'hypothèse proposée prend en considération l'état actuel du système de production proche d'un fonctionnement 3.0 et essaye d'aboutir une démarche innovante qui figure dans la proposition d'un modèle suivi d'un Framework de la transition numérique des systèmes de fabrication tout en s'appuyant sur l'architecture existante du système de production.

4.6 Synthèse de positionnement par rapport à l'état de l'art

La recherche menée ci-dessus porte principalement sur le développement de modèles de transition des systèmes de production conventionnelle vers des systèmes de production numérisée où l'analyse des données collectées et la reconfigurabilité des lignes de production peuvent accroître sensiblement les performances opérationnelles. L'évolution des systèmes de production repose sur l'intégration verticale des technologies 4.0 et produisent de nouvelles fonctionnalités telles que la flexibilité, la modularité, la reconfiguration, l'interopérabilité et l'intelligence. L'architecture des systèmes de fabrication avancés est complexe, hétérogène, dynamique et indéfinie. La modélisation et la conception de ces systèmes doivent se caractériser par des attributs tels que l'interopérabilité, la flexibilité, la décentralisation et l'abstraction. Un système de fabrication avancé peut être basé sur une combinaison de plusieurs architectures. Certains sont considérés comme des approches de modélisation telles que SOA et « Manufacturing as a Service (MaaS) » et d'autres sont des architectures telles que « Industrial Internet of Things (IIoT) » et CPS. Les approches de modélisation et l'architecture peuvent être combinées puisque le paradigme de modélisation est choisi pour le système de contrôle en fonction du type et des objectifs de l'application de production, puis le système de fabrication doit être conçu à travers une architecture dédiée (Borangiu et al., 2019).

La problématique dynamique de la structure verticale traditionnelle et de la pyramide d'automatisation est notre principale préoccupation. Sur la base de ce qui a été discuté, l'évolution des systèmes de production vers une approche 4.0 est fortement dépendante de l'intégration verticale. Deux facteurs clés doivent être pris en compte pour atteindre l'objectif d'une transition numérique. **Le premier est un facteur de flexibilité** identifié par (Lin et al., 2019). Un système de production doit être capable de s'adapter aux nouvelles commandes (sous la capacité de l'usine) et de répondre rapidement aux fluctuations de la demande et du workflow tout en assurant la personnalisation de masse. **Le deuxième facteur** identifié par (Sung, 2018) **concerne la gestion des données**. Un système de production doit être capable d'exploiter les données collectées à partir des machines, des capteurs, des pannes et des données historiques, afin d'apprendre et d'auto-optimiser ses processus de production.

Grâce à la dimension « données », dans le contexte de l'Industrie 4.0, les systèmes de fabrication gagnent en niveau d'intelligence. La fabrication intelligente vise à convertir les données acquises tout au long du cycle de vie du produit en intelligence de fabrication afin d'optimiser la fabrication de différents points de vue (Tao et al., 2018). Nous citons, l'amélioration des performances de production, l'amélioration de la sécurité des travailleurs et des machines, l'amélioration la qualité des produits et la facilitation de développement de produits intelligents. De ce fait, les industriels doivent d'abord traiter une grande quantité de données générées tout au long du cycle de vie du produit, y compris les images d'inspection visuelle et le traitement du contrôle qualité (Bajic et al., 2018). Deuxièmement, les systèmes de fabrication évolués doivent être capables d'intégrer ces modules flexibles et de les activer par l'intelligence artificielle (IA) de manière aussi peu intrusive que possible.

5. Hypothèse

Après avoir décliné les principes de l'Industrie 4.0 appuyée par un état de l'art détaillée, nous abordons dans ce chapitre une hypothèse qui consiste à dire que la transition vers la digitalisation des systèmes de production obéit à de grandes recommandations qui doivent être contextualisés en fonction de l'état des lieux et des objectifs visés par les entreprises. La section 5.1 introduit notre hypothèse. La section 5.2 présente la démarche suivie pour valider l'hypothèse proposée.

5.1 Hypothèse proposée

L'analyse menée dans le chapitre précédent nous conduit à reprendre et à justifier le positionnement de notre problématique de recherche présentée dans le chapitre 3, **Quel modèle pour une transition réussie vers la numérisation des systèmes de fabrication 4.0 ?** qui se situe au croisement des trois axes suivants ; la 'numérisation', le 'système de fabrication', et les 'processus de production'.

L'agilité offerte par l'industrie 4.0 permet aux usines de gérer une gamme de produits plus diversifiée avec un délai de livraison plus court et de personnaliser rapidement les produits en fonction des exigences spécifiques, garantissant ainsi une plus grande réactivité aux besoins des clients. Alors que l'Industrie 4.0 offre de nouvelles opportunités pour les entreprises, elle soulève dans le même temps de nouveaux défis. Un état de l'art détaillé a été fourni pour définir les principes et les concepts de la numérisation des systèmes de fabrication, et identifier les défis principaux respectives à cette intégration numérique.

Nous constatons dans la littérature que le sujet abordé par cette thèse de doctorat représente une originalité en termes d'actualité et d'importance, ce qui explique la rareté des approches qui s'intéressent à l'évolution des systèmes de production existants vers la transition numérique en considérant le système de production dans son intégralité. Les architectures présentées dans le contexte de l'intégration de l'industrie 4.0 dans les systèmes de production sont innovantes mais en revanche se basent en majorité sur le développement de nouvelles initiatives de transfert de data qui ne sont pas reconnus jusqu'aujourd'hui dans les entreprises et qui exigent des changements radicaux dans les architectures existantes ce qui peut causer des ruptures potentielles dans les sites de production. En outre, un deuxième aspect critique à mentionner au cours de cette analyse concerne les limitations d'une telle proposition d'architecture, comme celle développée par (Block et al., 2018), à des applications dans le « process manufacturing » qui marquent une grande différence avec le domaine de fabrication industrielle.

Le sujet de la numérisation des systèmes de production exige une approche spécifique qui considère l'intégralité du système de production avec ses différentes couches ainsi que son architecture actuelle. Cette approche vise à évoluer le système de production tout en assurant les fonctionnalités attendues par les entreprises.

La question dynamique de la structure verticale traditionnelle de production doit d'abord être capable de s'adapter aux fluctuations de la demande. Deuxièmement, les systèmes de production doivent permettre de collecter les données à partir de machines et de capteurs afin d'apprendre et d'auto-optimiser ses processus. Ainsi, les principaux défis et orientations définis dans l'état de l'art en fonction de notre direction de recherche et de notre intérêt sont la mise en œuvre d'un système de fabrication flexible et modulaire dans le contexte de l'intégration verticale. Par conséquent nous proposons l'hypothèse suivante qui vient répondre à notre problématique de recherche identifiée comme suivant :

L'évolution des systèmes de production vers la numérisation dans le contexte de l'Industrie 4.0 nécessite d'agir sur trois axes principaux : le système de production, y compris le système de contrôle de l'atelier SFCS, les machines et technologies avancées, et enfin le traitement et le déploiement des données.

A cet effet, la **Figure 9** présente les différents axes d'intérêt identifiés par l'hypothèse. Le premier axe « Production System & SFCS » concerne principalement le système informatique de la production, sa capacité et ses exigences à s'adapter à la flexibilité et la modularité attendues. Le système d'information de production comprend l'agilité du réseau informatique ainsi que les plateformes de production numériques telles que MES, ERP et autres logiciels. Cet axe est également concerné par le système de contrôle de l'atelier et sa reconfiguration qui doit répondre aux fluctuations de la demande et permettre un contrôle flexible de la production.

Le deuxième axe « Traitement et déploiement des données » consiste à activer les flux de données dans les sens descendant et ascendant. Après la mise en œuvre des capteurs et de l'IoT, les données doivent être collectées à partir des machines et d'autres ressources pour y être analysées en vue d'une prise de décision et de l'optimisation de la production.

Le troisième axe « Machines et Technologies Avancées » considère principalement l'implémentation de machines connectées, l'intégration de « Cyber Physical Systems (CPS) » et les technologies avancées introduites par l'Industrie 4.0. Cet axe prend en compte la configuration et les exigences des machines dans le cadre de processus de fabrication flexibles et du système de production modulaire.

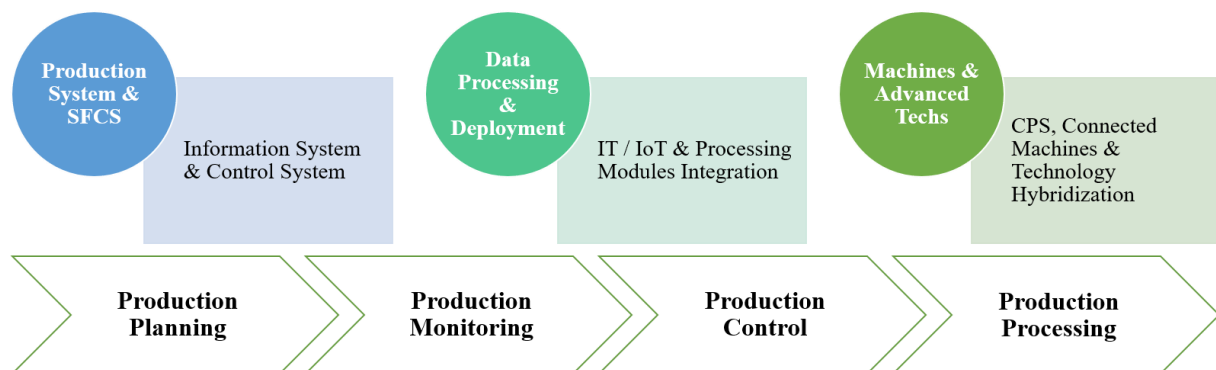


Fig. 9 Axes d'intérêt identifiés par l'hypothèse

L'objectif de cette proposition est de développer une approche scientifique de transition progressive vers la numérisation de la production, offrant ainsi de nouvelles fonctionnalités absentes des modèles de production antérieurs. Il s'agit d'une approche générique destinée à s'adapter à la trajectoire que l'entreprise se fixe sous les contraintes de la performance souhaitée, de l'adoption technologique attendue et de l'évolution visée. En tenant compte de ces trois axes identifiés par l'hypothèse, nous considérons que le modèle qui répond à la transition numérique souhaitée suivi par le Framework d'intégration aura un effet tangible sur l'évolution et l'adaptation de la planification et le pilotage de la production, ainsi que la control et le procesing de la production **Fig. 9**.

5.3 Démarche scientifique de la résolution de l'hypothèse proposée

Notre démarche présentée par la **Figure 10** consiste à proposer un modèle conceptuel se basant sur les principes qui accompagnent l'intégration verticale définis dans la littérature qui répond aux différentes fonctionnalités des systèmes de production numériques. Ensuite, ce modèle conceptuel sera étendu pour être adapté à la situation d'un système de production traditionnel.

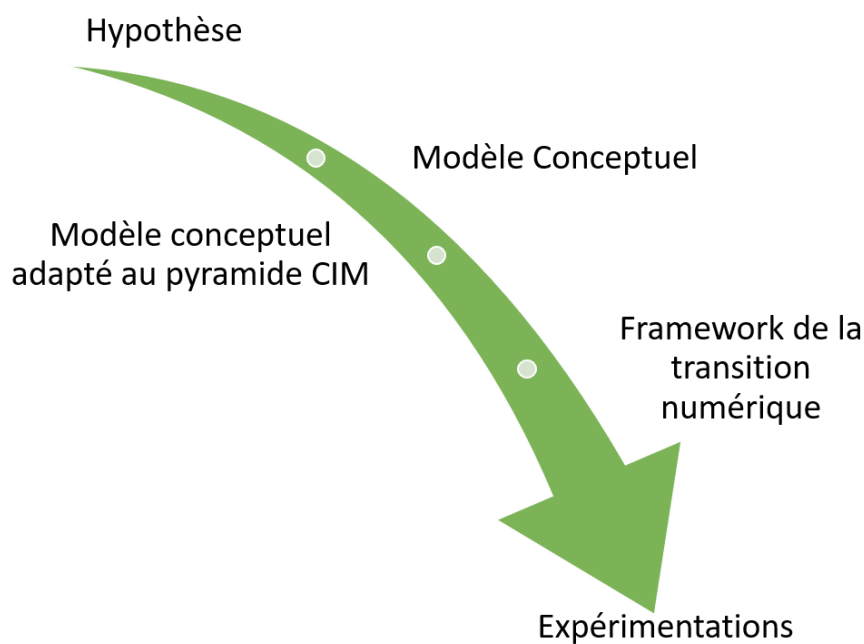


Fig. 10 Démarche scientifique de la résolution de l'hypothèse proposée

Par la suite, et dans le but d'appliquer le modèle conceptuel développé, nous proposons un Framework innovant de la transition numérique des systèmes de fabrication qui prend en considération les différentes dimensions conceptuelles de notre modèle et les transforme en une structure de support détaillée pour déployer l'intégration de l'industrie 4.0 dans les systèmes de production existants.

Enfin, le Framework de la transition numérique sera appliqué à la plateforme industrielle 4.0 introduite dans la section 2.2.2. Les travaux expérimentaux d'intégration seront bien détaillés dans le chapitre 7. A partir du déploiement de la nouvelle architecture système nous proposons par la suite une méthodologie de conception pour la configuration des processus modulaires suivie de l'application de cette approche modulaire dans le système de production. Une application quantitative sera menée finalement sur la flexibilité du système déployé afin d'expérimenter notre démarche scientifique.

En synthèse, l'objectif du Framework proposé est donc de développer un nouveau processus modulaire pour attribuer au système de production de nouvelles fonctionnalités :

- La flexibilité de fabrication
- La modularité du système informatique
- La décentralisation du niveau de décision
- La personnalisation
- La portabilité

Notre approche modulaire consiste à transformer un système de production rigide en un système de production agile par l'introduction de fonctionnalités 4.0 à différents niveaux d'un système de production. Il devient possible alors d'en améliorant la planification, les performances, le pilotage de la production et enfin la flexibilité de traitement de l'information.

6. Modélisation des systèmes de production 4.0

A partir des concepts définis et cités précédemment, (Benfriha, 2020) a proposé une initiative de modélisation du concept de systèmes de production 4.0. Tout d'abord, le modèle est présenté dans son originalité adaptée à une modélisation générale d'un système de production 4.0, en associant les trois axes de l'hypothèse proposée aux différents concepts évoqués par le modèle. Deuxièmement, le modèle sera étendu pour être adapté à la situation d'un système de production traditionnel qui doit être mis à niveau vers un système de production 4.0. La dernière section introduit le Framework de transition numérique qui engendre une structure de support visant à guider l'intégration du 4.0 dans le système de production existant.

6.1 Modélisation générale des systèmes de production 4.0

Le but ici est d'exploiter les concepts développés dans la littérature et de construire un nouveau modèle de système de production 4.0. Nous avons identifié trois concepts représentatifs des systèmes de production qui pourraient être rencontrés dans l'industrie, abordés par (Bonnard et al., 2019), par (Lina et al., 2019) et (Gorecky et al., 2016). En général, tous les concepts sont concourants, cependant leur spécificité trouve son origine dans le contexte d'utilisation. Avant de se lancer dans un processus de mise en œuvre des concepts de l'Industrie 4.0 dans une entreprise, plusieurs experts recommandaient une organisation optimisée de la production comme préalable, notamment par l'utilisation de méthodes comme le lean manufacturing. Il convient de mentionner à ce stade que toute implémentation d'un système de production 4.0 doit considérer le modèle d'architecture de référence pour l'industrie 4.0 RAMI4.0 comme un cadre de la normalisation de référence pour la numérisation industrielle.

A partir d'une analyse des concepts définis dans la littérature dans le périmètre des trois axes bien définis par l'hypothèse proposée, nous présentons ici une initiative de convergence qui consiste à se baser sur un nouveau concept général simplifié qui réorganise les différentes technologies et architectures impliquées dans une vision complète et cohérente d'un futur modèle de système de production 4.0. Ce modèle conceptuel général considère différentes briques technologiques et concepts de base essentiels, représentées par les 5 axes identifiés par (Benfriha, 2020) **Figure 11**, qui constituent les principes de base de la modélisation d'un système de production numérique 4.0. Les trois axes identifiés par l'hypothèse « Production System & SFCS », « Traitement et déploiement des données », « Machines et Technologies Avancées » dans l'objectif d'effectuer la transition numérique des systèmes de production se reposent comme le montre **la Fig. 11** sur les 5 axes conceptuels essentiels du processus de modélisation proposé par (Benfriha, 2020) : les applications, la data, les systèmes CPMS, les systèmes IIoT, et les systèmes IT.

Le **1er axe** considère que le système de fabrication doit être configurable dans les systèmes de fabrication physique cybernétique (CPMS). Cet axe suppose que les machines disponibles intègrent

nativement la capacité de travailler dans un environnement connecté ou de les faire évoluer pour être compatibles avec un système de production 4.0. L'objectif de CPS est de construire un système d'ingénierie contrôlable, fiable, évolutif et capable d'interagir en temps réel. Les CPS sont basés sur les derniers développements dans les domaines de l'informatique, des technologies de l'information et de la communication, ainsi que des sciences et technologies de fabrication dans la perspective d'augmenter les performances de production grâce à des systèmes de contrôle intelligents basés sur les données collectées et transformées (Joost et al., 2012). Pour répondre aux nouvelles demandes du marché, de nouveaux paradigmes technologiques doivent être appliqués aux systèmes de fabrication dans le but d'améliorer l'agilité, la réactivité et d'assurer la qualité des produits. CPS peut relever les défis des futurs systèmes de fabrication en créant le pont entre les éléments physiques et les systèmes de télécommande. La combinaison de plusieurs CPS interconnectés et améliorés par les technologies cloud a conduit à augmenter les processus de nouvelles fonctionnalités 4.0. Une ligne de production intelligente peut inclure de nombreux systèmes cyber-physiques reconfigurables capables d'interagir et d'échanger des données en temps réel avec d'autres systèmes distants. Ces aspects qui contribuent à la flexibilité opérationnelle posent, à la fois, l'hétérogénéité et la complexité des applications CPS qui représentent un réel défi dans leur développement où les aspects de fiabilité, de sécurité et de certification sont prioritaires.

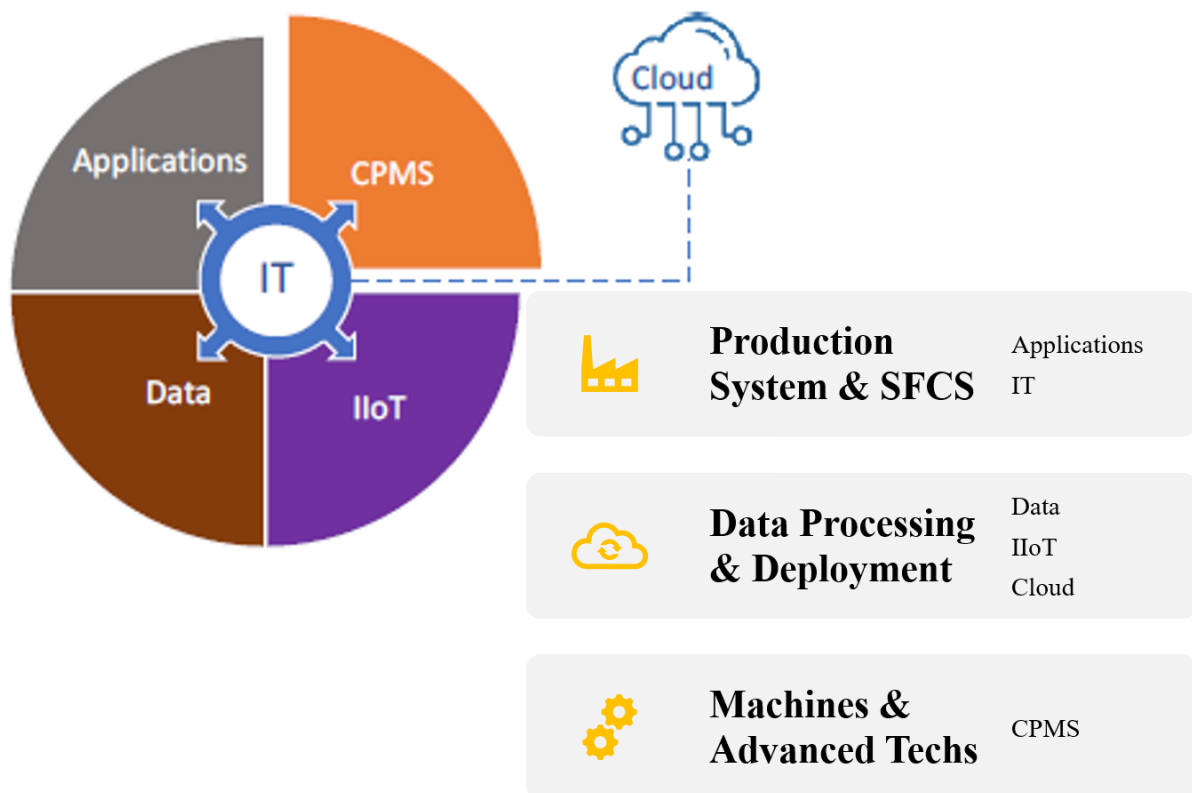


Fig. 11 Modèle conceptuel générale (Benfriha, 2020)

Le **2ème axe** concerne les dispositifs IIoT qui superposent les systèmes CPMS par une couche de capteurs et de caméras. La superposition d'une couche IIoT ouvre la voie à des applications de modélisation virtuelle des processus de fabrication (DTS et DDT) et permet le traitement des données via le Cloud computing ou Edge computing. L'Internet des objets IoT est l'une des technologies de rupture avancées et considéré par le McKinsey Global Institute comme une avancée technologique qui « transformera la vie, les affaires et l'économie mondiale ». Le système IIoT va bien au-delà de la collecte de données à partir de capteurs, il est considéré comme un système holistique qui gère les données de la collecte à l'analyse d'une grande quantité de données pouvant être utilisées pour améliorer les performances globales des systèmes industriels. (Khan et al., 2020) donnent la définition la plus adéquate du système IIoT comme « le réseau de composants industriels intelligents et hautement connectés qui sont déployés pour atteindre un taux de production élevé avec des coûts d'exploitation réduits grâce à une surveillance en temps réel, une gestion et un contrôle efficaces des procédés industriels ».

La pertinence des systèmes IIoT est également prise en compte pour la planification et l'ordonnement dynamiques de la production dans l'atelier. Le système IoT peut intégrer le système de l'atelier, les données des capteurs de localisation sont utilisées pour prendre les décisions logistiques internes les plus optimales ; des accéléromètres peuvent être déployés à des fins de maintenance prédictive (surveillance des vibrations), etc.

Le **3ème axe** aborde les applications logicielles nécessaires à l'exécution et au contrôle d'un système de production avec un soin particulier sur la problématique d'interfaçage logiciel. En effet, diverses applications interviennent dans différentes phases de fabrication de manière ponctuelle ou continue. La problématique de l'architecture logicielle et de l'interfaçage est un point crucial dans la réussite d'un processus de fabrication intégré et autonome.

L'approche traditionnelle de la planification des processus dans diverses petites et moyennes entreprises est basée sur les connaissances et l'expérience du personnel impliqué dans les activités de fabrication. La phase de conception et de développement d'un produit intelligent doit prendre en compte l'inclusion des données des trois étapes suivantes : planification des processus, planification des opérations et séquençage des opérations. L'objectif principal doit être de collecter autant de données que possible afin que le réseau digitalisé et virtuel des machines de fabrication et du produit puisse être établi directement. La configuration des outils de planification des processus et de séquençage des opérations doit fournir une efficacité accrue pour l'optimisation des processus et une capacité assurée pour la personnalisation masse des produits.

Selon (Kumar et al., 2019), il existe trois critères importants associés au logiciel de planification de produit : la planification des processus, le séquençement des opérations et enfin la sélection de la

machine. Le logiciel de planification des produits recueille des informations provenant de différentes parties de la chaîne d'approvisionnement liées aux activités de fabrication importantes. La masse du produit, son matériau, sa forme, son état de surface, ses caractéristiques géométriques et sa qualité constituent les sous-critères des critères de planification du processus. Le deuxième critère du logiciel de planification de produit est le séquençement des opérations. Le logiciel de planification du produit doit prendre en compte les aspects qui influencent les processus de fabrication, tels que l'opération de finition, le nombre d'opérations requises, la méthode de fixation et la priorité de l'opération. Le troisième critère majeur pour les logiciels de planification de produits est la sélection des machines et les critères de planification. Les sous-critères importants associés incluent le temps de fonctionnement, les outils nécessaires, la qualité requise, le coût de la machine, la disponibilité de la machine et le nombre de produits commandés. La sélection de la machine constitue une partie importante du logiciel de planification des produits, qui se fait grâce aux informations sur les machines disponibles dans le système de fabrication. La prise en compte de ces critères permet au système de fabrication de réaliser l'opération avec l'objectif global de minimisation des coûts et du temps de fabrication.

Le **4ème axe** pose la question des données générées ou importées à plusieurs points de vue, stockage, sécurité, traitement, filtrage, partage et visualisation. Il est certain que l'Industrie 4.0 générera plus de données, et plus qu'assez pour savoir collecter, analyser et utiliser afin d'en tirer une valeur ajoutée. L'analyse des données permet de générer des informations susceptibles d'augmenter les performances du système de production. Cet axe est sans aucun doute au cœur de cette révolution industrielle et représente un enjeu majeur en termes de gestion, d'optimisation et de cybersécurité. Les entreprises doivent être en mesure d'identifier et de localiser les données dans leurs formats d'origine dans un lac de données. Les défis du contrôle des données sont importants. En effet, selon le Data Literacy Index (Jung, 2002), les entreprises qui réussissent à améliorer leur capacité à utiliser les données pourraient augmenter leur valeur de 3% à 5%. En outre, il semble avoir une forte correspondance entre l'amélioration de la capacité du personnel à utiliser les données pour la prise de décision d'une part et les mesures de la performance commerciale, telles que la marge de production brute, le rendement des actifs, le rendement des capitaux propres et la rentabilité des ventes. Un lac de données désigne un espace de stockage global qui absorbe le flux de données présent dans un système de production 4.0. Cela implique de le faire avec suffisamment de flexibilité pour interagir avec les données dans leur format d'origine, qu'il s'agisse de données brutes, structurées et non structurées. En plus du stockage, l'un des enjeux du data lake est de pouvoir traiter et transformer facilement les données afin d'en extraire des informations utiles pour améliorer les performances des processus de production mais aussi pour enrichir la phase de conception du produit. Le choix de traiter les données localement EdC ou dans un cloud CdC dépendra de la finalité d'utilisation.

Le **5ème axe** est sans aucun doute le plus complexe concernant l'intégration verticale et la communication entre les différentes couches du système de production. Cet axe comprend des choix en termes de services distribués, orientés objet ou de systèmes d'information conduite par évènement (EDA, SOA) adaptés aux besoins des entités internes et externes qui interviennent, selon différents protocoles, en temps réel ou différé. Une architecture de système d'information adaptée est nécessaire pour déployer la flexibilité et l'adaptabilité du processus de production et améliorer une gestion décentralisée de la prise de décision à travers le réseau distribué.

En effet, l'organisation pyramidale traditionnelle restreint fortement la communication, où toutes les couches ne peuvent changer les informations qu'avec des voisins adjacents. Cette restriction devrait être dépassée dans l'industrie 4.0, car fondamentalement, toutes les données devraient être facilement partagées via le système distribué, quel que soit son emplacement physique. Pour éviter cela, la technologie et les paradigmes de l'industrie 4.0 doivent être conçus pour fournir un support adéquat pour transporter et traiter une grande quantité d'informations à la fin. Dans l'automatisation avancée, les lignes de production et les processus de production sont plus compacts et modulaires, mais ils peuvent également établir efficacement des connexions directes (physiques ou logiques) pour partager des informations. Les systèmes modulaires et flexibles exigent la disponibilité d'une infrastructure intégrée puissante et d'une production basée sur une architecture de communication avancée est de plus en plus importante.

(Theorin et al., 2017) ont abordé la pertinence de l'intégration de la SOA au niveau de gestion des opérations de fabrication et au niveau de contrôle. La plupart des outils SOA sont conçus pour les processus d'entreprise, qui n'ont pas d'exigence stricte en matière de temps ou de ressources, tandis que les périphériques qui s'exécutent au niveau de la surveillance et du contrôle ont souvent une mémoire et une puissance de calcul strictement limitées. SOA est une architecture logicielle distribuée où les applications autonomes s'exposent en tant que services, auxquels d'autres applications peuvent se connecter et utiliser. Pour atteindre leur plein potentiel, les applications SOA doivent être autodéscriptives, découvrables et indépendantes de la plateforme informatique et du langage. Cela conduit à un couplage lâche et une flexibilité élevée. L'adoption de la SOA dans une entreprise commence généralement par une initiative informatique visant à améliorer l'efficacité de l'infrastructure et peut ensuite évoluer vers une utilisation optimisée à des fins commerciales.

En conclusion, les notions de réseaux adaptés, de connectivité, d'agents, d'interopérabilité, d'intelligence, de traitement, de flexibilité et enfin de continuité numérique sont souvent citées dans la littérature récente dans une approche de modélisation. Les différences observées entre les modèles étudiés résident dans la contextualisation de chaque modèle. Dans chaque cas, les auteurs ont formalisé un modèle adapté à un contexte d'utilisation spécifique, qui marque une différence avec le concept que nous proposons, qui est générique et adaptable à différentes situations. Le modèle proposé sera déployé

sur un système de production conventionnel existant afin d'identifier les évolutions nécessaires et de définir en conséquence le cadre de transition concernant les actions à entreprendre pour l'objectif d'intégration numérique.

6.2 Modélisation des systèmes de production 4.0, cas d'un système de production existant

Dans le cas d'un système de production traditionnel existant, le modèle proposé doit prendre en compte les machines et réseaux déjà installés. L'approche que nous proposons consiste à analyser le système existant afin de le valoriser avec une couche technologique adaptée aux fonctionnalités souhaitées et au potentiel de l'entreprise à investir dans les lignes de production en réponse aux objectifs business souhaités.

Avant d'entamer le processus de transition, nous considérons que l'entreprise souhaitant évoluer vers un système de production 4.0 bénéficie déjà d'une architecture CIM existante **Figure 12** qui fonctionne sur un modèle proche de 3.0 et son processus de fabrication fait déjà l'objet d'une amélioration continue, notamment en utilisant le lean manufacturing. Ce point de départ est crucial pour une transition réussie vers des systèmes évolués.

En se basant sur le modèle conceptuel introduit ci-avant et les axes identifiés par notre hypothèse, nous considérons que la transformation de l'atelier comporte 5 aspects. L'aspect matériel considérant l'acquisition d'équipements pour les transferts entre machines, le contrôle qualité intégré ou les machines de fabrication additive. A cela s'ajoute la reconfiguration des machines existantes en termes de contrôles afin de les rendre compatibles avec un système de production connecté. Le deuxième aspect concerne la superposition d'une couche IoT comme des capteurs, des caméras avec des réseaux dédiés interopérables avec le réseau existant.

Le troisième aspect concerne l'acquisition de logiciels, notamment pour gérer l'atelier. Par ailleurs, le développement d'un environnement de gestion numérique et d'industrialisation spécifique est nécessaire, auquel seront transférées les fonctions de contrôle, sans oublier les problématiques d'interfaçage logiciel appelées à dialoguer lors de l'exécution d'un plan de production. Le 4ème aspect concerne les capacités de calcul, déportées ou locales, nécessaires pour supporter un système de production 4.0 doté de fonctionnalités avancées, notamment lors de l'utilisation de caméras avec des attentes de réactivité en temps réel.

Le dernier aspect concerne la programmation des machines. En effet, en 3.0, les programmes machine sont conçus pour avoir une configuration dédiée à la production de masse. Les machines deviennent une entité unique qui assure le bon déroulement d'un plan de production bien organisé. En revanche, en 4.0 chaque machine est une entité distincte et peut être considérée comme un CPS, ou incluse dans un CPS, connectée, intelligente et autonome. Cette modularité au niveau de l'atelier nous conduit à concevoir des

programmes de fabrication spécifiques pour un plan de production modulaire, autonome, adaptable et reconfigurable.

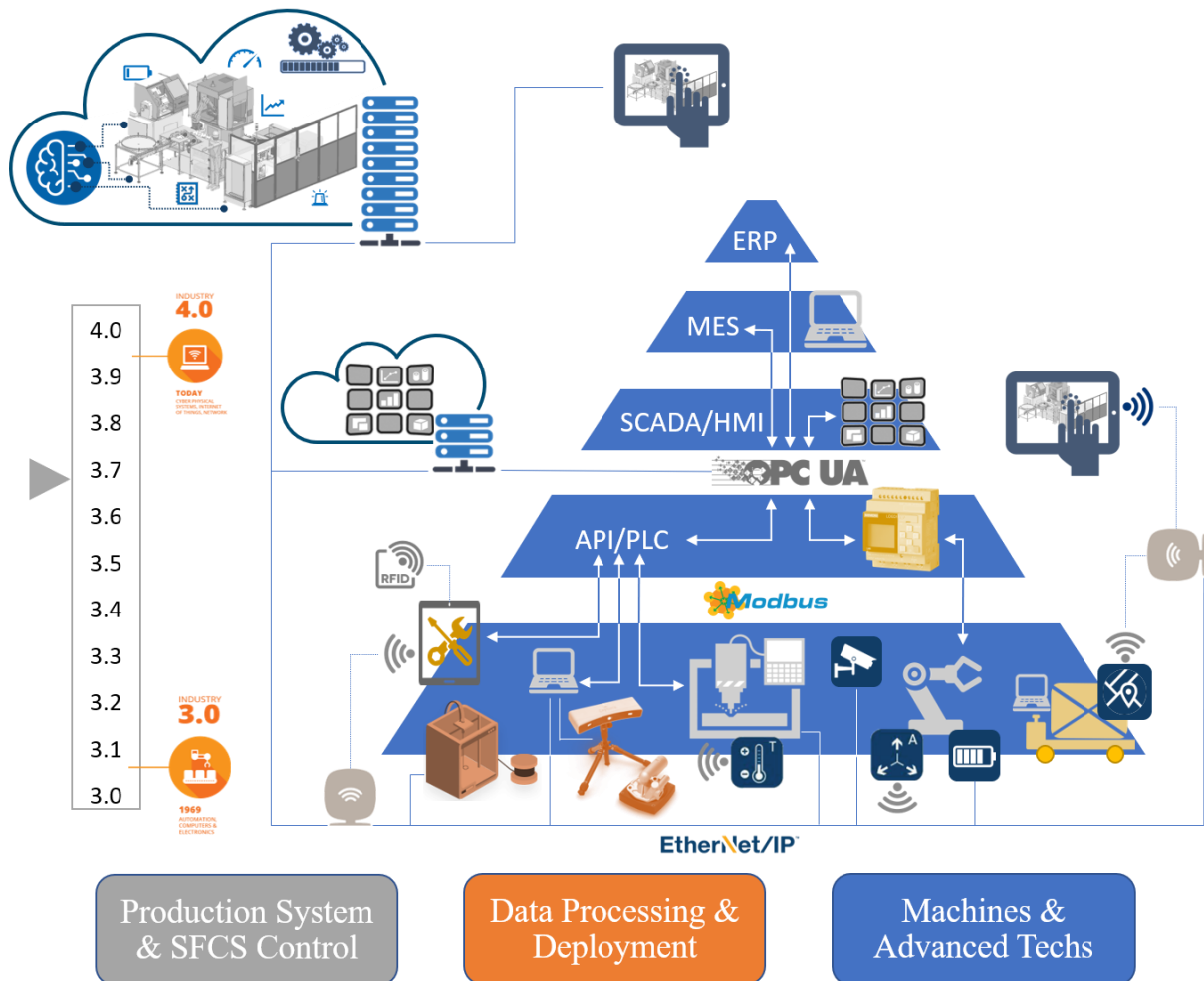


Fig. 12 Modèle conceptuel adapté au pyramide CIM

En conclusion, la modélisation des systèmes de production 4.0 explore différents concepts combinés et déployés pour construire un système intégré et intelligent. Les concepts interfèrent avec différents domaines et expertises et leur interopérabilité constitue un défi technique majeur. Une grande majorité des articles consultés évoquent une complexité multi-échelles, incluant mais sans s'y limiter l'interfaçage, la sécurité et les compétences. Les stratégies industrielles d'évolution sont également confrontées à des problématiques de conseil délivrées par les éditeurs de solutions de plateformes numériques et les fabricants de systèmes technologiques 4.0. Cette concurrence, sous une enveloppe marketing bien développée, entraîne souvent des difficultés dans notre choix de solutions et dans leur mise en œuvre. Un Framework de transition vers les systèmes de production de l'industrie 4.0 est proposé dans le chapitre suivant afin d'appliquer concrètement le modèle proposé et d'orienter les entreprises qui souhaitent faire évoluer leurs systèmes de production.

6.3 Framework de la transition numérique des systèmes de fabrication 4.0

Un nouveau Framework a été développé afin d'exploiter ce modèle et de générer une structure de support visant à guider l'intégration du 4.0 dans le système de production existant. Comme identifié dans la dernière section, la gestion de projet de cette intégration est une clé essentielle à considérer. Un Framework de principes de conception assurant principalement l'intégration verticale et permettant l'horizontale dans la structure de l'entreprise est introduit et expliqué.

L'industrie 4.0 est un système dynamique et intégré permettant de contrôler l'ensemble de la chaîne de valeur du cycle de vie des produits. L'intégration verticale et horizontale et la fusion des composants physiques et virtuels sont essentielles pour la mise en œuvre de l'industrie 4.0 et des tendances technologiques telles que les systèmes cyber-physiques et l'Internet des objets. En d'autres termes, le concept de base de l'Industrie 4.0 est de construire un système de fabrication intelligent et auto-optimisé basé sur les données traitées et de s'appuyer sur l'exploration de données collectées et supervisées en temps réel. Ce processus d'exploration de données doit être bien implémenté dans le système de fabrication et capable d'optimiser la configuration du processus de production en cours (système de fabrication flexible). Cette mise en œuvre impose une liste d'exigences et de changements radicaux dans tout le système de production, ciblant chaque couche du système de fabrication.

Alors que les processus de fabrication intelligents et connectés introduits par l'Industrie 4.0 attirent de plus en plus les entreprises qui s'efforcent de s'adapter aux demandes des clients. A cet effet, nous proposons une nouvelle approche conçue et appliquée avec une nouvelle architecture qui favorise la transition de la fabrication numérique.

En prenant en considération les exigences de la fabrication numérique, l'approche proposée, illustrée à la **Fig. 13** est basée sur les fonctionnalités de l'Industrie 4.0, en particulier la dimension modularité.



Fig. 13 Framework des principes de la transition

Notre Framework de transition est composée de cinq couches, assurant principalement l'intégration verticale, et permettant l'horizontale dans la structure de l'entreprise. L'intégration verticale implique la flexibilité au niveau de l'atelier et celle au niveau du contrôle commande. La flexibilité opérationnelle assurée par les deux premières dimensions devrait être renforcée par le fait de prendre en compte la dimension de gestion des données puisque l'objectif global de la transition numérique est d'améliorer la performance opérationnelle par le data mining. Le déploiement complet de cette intégration est assuré par la dimension d'intégration modulaire des services au niveau du système d'information de production. Enfin, l'ouverture pour une communication au niveau business de l'entreprise et des lignes de production distribuées consiste à assurer la communication du système de production avec les couches business de l'entreprise. L'idée est de garantir au système de production une intégration horizontale tout au long de la chaîne de valeur industrielle et surtout assurer sa communication avec les systèmes ERP des entreprises.

En abordant techniquement la 1^{ère} couche du Framework '**atelier flexible**', plusieurs aspects concernant les machines doivent être pris en compte. Tout d'abord, un système de fabrication flexible FMS dans le contexte de l'industrie 4.0 est requis. Un FMS est basé sur des machines flexibles telles que des robots - Robotic Process Automation (RPA). La flexibilité des machines nécessite au moins de résoudre des problèmes tels que l'interopérabilité, l'accès à distance aux machines et permettre une configuration flexible du processus d'usinage. En plus des exigences susmentionnées, l'intégration des machines avec un niveau décisionnel aiderait efficacement à transformer la machine en module CPS, idéalement lorsqu'elle est capable d'exécuter des algorithmes et de communiquer des données à d'autres modules du réseau. Deuxièmement, la modularité du système de fabrication est un autre aspect à considérer. La

modularité dans le FMS est un compromis optimal entre les autres systèmes de production traditionnels (Kaushal et al., 2016). La flexibilité globale du système de production découle logiquement de la flexibilité des modules et des flux qui le composent. La modularité dans ce contexte repose fortement sur le système de contrôle d'atelier flexible et dépend essentiellement de sa configuration.

Afin de mettre en œuvre l'Industrie 4.0 et d'exploiter ses fonctionnalités innovantes, il est donc nécessaire d'assurer **la flexibilité des systèmes de contrôle de fabrication et des processus de production** figurant dans la 2^{ème} couche du Framework. Comme discuté ci-avant, la flexibilité des machines au niveau de l'atelier une fois configurées, doit être prise en charge par le système de contrôle afin d'être déployée dans le système de production. Les machines flexibles et les CPS modulaires signifient des opérations et des processus flexibles, où leur exécution et leur séquençement nécessitent un système de contrôle d'atelier flexible. Par conséquent, une configuration différente de nos systèmes de production est nécessaire pour permettre d'abord la planification dynamique du flux de travail et des processus, et ensuite l'optimisation autonome en temps réel des processus de production, ce qui n'est pas pris en charge par les systèmes de contrôle conventionnels en raison de sa configuration rigide.

La gestion intégrée des données doit d'abord prendre en compte le traitement local des données pour les informations de bas niveau, notamment les machines, les appareils et les CPS, en particulier les mesures de sécurité, la disponibilité des machines et la gestion globale de l'atelier. Les données locales et de bas niveau doivent être prises en charge par des modules de traitement et des unités de calcul de périphérie si nécessaire. Deuxièmement, l'agrégation d'informations de niveau supérieur telles que les informations de planification de la production et les données historiques, les tendances et les KPI est essentielle pour améliorer les processus. De plus, la large utilisation des capteurs et la numérisation par acquisition de données fournissent des informations aux analystes et au processus de prise de décision. Par conséquent, la gestion intégrée des données devrait permettre le stockage de ces données dans le cloud, ce qui permettra leur accessibilité et leur traitement à tout moment à faible coût. La dimension de gestion des données est essentielle à la numérisation des systèmes de production. Les données doivent être classées et bien agrégées, transférées et stockées, afin d'améliorer les performances des systèmes de fabrication modulaires et flexibles. Ainsi, l'évolution de l'architecture informatique doit prendre en compte les flux de données et le stockage (lac de données) assurant une structure appropriée pour différents types de données.

Considérant la couche de **l'intégration modulaire des services**, la modularité d'un système de production englobe deux sujets principaux : la modularité opérationnelle qui concerne profondément les machines et les processus de production ainsi que son système de contrôle, et la modularité des services de fabrication qui concerne le système informatique de fabrication. Compte tenu du système d'information de fabrication modulaire, étant donné que les systèmes de fabrication sont confrontés à des événements externes imprévisibles et à une complexité interne, la modularité des services de

fabrication est impérative. Le contrôle centralisé et hiérarchique traditionnel devient impuissant dans le traitement des différentes commandes, incapable de répondre rapidement aux changements imprévisibles et aux données extraites. Dans ce contexte, de nouveaux paradigmes décentralisés ont émergé, tels que les systèmes multi-agents (MAS), qui peuvent résoudre des problèmes difficiles ou impossibles à résoudre pour un agent individuel ou un système monolithique, conduisant l'entreprise industrielle à ce qu'on appelle le système de control et d'information distribué. Plusieurs aspects doivent être pris en considération en abordant la structure de l'information distribuée notamment les architectures IT des système informatiques. Une architecture réseau adaptée est nécessaire, telle que Event-Driven Architecture (EDA) ou Service-Oriented Architecture (SOA) déployée dans les différentes applications/logiciels de fabrication qui interviennent y compris MES et ERP, dans l'objectif de développer un système modulaire distribué bien implémenté.

Enfin, **l'ouverture pour une communication au niveau business de l'entreprise et des lignes de production distribuées** considère la dimension de l'intégration horizontale qui couvre le cycle de vie du produit depuis le fournisseur jusqu'à le client. Cette intégration doit être autorisée à travers le réseau et prise en compte. Cela implique la conception et le développement de produits, la planification de la production, le démarrage et la gestion de la production, la logistique, les ventes et les distributions.

7. Expérimentations, application à la plateforme industrielle 4.0

Notre approche a été expérimentée sur une plateforme de production industrielle 4.0 installée dans le laboratoire de recherche **Fig. 14**. Cette plateforme porte un projet de recherche global piloté par M. Benfriha (Benfriha, 2020) et qui s'articule en 2 axes. Mes travaux de recherche s'inscrivent dans le 1^{er} axe qui a pour finalité la modélisation de système de production 4.0.



Fig. 14 Plateforme industrielle 4.0 à l'ENSAM, Paris

Fondamentalement, cette plateforme est construite à partir d'un robot fixe - chargé de gérer les pièces brutes entre le magasin initial et le magasin intermédiaire, ainsi que de transférer les pièces finies vers la table d'accumulation par le biais du convoyeur. Le robot mobile - responsable du transfert des pièces entre le magasin intermédiaire et les machines. On retrouve aussi, un système de caméra fixe pour l'identification et la classification des bruts, un tour, une fraiseuse et une machine de découpe laser.

Au tout début, la plateforme peut fabriquer, assembler et transférer des composants avec un processus de contrôle automatique fermé et peu propice à la flexibilité, aboutissant à la production d'un seul produit de type amortisseurs en polyoxyméthylène (POM) composés de 3 éléments (piston, ressort et corps). Ce mode de fonctionnement correspond au mode de production de masse classique proche du 3.0. Nous introduisons le nombre d'amortisseurs souhaité, ensuite l'automate exécute en boucle le plan de

production sous forme de grafcet déployé avec différentes opérations d'usinage, de transfère et d'assemblage. Ce mode de fonctionnement classique est loin d'être dynamique, du fait que l'automate ne réagit pas à aucune anomalie saufs les incidents de sécurité qui figurent dans les conditions qui peuvent causer l'interruption du cycle. Dans cette configuration conventionnelle, cette plateforme de production était assez représentative du mode de fonctionnement des entreprises.

Le chapitre expérimentations sera organisé en plusieurs sections. Les objectifs et le protocole de l'expérimentation sont présentés dans la section 7.1. La section 7.2 explique le déploiement du Framework proposé dans la plateforme industrielle 4.0 en présentant en détail l'intégration verticale et l'évolution de la structure du système de production. La section 7.3 représente la nouvelle architecture système et l'architecture informatique de la plateforme ainsi que le modèle des niveaux de prise de décision des machines à la plateforme 4.0. La section 7.4 présente la méthodologie de conception pour la configuration des processus modulaires basée sur les avantages de l'intégration de système appliquée dans la section 7.2 et sa nouvelle architecture. Dans la section 7.5, une nouvelle approche est présentée pour améliorer la mise en œuvre du programme de fabrication flexible grâce à la méthodologie de conception proposée en 7.4. La section 7.6 présente une application qualitative pour évaluer le fonctionnement du système en validant la dimension de la flexibilité du système de fabrication évolué.

7.1 Objectifs et Protocole de l'expérimentation

L'objectif est d'utiliser cette plateforme afin d'expérimenter et déployer un processus de fabrication intelligent et flexible dans le but de valider notre hypothèse 'L'évolution des systèmes de production vers la numérisation dans le contexte de l'Industrie 4.0 nécessite d'agir sur trois axes principaux : le système de production, y compris le système de contrôle de l'atelier SFCS, les machines et technologies avancées, et enfin le traitement et le déploiement des données', Tout en intégrant plusieurs technologies et en mettant en œuvre un nouveau système de production flexible.

En s'appuyant sur le Framework de conception que nous avons proposé comme le montre le protocole expérimental défini par la **Figure 15**, une nouvelle architecture du système de production a été déployée pour accroître la flexibilité et la modularité au niveau de l'atelier en tenant compte du système de contrôle et du système informatique. Plusieurs technologies ont été ajoutées à la plateforme industrielle 4.0 comme le FARO 3D Scanner et des caméras embarquées sur les robots. Une fois les différents niveaux d'intégration déployés, la justification et la démonstration de notre modèle conceptuel et du Framework de transition seront établis à travers l'implémentation d'un nouveau programme de production modulaire. Les méthodologies innovantes intégrées permettront l'émergence de nouvelles fonctionnalités, telles que la flexibilité opérationnelle, la personnalisation, la production dynamique, le rendement en lead-time, la décentralisation, et la portabilité. Finalement, une application démonstrative

sera menée afin de valider la dimension de la flexibilité et du rendement en lead-time du système de fabrication évolué.

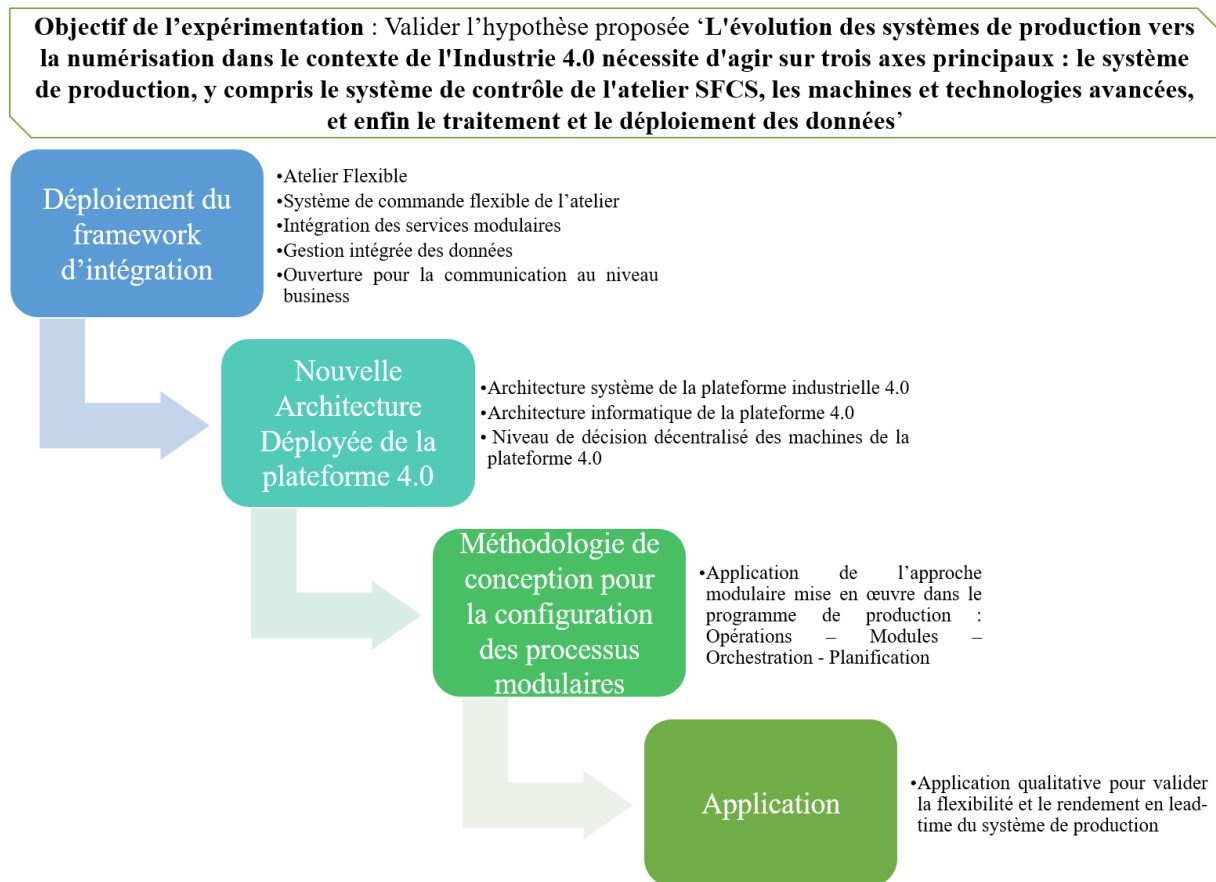


Fig. 15 Objectifs et Protocole de l'expérimentation

7.2 Déploiement du Framework proposé

Le Framework de conception proposée ci-avant est appliqué sur la plateforme expérimentale et enrichi d'une nouvelle architecture. Dans ce qui suit, le déploiement du Framework est expliqué étape par étape.

7.2.1 Atelier flexible à la plateforme 4.0 :

Concernant la couche machines, deux niveaux de modularité ont été développés, la modularité des machines et la modularité opérationnelle. La modularité des machines consiste à transformer des machines existantes en entités CPS et / ou en machines flexibles. En premier, les robots ont été transformé en CPS intelligents et connectés en mettant en œuvre des configurations innovantes et en développant une base de données interne intégrée dans le système de production. Cette base de données est reliée à des programmes de trajectoires qui permettent les fonctions de transfert entre différents magasins de stockage des pièces et les machines. Des points de bouclage par zone sont créés pour éliminer toute collision entre les robots et les machines / obstacles. A ces trajectoires nous avons associé plusieurs paramètres tels que l'identifiant pièce, le diamètre de la pièce, la hauteur de prise de la pièce

(distance entre pince du robot et la base de de la pièce) et enfin la vitesse de déplacement et le numéro d'outil (pince).

Les machines CNC n'ont pas été conçues pour travailler dans un environnement connecté. Pour résoudre ces problèmes, une couche IoT a d'abord été ajoutée en superposant les machines de fabrication par des capteurs et des IoT afin d'exploiter les données et les informations utiles pour améliorer et superviser les états de fonctionnement. Par conséquent, des capteurs de vibration sont ajoutés aux machines avec des capteurs de température et de position IoT en fonction des exigences fonctionnelles de chaque machine afin de collecter le maximum d'informations d'usinage utiles.

Deuxièmement, le contrôle des machines a été étendu par des modules Entrée / Sortie supplémentaires pour permettre la sélection du programme de fabrication souhaité avec une capacité de paramétrage, activée via un G-code flexible principal. L'accès à distance aux données de la machine via un adaptateur réseau USB avec la CNC a permis le transfert de fichiers des programmes d'usinage vers les machines CNC à partir du MES. L'opération d'usinage CNC est d'abord paramétrée par l'ID correspondant à la référence de sous-programme associé au produit, la profondeur de coupe et la vitesse de coupe.

Troisièmement, un scanner 3D est installé pour une fonction de contrôle de qualité avancée et automatisée. Le MES active le scanner 3D via OPC UA. Le scanner 3D génère un nuage de point et le compare au modèle 3D natif du produit sélectionné et renvoie les résultats de conformité au MES sous forme de rapport et de décision d'acceptation ou de rejet du produit. En plus de cela, un autre système de caméra est intégré aux robots et dispose de deux fonctionnalités principales, un contrôle de conformité supplémentaire in-situ qui signifie que les pièces seront contrôlées sur les machines avant d'être récupérées par les robots et réajustées si nécessaire, et un contrôle de sécurité supplémentaire pour éliminer toute collision entre robots vs machines et robots vs pièces.

La modularité des machines présentée ci-dessous permet de générer tous les scénarii d'usinage possibles et par conséquent la personnalisation des processus de production devient une réalité. La production est donc organisée à travers des modules fonctionnels qui peuvent être lancés dans un ordre différent. Cela nous permettra de profiter du plein potentiel de la plateforme et de gagner en flexibilité. Chacun de ces modules est composé d'opérations standardisées et sera ensuite intégré dans le processus de contrôle d'automatisation. Pour cela, nous avons créé plusieurs opérations paramétriques qui représentent l'ensemble des opérations de production adaptées au potentiel de notre plateforme industrielle 4.0:

- Opérations de transfert entre machines et stocks (trajectoires des robots).
- Opérations d'usinage incluant l'usinage CNC (codes G pour les procédés d'usinage) et les opérations de découpe laser.

- Opérations de contrôle qualité, y compris les opérations de scanner 3D pour le contrôle de la qualité, et la qualité dimensionnelle des pièces fabriquées à l'aide d'une caméra intégrée au robot
- Opérations d'inspection / monitoring à l'aide des caméras fixes et embarquées incluant les contrôles de sécurité, le stockage et les contrôles d'anomalies.

Pour conclure, disposer d'un système de production flexible et adaptatif est essentiel pour assurer la transition numérique du système de production. Pour atteindre cet objectif, plusieurs changements affecteraient l'organisation conventionnelle de l'atelier, notamment au niveau opérationnel et matériel. La transformation de machines conventionnelles en CPS représente la clé de voute d'une transition réussie vers la numérisation des systèmes de production. Plusieurs technologies avancées introduites par l'I4.0 **Fig. 16** ont été déployées telles que des machines connectées, un scanner 3D, des systèmes de caméras embarquées intelligentes et des capteurs IoT, ainsi que le déploiement d'opérations paramétriques standardisées, dans la perspective de concrétiser la fonction « flexibilité » opérationnelle dans le cadre de « l'Industrie 4.0 ».

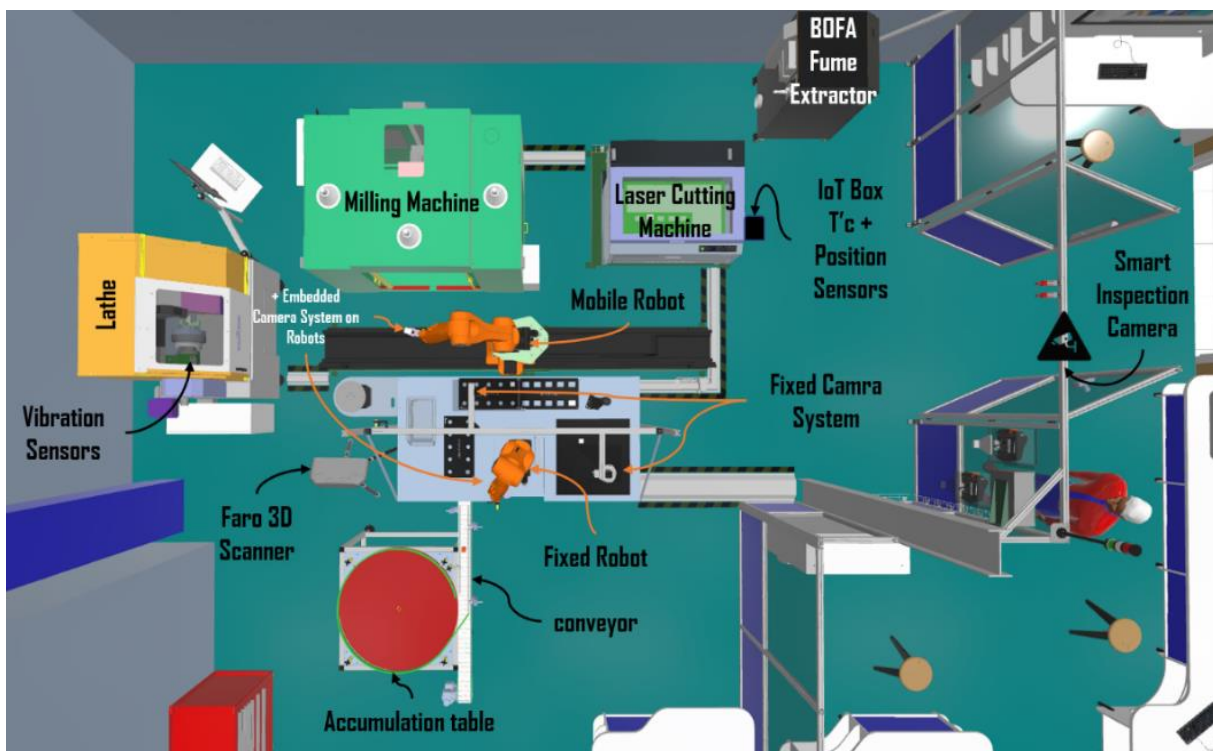


Fig. 16 Plateforme 4.0, modèle 3D

7.2.2 Système de commande (contrôle) flexible de la plateforme 4.0 :

Afin de déployer la flexibilité opérationnelle créée au niveau des machines, le système de contrôle de l'atelier doit prendre en charge la flexibilité et la modularité introduites. Pour surmonter la limitation de contrôle pour un système de fabrication amélioré et plus flexible, l'approche que nous proposons est

similaire à la méthode d'appel (Call up) en déportant le contrôle des fonctions logiques d'automatisation de la couche API vers la couche supérieure de la pyramide CIM, afin qu'elles soient accessibles à l'ingénieur de production et des opérateurs de l'atelier. Pour cela, des fonctions logiques ont été adaptées pour être utilisées sans nécessiter l'intervention d'un travail de redéveloppement de la couche automatique (des automates). Nous n'utilisons plus de master graficets pour gérer les commandes des opérations, c'est le Manufacturing Execution System MES (supervision & exécution) qui assurera cette fonction. Concrètement, nous générons de petites séquences de production paramétriques que l'ingénieur peut utiliser séparément comme opérations standards ou assemblées pour former des modules fonctionnels afin de construire un plan de production complet. Ces opérations et modules standardisés activent les fonctions logiques du contrôleur, en utilisant les protocoles d'automatisation de commandes standardisés pour contrôler les machines.

Cette solution concernant le système de contrôle n'est pas unique. Tout d'abord, un système de contrôle d'atelier adapté doit prendre en compte les exigences de base, en particulier la commande standardisée, le contrôle-commande des systèmes industriels : standards ISA-88, 95,106, fournissant un contrôle direct via de petits microcontrôleurs ou des automates standards. L'utilisation des automates standards ou des microcontrôleurs sera muni par le déploiement des fonctions logiques ou des blocs fonctionnels. Par la suite, et dans l'objectif d'établir une flexibilité opérationnelle, une fonction d'ordonnancement déportée vers un orchestrateur contribuera à libérer et agrandir le processus décisionnel pour configurer un plan de production flexible d'un produit. Par conséquent, le processus d'exécution du plan de production pourra être dynamique et optimisable grâce à la flexibilité implémentée au niveau commandes. Enfin la possibilité d'intégrer l'IA pour les petites tâches grâce à des modules de contrôle intelligents est désormais possible grâce à des nouveaux modules automatiques intelligents niveaux bas récemment présents dans les marchés industriels.

7.2.3 Intégration des services modulaires :

L'objectif principal de cette couche est de déployer un système de fabrication orienté services capable de fournir des fonctionnalités de fabrication telles que la planification de la production, la gestion de la production, l'optimisation et la supervision de la production. Ce système informatique modulaire doit héberger des applications de service de fabrication et prendre en charge l'intégration des modules CPS en tenant compte des contraintes d'interopérabilité. En conséquence, cette structure permettra une décentralisation des décisions au travers de différents modules (applications / logicielles) basée sur une architecture distribuée au niveau du site de production.

Le développement est porté sur l'implantation de la fonction flexibilité dans cette ligne de production afin qu'elle puisse fabriquer plusieurs produits et en suivant différents cycles de fabrication dans une configuration rapide. Un MES avancé et orienté services a été déployé dans la plateforme, où toutes les

données issues des machines et capteurs ont été collectées. Le système de production est donc composé de différents logiciels et modules dédiés à des fonctions précises comprenant l'historisation et les tendances, le module serveur d'intégration de la communication, la planification de la production, le traitement des données et le traitement des images en IA.

Ces logiciels ne sont pas nécessairement hébergés par le MES et pour certains ont été développés en interne notamment les modules de traitement IA qui sont connectés au système de production et peuvent lui fournir les informations interprétées. Le système d'inspection visuelle intelligent est l'un des exemples de modules que nous avons intégrés, qui a pour fonctionnalité d'augmenter l'autonomie du système de production en assurant la sécurité des personnes présentes dans la zone de production. A cet effet, une caméra d'inspection a été ajoutée à la plateforme de production et contrôlée via un algorithme d'apprentissage automatique pour la détection humaine (El Zant et al., 2021). Lorsqu'un humain est détecté à l'approche de machines, le système de caméra envoie une notification au MES pour interrompre la production et assurer la sécurité des opérateurs. Ce module est faiblement couplé au système de production, et peut être utilisé pour d'autres applications et générer des opportunités pour développer différents modules parallèles pour le traitement des images et les intégrer dans le système de fabrication dans un but d'optimisation. Deux modules supplémentaires ont été intégrés dans l'objectif de valider l'architecture informatique modulaire de notre système de production. Le premier module est le système de vision intelligent présenté ci-avant qui sert à détecter la présence humaine dans le champs de travail des robots en faisant référence à l'article publié 'Enhanced Manufacturing Execution System "MES" Through a Smart Vision System' (El Zant et al., 2021). Le deuxième module est l'intégration et le déploiement d'une application jumeau numérique avec deux modes fonctionnels monitoring et simulation. Le développement et l'implémentation fonctionnelle du module jumeau numérique sera porté par la thèse de doctorat de mon collègue CHARRIER Quentin.

L'interopérabilité entre la plateforme numérique et la couche matériel a été adapté grâce au serveur d'intégration de communication du MES qui permet une grande variété de protocoles de communication via des pilotes de communication. L'automate par exemple communique avec l'MES via le serveur d'intégration des opérations Sidirect, et le scanner 3D communique via OPC UA.

Enfin, le contrôle en temps réel des opérations et l'ordonnancement se font via une application web IHM développée via le MES. L'objectif est de fournir une interface interactive qui communique avec les machines et les robots via leur identifiant, Cette dernière peut lancer les opérations d'usinage, les transferts, les services de contrôle et de surveillance et enfin organiser les processus de production dans l'ordre souhaité ainsi que de superviser et surveiller l'installation de production.

7.2.4 Gestion intégrée des données :

Comme évoqué précédemment, la gestion des données, y compris l'agrégation de données et leur exploration, est un objectif essentiel de la transformation numérique des systèmes de production. Pour ce faire, la couche atelier lui a été superposée par une couche de capteurs IoT pour collecter les données et les informations potentielles des machines. On retrouve les capteurs de vibrations pour la maintenance prédictive, des capteurs de consommation d'énergie pour l'optimisation énergétique des processus de production, les capteurs de température pour l'assurance qualité et sécurité. Certaines des données collectées sont cruciales pour la planification et la gestion de la production et peuvent être adressées au niveau business via l'ERP. D'autres données de bas niveau sont traitées localement sur un CPS désigné, assurant la communication machine à machine et permettant un processus décisionnel local. À titre d'exemple, les robots avancés gèrent les magasins de transition et le transfert de produits en cours d'usinage au niveau local à l'aide d'une base de données locale intégrée, qui est également partagée avec le MES pour le suivi des produits. Les données du système de contrôle de l'atelier telles que les disponibilités des machines sont bien partagées avec le MES via le réseau terrain puisque le système de production sera en charge de la gestion du flux de processus et de la planification globale de la production. Les données de contrôle sont également essentielles pour améliorer la sécurité des processus de production.

Sur le plan technique, deux réseaux TCP / IP ont été mis en œuvre. Le premier concerne le niveau de gestion et de pilotage, en connectant le MES avec d'autres modules d'applications, y compris Historian, l'IHM et une IHM portable, ainsi qu'un lien vers le cloud. Le deuxième réseau représente le bus atelier qui concerne les équipements et machines où deux flux de données peuvent être définis. Les données de contrôle et de surveillance à traiter via les itinéraires des contrôleurs et le flux de transfert de données en utilisant différents protocoles de communication qui sont collectés à partir de machines, de capteurs et d'actionneurs. Le niveau de management et pilotage fournira au système de production des données précieuses, en particulier des données historiques, des tendances et des indicateurs de performance clés. Ce niveau est également conçu pour collecter des données brutes et des données exploitées à des fins d'optimisation. Parallèlement, les modules de service d'exploitation de données sont connectés directement au système de production en lui fournissant des données traitées, tel que le module de caméra d'inspection intelligente. En outre, la gestion des données comprend le développement et la mise en œuvre de plateformes cloud où les données peuvent être stockées et traitées en parallèle avec les machines locales. La plateforme cloud peut fournir du cloud computing pour les données brutes et apprendre pour enrichir les algorithmes d'IA locaux. Enfin, le système de production est bien connecté au niveau business via la plateforme ERP une fois déployée où les données peuvent être partagées dans deux directions dans un périmètre bien défini prenant en compte les questions de cybersécurité.

La prise en compte de la dimension de gestion intégrée des données a permis d'exploiter les données dans l'organisation et le suivi du système de production et contribuera à la performance et à l'optimisation puisque les flux de données sont assurés à la fois dans des directions ascendantes et descendantes. En outre, la gestion intégrée des données permet de définir le lac de données de la plateforme et d'agréger différents types de données, y compris les données de bas niveau (données brutes des machines incluant les disponibilités des machines), les capteurs et les données IoT, les données non structurées telles que les images pour le traitement d'images, le nuage de points générés le contrôle de la qualité et finalement les données d'usinage, y compris les programmes d'usinage.

7.2.5 Ouverture pour une communication au niveau business de l'entreprise et les lignes de production distribuées :

L'intégration des systèmes MES avec les systèmes ERP ou d'autres applications de pilotage est devenue une mission critique pour les opérations de fabrication. En particulier, cela offre une flexibilité dans la planification de la production. Il améliore également la visibilité de la chaîne d'approvisionnement et l'aide à la décision en mettant à jour les applications métier avec des informations de production en temps réel.

La plateforme numérique du système de production intégrée au système de production offre la possibilité d'échanger des messages et de permettre la synchronisation automatique des données entre plusieurs applications d'atelier et entre les différents ateliers de l'entreprise. Cela permet aux systèmes industriels et commerciaux de communiquer de manière plus simple et plus sûre.

Ce qui comprend des capacités d'intégration et d'échange, y compris des messages XML, des fichiers plats, des requêtes SQL qui permettent l'intégration entre plusieurs applications d'atelier et ERP ou d'autres systèmes d'entreprise. Les extensions permettent via des plug-ins personnalisés d'étendre la connectivité de l'ERP avec n'importe quel système ou de standardiser l'utilisation du produit dans un scénario multi-sites. Les caractéristiques d'un tel ERP distribué portent sur une intégrité des échanges de données, des échanges de messages flexibles le tout supporté nativement par le MES. Les utilisateurs peuvent également bénéficier d'un historique complet des échanges de messages, de la fonctionnalité Store & Forward, d'extensions pour une gestion personnalisée de la transformation des données ainsi que d'interfaces web.

7.3 Architecture innovante de la plateforme industrielle 4.0

Suite à l'intégration verticale implémentée dans le cadre du Framework de transition proposé, l'architecture du système a été upgradé à un niveau avancé en termes de flexibilité et d'autonomie. La nouvelle version évoluée de l'architecture système est établie et soutenue par l'infrastructure informatique de la plateforme assurée par la nouvelle architecture informatique déployée. La nouvelle

architecture informatique conduit à assurer la modularité du système et résoudre les contraintes d'interopérabilité. Par conséquent, grâce au système informatique modulaire et à la flexibilité assurée au niveau de l'atelier, une nouvelle configuration des niveaux de prise de décision des différentes machines et modules a été ensuite permis, tout en assurant la fonctionnalité de décentralisation du système de production.

L'architecture du système de production ainsi que son architecture informatique sont représentées dans cette section. Enfin, et avant de discuter le changement de la nouvelle configuration du système de production dans la section 7.4, le niveau de décision des machines est présenté en 7.2.3, introduisant la décentralisation à travers la nouvelle architecture du système, et une synthèse rétrospective sur les fonctionnalités attendues du système évolué grâce à cette intégration sera présenté en 7.2.4.

7.3.1 Architecture système de la plateforme industrielle 4.0

Comme le montre la **Figure 17**, l'architecture du système a clairement été évolué. La couche de machines composée du tour, de fraiseuse et de découpe laser en plus des robots a une communication de contrôle directe avec la couche PLC / API. Cette communication est établie via I / O, Profinet et d'autres protocoles de communication industriels pour le transfert de données de bas niveau et les commandes automatiques. Les données partagées entre les machines et l'automate sont dirigées vers le MES via une communication établie entre le MES et l'automate en utilisant le driver Sidirect pour Siemens Profinet, grâce au serveur d'intégration du MES. D'un autre côté, la couche IoT superposée aux machines, y compris les accélérométriques d'Intellinova sur le tour, les capteurs de consommation énergétique de Socomec installés sur la source d'alimentation des machines et le boîtier Sick IoT connecté aux capteurs de position et de température sur la découpe laser communiquent tous directement au MES via le protocole de communication Modbus. Le scanner 3D de FARO installé à proximité de la machine de calcul communique via le protocole de communication OPC UA avec le MES sur le même réseau. Les caméras embarquées Sensorpart sont connectées au réseau local et aux robots en Profinet tandis que le système de caméras fixes de Cognex est intégré au système des robots.

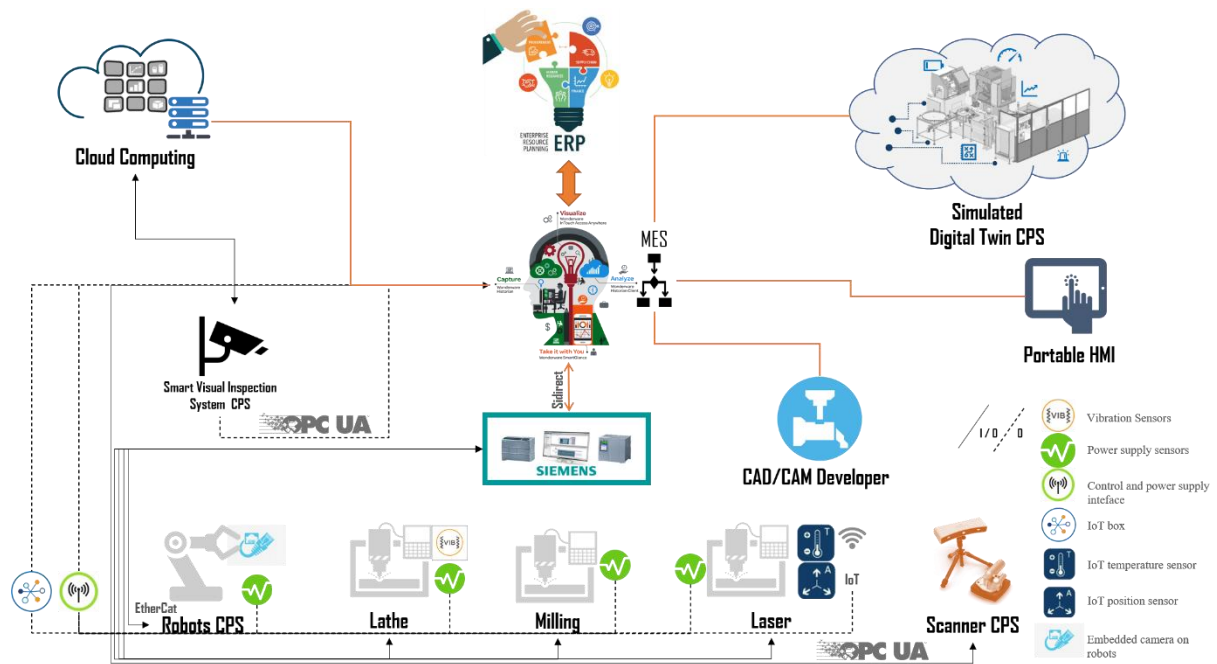


Fig. 17 Architecture système de la plateforme industrielle 4.0

Une autre communication de transfert de données est établie directement à travers le réseau entre le MES et les Machines pour le partage de programmes Gcode. Les programmes Gcode générés par l'outil CAO / FAO SprutCam sont accessibles par le MES et partagés via le réseau afin de mettre à jour les programmes actifs sur les machines CNC. Une caméra d'inspection IDS est connectée au système de la plateforme sur le réseau. Le système d'inspection est installé sur la machine de calcul et se communique avec le MES via OPC UA.

Le MES présenté dans cette architecture héberge plusieurs applications orientées services, notamment l'IDE d'environnement de développement intégré d'Aveva System Platform, le serveur d'intégration, l'IHM développée via Intouch OMI et l'historien. Un serveur DNS est installé sur le serveur principal afin d'activer l'application Intouch Access Anywhere jouant le rôle d'une application IHM déportée pour une utilisation portable via un réseau 4G séparé du local. L'application de jumeau numérique simulé est intégrée au système de production avec le système d'inspection visuelle intelligente. Enfin, les modules de cloud computing ne sont pas déjà déployés mais activés d'abord via l'application Azure et Aveva Insight connectée à Aveva System Platform via le réseau 4G, et activés également sur la machine de calcul si nécessaire. La configuration des plateformes de cloud computing sera menée par la thèse de doctorat de mon collègue EL HELOU Marwan, travaillant sur l'intégration du Cloud Computing dans les systèmes de fabrication industrielle.

7.3.2 Architecture informatique de la plateforme industrielle 4.0

Afin de bien clarifier l'architecture du système, l'architecture informatique mise en œuvre à la plateforme est présentée par la **Figure 18**. L'architecture informatique est organisée à travers deux réseaux

principaux, le réseau de bas niveau (ou bus terrain) et le réseau de haut niveau. Le réseau de bas niveau est un réseau TCP / IP incluant la couche de connexion des machines, la couche de contrôle et la couche de gestion présentée par le serveur principal en tant que réseau de bus de terrain, où différents protocoles de communication sont déployés selon les besoins pour chaque entité/équipements. Le deuxième réseau connecte la couche de gestion composée de différentes machines adaptées à différentes utilisations en fonction du rôle d'application implémenté, et permet la connexion au cloud et à l'application IHM portable. Ce réseau est connecté à la couche business ainsi représentée par le système ERP qui n'est pas déployé pour l'instant puisque nous nous concentrons sur la dimension du système de production niveau atelier.

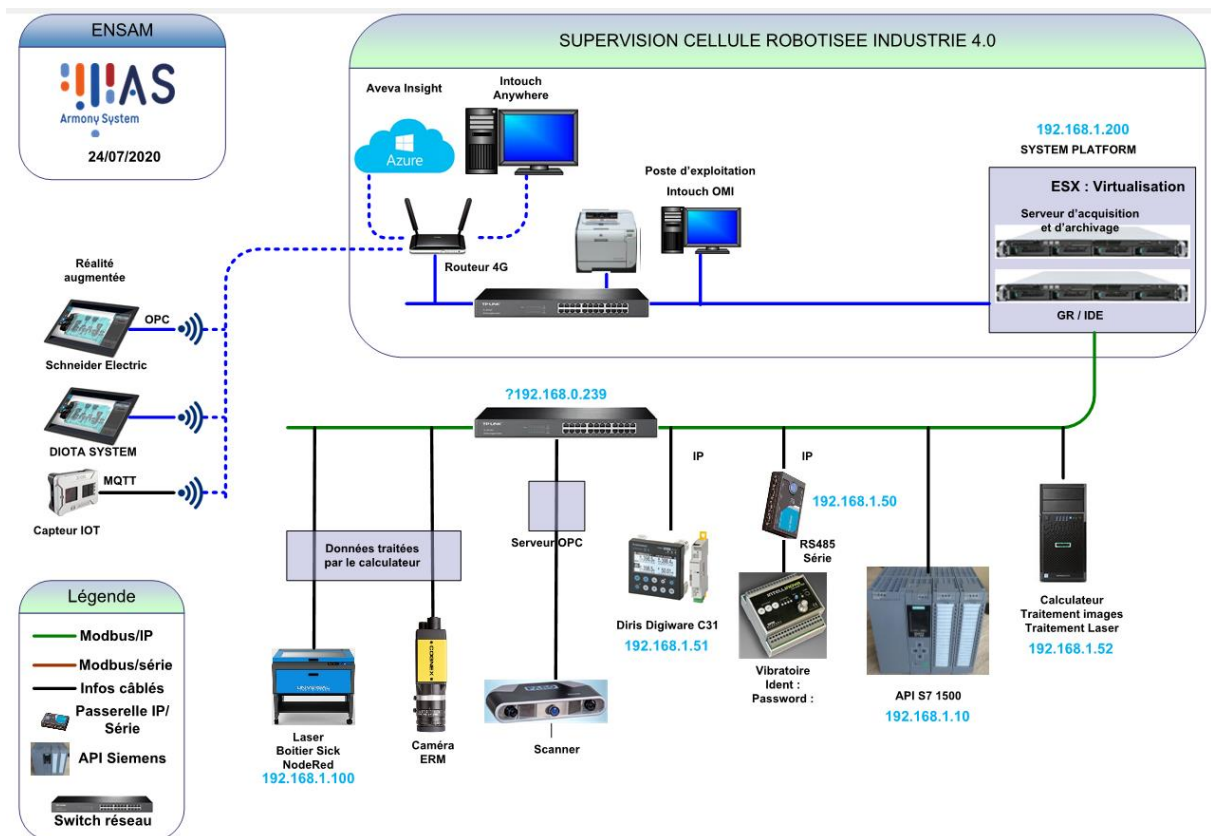


Fig. 18 Architecture informatique de la plateforme industrielle 4.0

7.3.3 Modèle basé sur le niveau de décision des machines de la plateforme industrielle 4.0

L'architecture de la plateforme et la configuration du système informatique ainsi que sa modularité permettent un niveau de décentralisation amélioré en termes de niveau de décision concernant le traitement de la production et les modules informatiques. La **Figure 19** présente à travers un diagramme modèle basé sur les machines, le niveau de prise de décision de chaque entité du système. Dans notre configuration, le MES joue le rôle de gestionnaire des opérations, responsable de la configuration des processus, de la planification des processus et de la surveillance du système. Alors que les robots sont responsables de la gestion des différents magasins en ce qui concerne la disponibilité et le transfert. Le

système PLC est responsable des commandes automatiques des machines, les caméras embarquées sont chargées de confirmer la bonne exécution des commandes telles que l'ouverture des portes des machines. Les modules de traitement mis en œuvre sur la machine de calcul tels que le système d'inspection intelligent et le contrôle qualité ne sont pas supervisés que par le MES, mais ces modules de calculs échangent et partagent plutôt les informations traitées et les décisions prises localement avec le MES.

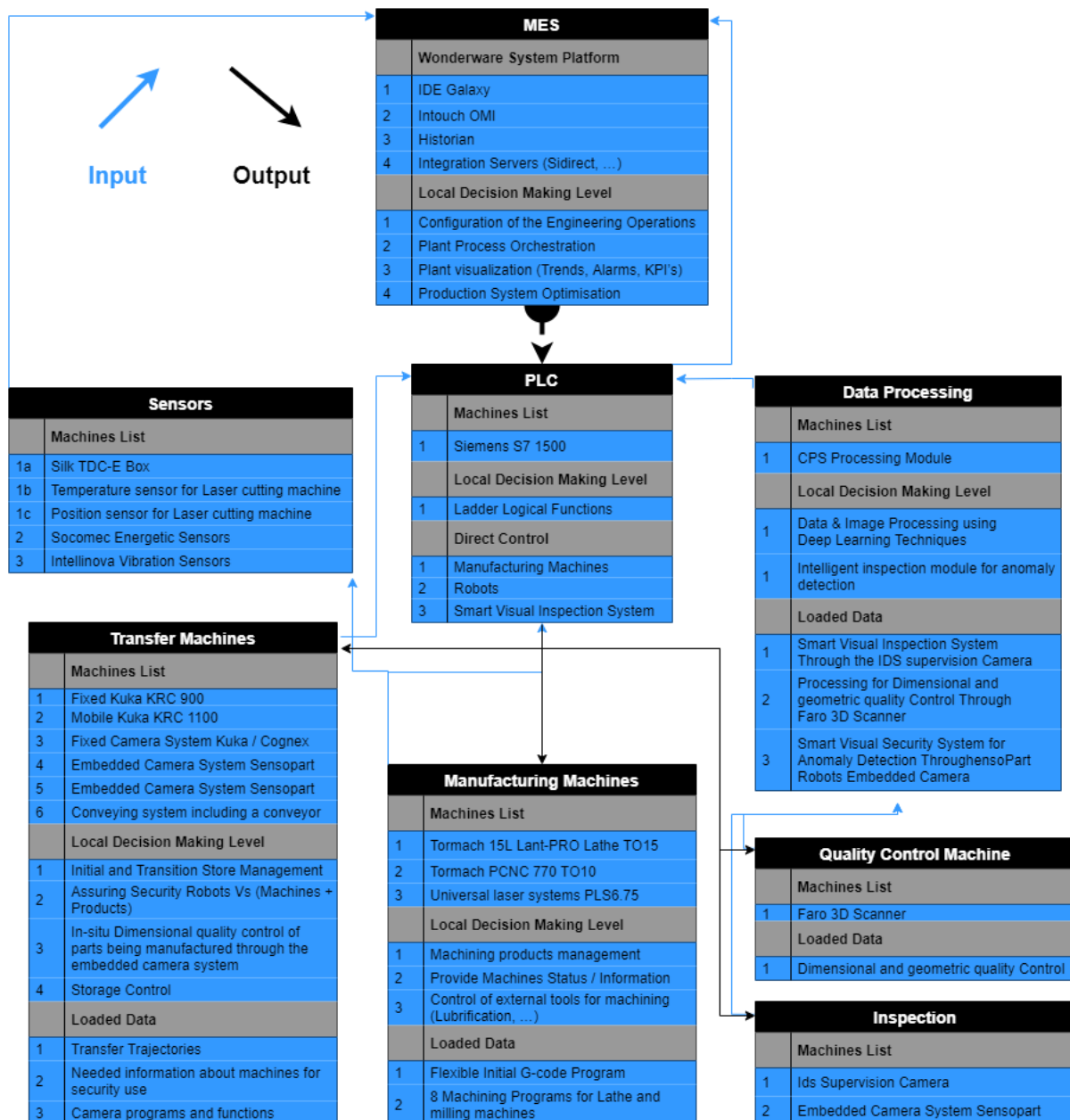


Fig. 19 Modèle basée sur le niveau de décision des machines de la plateforme industrielle 4.0

7.3.4 Synthèse

Le Framework basé sur le modèle conceptuel proposé contribue à considérer les différentes couches du système de production d'une entreprise et recommande des nouvelles modifications avancées afin d'assurer une évolution robuste vers la numérisation du système de fabrication. Ce Framework qui a été

bien appliqué à l'architecture traditionnelle existante de la plateforme et a contribué à évoluer l'architecture du système de fabrication notamment en assurant les fonctionnalités fixées en début de ce chapitre, la flexibilité le rendement en lead-time, la modularité, la décentralisation, et la portabilité.

La flexibilité des opérations et des processus de production a été bien évoqué dans la section 7.1.1 et 7.1.2. La nouvelle configuration des machines niveau atelier flexible ou shop floor qui est de transformer les machines en CPS aura un effet principal sur la flexibilité opérationnelle, suivie par la nouvelle configuration de la couche commande niveau SFCS. La flexibilité du système sera bien développée et démontrée dans les 2 sections suivantes en déployant une nouvelle configuration du programme de production. Enfin, l'application démonstrative présentée par la suite sera menée principalement pour justifier l'évolution de la flexibilité du système. En plus, l'application quantitative permettra de valider le rendement en lead-time notamment dans la phase d'industrialisation qui porte sur le développement d'un nouveau plan de production. La simplicité en termes de définition d'un nouveau plan de production et le gain en temps réalisé dans cette tâche est dû aussi à l'évolution de l'architecture du système ainsi qu'à la nouvelle configuration du programme de production implémentée ensuite. La modularité du système informatique expliquée dans la section 7.1.4 est dû à l'intégration d'une architecture de type SOA et l'intégration des modules de traitements d'images. La portabilité de l'IHM fait partie de ces modules informatiques implémentées dans le système sous forme d'une application informatique Intouch Access Anywhere qui déporte l'IHM de configuration et de commandes via le réseau 4G. La dimension de traitement de données se configure dans le fait d'intégrer les capteurs de vibrations installés sur le tour, de collecter les données générées afin d'être traitées par des modules algorithmiques à développer grâce à la prise en considération du niveau gestion de données intégrées. Finalement, la décentralisation des niveaux de décision de différentes entités du système de production a été bien présenté dans la section précédente

7.4 Une méthodologie de conception pour la configuration des processus modulaires

Le déploiement du Framework dans le cadre de l'intégration verticale et l'évolution de l'architecture du système de production nous a conduit à déployer une nouvelle configuration modulaire du programme de production. La contribution de cette section réside dans la mise en œuvre d'une nouvelle approche SFCS modulaire avancée où le processus de contrôle est mis à niveau vers le logiciel MES. Cette nouvelle approche impacte la pyramide de fabrication intégrée par ordinateur (CIM) classique, notamment en transférant la prise de décision et le contrôle de l'ordonnancement vers la couche MES plutôt que d'être empilés dans la couche de contrôle Programmable Logic Controller (PLC). Cette nouvelle configuration est rendue possible par l'utilisation de Wonderware System Platform WSP comme MES ("Wonderware System Platform - Fondation de l'Industrie du Futur," 2017), un logiciel SOA industriel avancé, ainsi qu'à l'intégration de nouvelles technologies telles que les robots avancés,

le scanner 3D pour le contrôle de la qualité et l'intégration de capteurs Iot et de systèmes de caméras embarquées. Cette approche modulaire vise à déployer le potentiel de la nouvelle architecture système sans changer l'ensemble du processus de contrôle existant mais en déplaçant le processus de prise de décision vers la couche MES grâce à l'implémentation d'une plateforme numérique avancée et interopérable.

Le potentiel du MES réside dans la capacité de créer facilement des programmes de production en utilisant des langages de programmation standard autorisés pour développer des scripts complexes, ce qui est très difficile à développer sur des contrôleurs logiques ou même parfois impossible. Les fonctionnalités visées par le déploiement de l'MES ou de cette plateforme numérique sont la gestion de la production y compris l'exécution des opérations de fabrication, et le management de la production y compris le pilotage des plans de production modulaires, en répondant aux exigences de qualité et de quantité des clients, et aux besoins fonctionnels du système en termes de maintenance et de management de flux. Cela permet d'aller plus loin dans l'optimisation des processus de production, ainsi de faciliter le développement pour les opérateurs et les ingénieurs de production sans avoir à effectuer de modifications en continu au niveau des contrôleurs logiques et de la couche de développement de l'atelier. Nous pouvons identifier deux cas principaux d'utilisation avec ce nouveau processus modulaire:

- Pour l'industrialisation d'un nouveau produit : la capacité à réduire les délais de mise sur le marché pour la production d'un nouveau produit en réutilisant les modules existants.
- Pour l'ordonnancement de la production : la capacité de lancer une nouvelle production sans perte de temps et de passer facilement d'une gamme à une autre.

La **Figure 20** présente l'organigramme de la méthodologie proposée discutée ci-dessous.

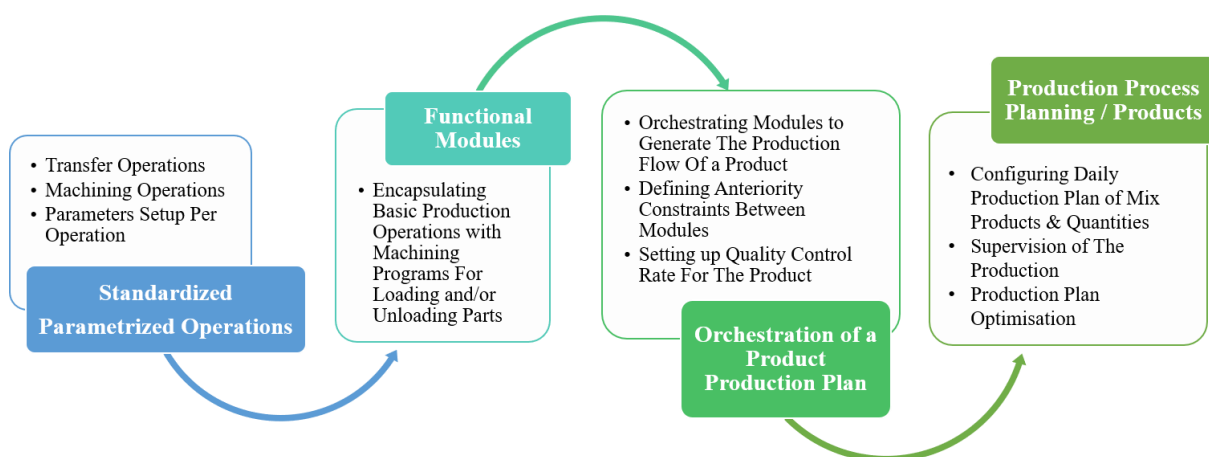


Fig. 20 Méthodologie de processus modulaire

La phase « Opérations paramétrées normalisées » est réservée à la définition des opérations de production de base pour un produit spécifique, encapsulées dans le MES. La mise en œuvre des

opérations de base dans le MES est organisée en deux étapes. La première se déroule sur des systèmes spécifiques à la machine, tels que les outils FAO dédiés à la génération des Gcode pour les machines d'usinage CNC. En effet, toutes les opérations nécessaires à un plan de production produit sont validées en amont. Vient ensuite la deuxième étape, qui consiste à préparer leur intégration dans le MES à travers une action d'encapsulation afin de les rendre compatibles avec son environnement opérationnel en s'appuyant sur des connaissances techniques avancées de la ligne de production. Un travail de codification spécifique est mis en place pour bien déployer les opérations d'usinage et de transfert dans les programmes de production niveau de l'MES. Par exemple, les opérations de transfert concernant les robots fixe et mobile sont définis par 33 trajectoires utilisables de manières individuels et combinées. Ces trajectoires de transferts sont développées pour couvrir les fonctions de transferts nécessaires entre les différentes zones de travail incluant les différents magasins et les différentes machines présentes à la plateforme.

Les modules « fonctionnels » ou « industrialisation » peuvent regrouper, dans un planning précis, plusieurs opérations de la phase précédente. Ces modules peuvent constituer une séquence d'opérations logiques de production dédiées à un produit spécifique. Pour diverses raisons, tout module doit pouvoir être simulé et exécuté. Par exemple, l'ingénieur peut développer un module de contrôle qualité spécifique M1 qui consiste à utiliser le Robot mobil RM pour transférer le composant et le déposer sur la plaque tournante du scanner 3D via l'opération RM_Drop_Scanner, et activer le scanner à l'aide de Scan_ProgX qui récupère le nuage de point et le compare au modèle 3D natif de la pièce X. Un autre module M2 sera créé pour sélectionner la pièce contrôlée et la transférer vers le magasin de transition intermédiaire TS en utilisant respectivement les opérations RM_Pick_Scanner et RM_Drop_TS, voir **Fig. 21**. Cette phase permet aux ingénieurs de production de préparer des modules fonctionnels en surmontant les problématiques d'interopérabilité, de programmation robotique, de contrôle scanner, etc., ce qui apporte un réel avantage de productivité.

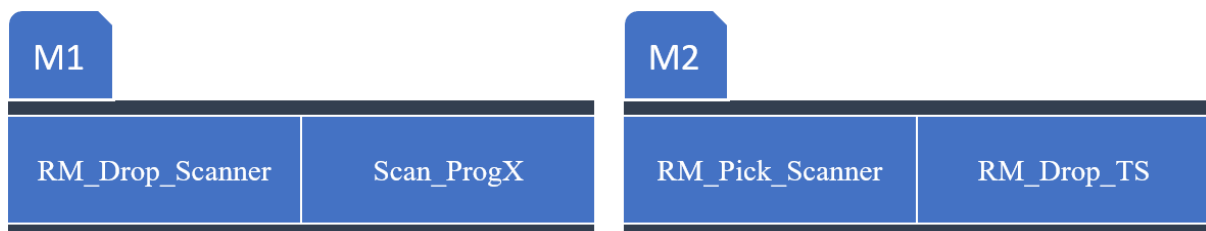


Fig. 21 Exemples de modules fonctionnels

La 3ème phase appelée "Orchestration du Plan de Production d'un Produit" est dédiée à la finalisation d'un plan de production pour un produit donné. Cette phase consiste à orchestrer les modules pour générer le flux de production d'un produit, définir les contraintes d'antériorité entre les modules, et mettre en place le contrôle qualité du produit. L'ingénieur de production rassemble tous les modules nécessaires

à l'exécution d'un ordre de fabrication donné et impose les contraintes d'antériorités inter-modules. Certains modules sont configurés, notamment les modules de contrôle qualité, qui doivent être activés proportionnellement au nombre de composants fabriqués. Dans cette phase, le MES doit proposer plusieurs options, la première consiste à prendre en compte les contraintes imposées entre les modules et à proposer tous les scénarios possibles d'ordonnement des modules de production pour un produit défini.

Enfin, la 4ème phase « Planification des processus de production » ou « pilotage » est une suite logique de la phase précédente. L'objectif ici est de préparer le lancement et l'exécution de la production et de s'assurer qu'elle est gérée en temps réel.

7.5 Application de l'approche modulaire mise en œuvre dans le programme de production

La plateforme est contrôlée via Wonderware System Platform WSP - produit Schneider («Wonderware System Platform - Fondation de l'Industrie du Futur», 2017), où sont collectées les alarmes, les tendances et toutes les données des machines et capteurs **Fig. 22**. La ligne de production, grâce au déploiement de l'intégration verticale et la nouvelle architecture flexible, est capable de produire différents produits et de piloter différents plans de fabrication.

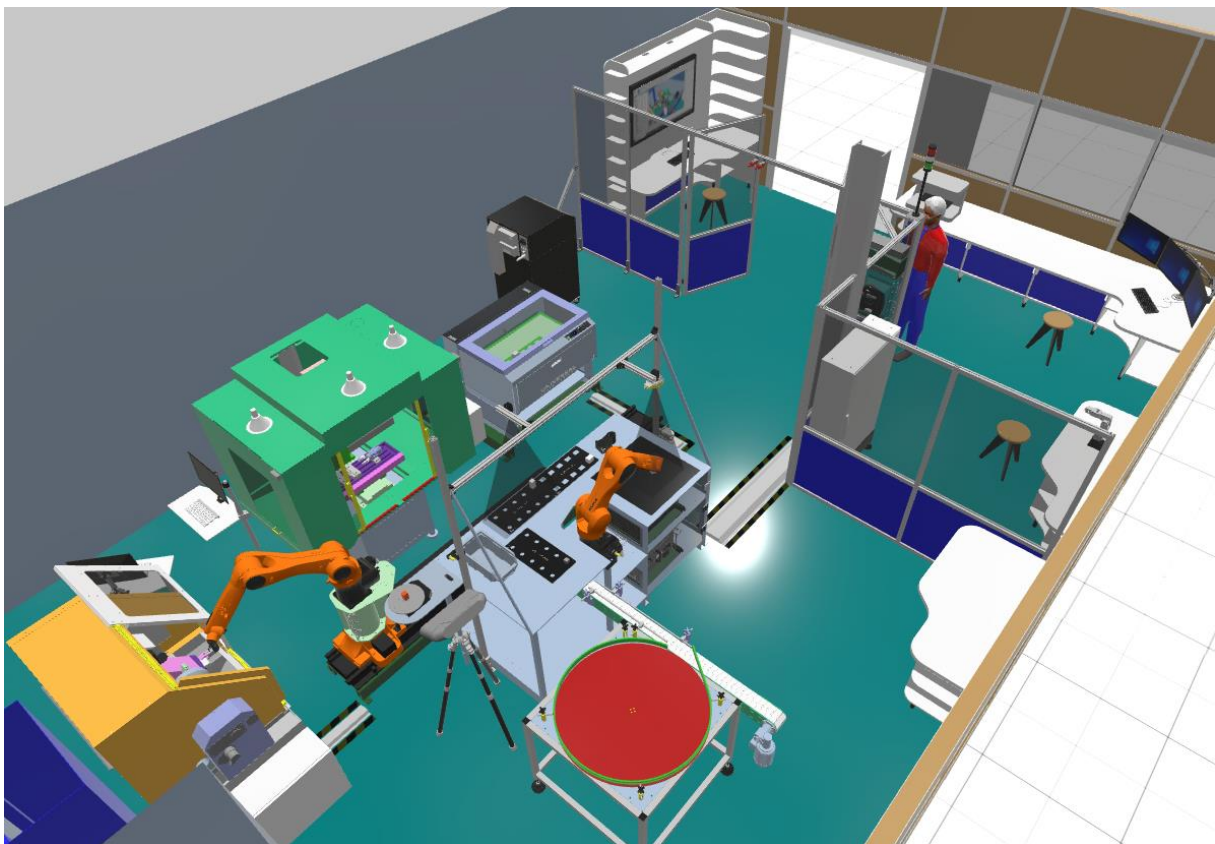


Fig. 22 Modèle 3D de la plateforme 4.0 de l'ENSAM de Paris

7.5.1 Opérations paramétriques standardisées

Grâce à la configuration flexible des machines dans l'atelier, le développement des opérations paramétriques standardisées devient possible. Plusieurs opérations paramétriques configurées ont été créées représentant l'ensemble des opérations de production adaptées au potentiel de notre plateforme industrielle 4.0. La dimension paramétrique exprime une variabilité qui permet à l'opération de s'adapter au contexte, en particulier à la variabilité des composants fabriqués. Les opérations peuvent être définies de différentes manières, tout dépend de la standardisation recherchée. En ce qui concerne notre plateforme, nous avons choisi de regrouper les opérations en 4 catégories, résumées dans la première colonne du **Tableau. 2**. L'intérêt ici est d'identifier toutes les opérations nécessaires à la fabrication, aux contrôles, aux transferts, à l'assemblage, etc. qui permettent d'assurer la production d'un composant, à partir du stock initial jusqu'à la livraison du produit fini, et du produit contrôlé où il pourrait être récupéré à partir de la table d'accumulation. En d'autres termes, nous organisons les processus de production en opérations de production multi-tâches comme suit :

- Opérations de transfert entre machines et magasins (trajectoires des robots).
- Opérations d'usinage incluant les opérations d'usinage CNC (codes G pour les procédés d'usinage) et les opérations de découpe laser.
- Opérations de contrôle de la qualité, y compris les opérations de scanner 3D pour le contrôle de la qualité, et la qualité dimensionnelle des pièces fabriquées à l'aide d'une caméra embarquée au robot. L'opération principale de contrôle de la qualité dimensionnelle et géométrique est effectuée via le scanner 3D qui compare le nuage de points de la pièce contrôlée à son modèle natif. Une opération de contrôle de qualité dimensionnelle est réalisée par la caméra embarquée sur le robot mobile in situ pour les pièces en cours de fabrication avant récupération. Cette opération permet de détecter les écarts afin de réajuster la pièce fabriquée si possible avant la récupération.
- Surveillance des opérations à l'aide de caméras fixes et embarquées incluant les contrôles de sécurité, le stockage et les contrôles des anomalies. Le système de caméra fixe au-dessus du magasin initial et du magasin de transition aide au contrôle du stockage et à la gestion des pièces brutes et fabriquées. La caméra de supervision permet de surveiller la ligne de production en détectant toute présence humaine à proximité des robots pour alerter l'opérateur et mettre les machines en pause. Enfin, des contrôles de sécurité complémentaires sont effectués en complément grâce aux caméras embarquées sur les robots pour assurer la disponibilité d'un espace de travail pour déposer une pièce ainsi que l'ouverture des portes des machines pour éviter toute collision.

Tableau. 2 Opérations de production standards

operations	Functions	Materials
Transfer	Robotic transfer between the transition store and the machines	Kuka Agilus 1100
	Robotic transfer between machines and the 3D Scanner	Kuka Agilus 1100
	Robotic transfer between the transition store and accumulation table	Kuka Agilus 900
	Robotic transfer between initial and transition store	Kuka Agilus 900
Machining	Lathe Machining	Tormach
	Milling	Tormach
	Cutting - ULS	Universal Laser System
	Engraving - ULS	Universal Laser System
Quality	Dimensional and geometric quality	3D Scanner Faro
	Dimensional quality of parts being manufactured	Embedded Camera
Monitoring	Storage control	Fixed Camera
	Anomaly control	Supervision Camera
	Security control Robots vs Machines, Robots vs Parts	Embedded Camera

Certaines opérations peuvent nécessiter une configuration spécifique, notamment en ce qui concerne la flexibilité de la plateforme. Par exemple, la pince du robot en termes de course et de forme doit gérer différentes dimensions de pièce. En effet, la typologie des différents composants qui seront fabriqués suggère que l'on conserve la "pince" comme paramètre d'entrée pour transférer les programmes. Les trajectoires du robot pour le transfert et le chargement des machines sont créés comme des entités de trajectoire qui peuvent être assemblées et utilisées dans n'importe quel processus de production. Pour cela, nous avons défini des zones au sein de la plateforme, qui seront les points de départ et d'arrivée des trajectoires du robot. Ces points sont appelés points de bouclage et seront utilisés au début et à la fin de chaque trajectoire et garantiront que chaque trajectoire peut être effectuée avant ou après toute autre trajectoire. En effet, les chemins entre chacun de ces points de bouclage ont été testés pour éviter tout

risque de collision avec l'équipement de la cellule. Des trajectoires supplémentaires dédiées à des fonctions spécifiques ou à des questions de sécurité ont également été ajoutées, notamment des séquences de contrôle de sécurité de base, telles que le contrôle de l'ouverture des portes des machines vers lesquelles elles se dirigent. Les trajectoires choisies pour la programmation correspondent à chaque chemin possible reliant différentes zones **Fig. 23** et chaque machine.

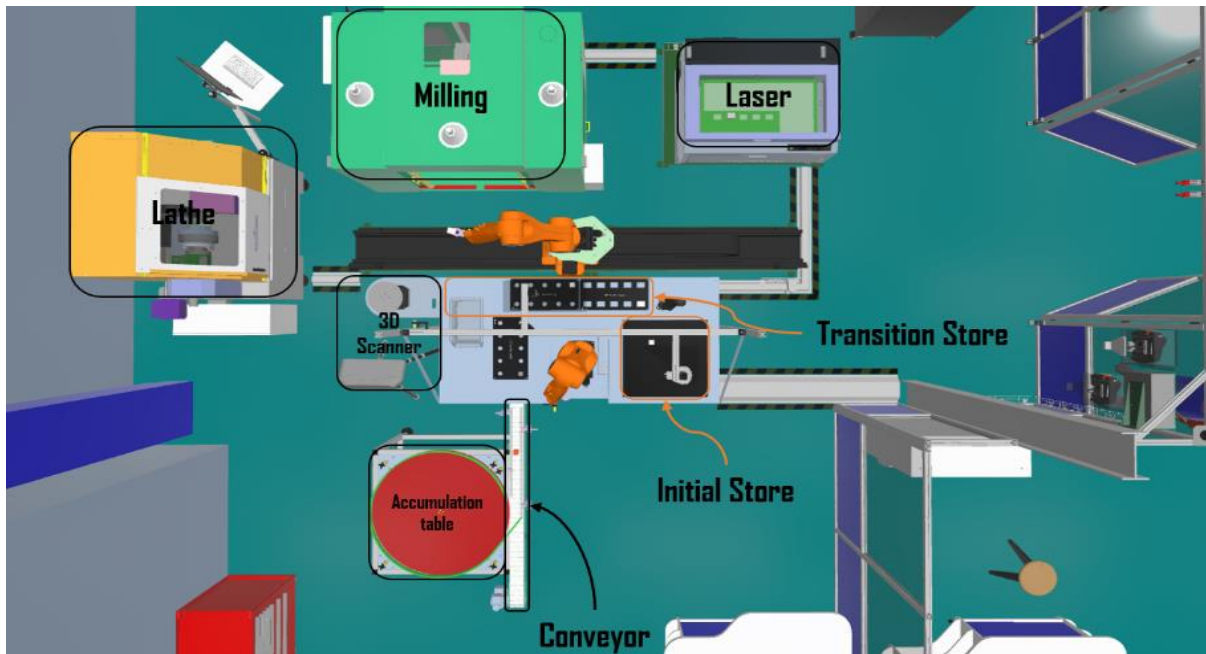


Fig. 23 Les différentes zones de la plateforme 4.0

Tableau. 3 illustre dans la deuxième colonne un exemple d'opérations de production standardisées qui peuvent être demandées dans différents programmes de production. La dernière colonne du tableau présente quelques paramètres dédiés aux opérations correspondantes. Une trajectoire de robot est paramétrée par l'ID de la pièce, le diamètre de la pièce, la hauteur de la pince du robot depuis le bas de la pièce et la vitesse du robot. L'opération d'usinage CNC est d'abord paramétrée par l'ID correspondant à la référence de sous-programme, la profondeur de coupe et la vitesse de coupe.

Tableau. 3 Exemples des opérations paramétriques

Machines	Operations	Description	Parameters
Robot K900	W_RF_Pick_InitStore	Pick the part from the Initial Store	ID, Ø, H, S
Robot K900	W_RF_Drop_TransStore	Drop the part in the Transition Store	ID, Ø, H, S
Robot K1100	W_RM_Pick_TransStore	Pick the Part from the Transition Store	ID, Ø, H, S

Robot K1100	W_RM_Drop_Tour	Drop the part to the Lathe	ID, Ø, H, S
Embedded Camera	W_RM_Control_Tour	Presence check of the part in the Lathe	ID, Ø, H, S
Tour Tormach	Prog_Tour_1	Turn On the referenced Lathe program	ID, D, S
Robot K1100	W_RM_Pick_Tour	Pick the part from the Lathe	ID, Ø, H, S
Robot K1100	W_RM_Drop_Scanner	Drop the part to the 3D Scanner	ID, Ø, H, S
Scanner FARO	Prog_Frao_1	Start Scanning (referenced part program)	Frequency %
Robot K1100	W_RM_Pick_Scanner	Pick the scanned part	ID, Ø, H, S
Robot K1100	W_RM_Drop_TransStore	Drop the part to the Transition Store	ID, Ø, H, S
Robot K900	W_RF_Pick_TransStore	Pick the part from the Transition Store	ID, Ø, H, S
Robot K900	W_RF_Drop_Conv	Drop the part to the final conveyor	ID, Ø, H, S

7.5.2 Modules

En effet, le MES transforme les opérations de production de base des machines interconnectées, robots, scanners, automates, actionneurs et capteurs, en modules qui encapsulent des programmes machine mais aussi des informations et des commandes liées à son environnement opérationnel. L'ingénieur de production et l'opérateur ont l'opportunité de créer des modules fonctionnels qui regroupent jusqu'à 6 opérations paramétriques standardisées. Cependant, et afin de mieux conserver la flexibilité du système et augmenter son autonomie, c'est potentiellement préférable de concevoir les modules en une opération d'usinage menée d'une opération de transfert pour alimenter ou récupérer la pièce de la machine et une opération de contrôle au maximum. Cette stratégie de la configuration des modules fonctionnels permet d'augmenter la flexibilité du système de production notamment par sa capacité à réorganiser le plan de production afin d'éviter la survenue d'événements indésirables sur la plateforme, et offre la possibilité d'une optimisation renforcée dans la phase d'ordonnancement des modules de production. Les contraintes préalables d'interopérabilité facilitent leur regroupement en un module ; ainsi, le paramétrage de certaines opérations est transféré au module qui renvoie la valeur du paramètre à l'opération concernée en phase de production.

On voit dans le **Tableau 4** que certains modules regroupent une seule opération, tandis que d'autres modules regroupent plus d'une opération pour diverses raisons. Nous distinguons trois catégories de

modules. La première catégorie considère les modules de transfert, qui peuvent regrouper une ou plusieurs opérations de transfert concernées par les robots. Les modules de transfert tels que le premier et le quatrième module répertoriés dans le tableau 4, concernent le transfert de pièces entre les machines et les différents magasins ainsi que les fonctions d'assemblage. Le deuxième type considère les modules de process concernés par les opérations d'usinage, la contrôle qualité et le contrôle de surveillance. Ces modules se veulent uniques et spécifiques à l'usinage d'un composant précis. De plus, les modules de process tels que le module "Usinage de tour - Pion" sont censés être indépendants des modules de transfert en termes de fonctionnalités afin d'améliorer la flexibilité du système et de libérer les robots pour effectuer d'autres tâches. D'autres modules de process ont des paramètres de pourcentage qui définissent la fréquence de la demande d'un module concernant une famille de produits telle que le module de contrôle de présence présenté dans le tableau 4. La dernière catégorie prend en compte les modules personnalisés. Cette catégorie permet à l'opérateur de développer un module personnalisé en regroupant plusieurs opérations de transfert et de process pour des besoins fonctionnels spécifiques.

La possibilité de créer de tels modules séparés, grâce au processus modulaire développé, offre au système de fabrication un niveau une flexibilité considérable puisque plusieurs modules pourraient être lancés en parallèle en fonction de la disponibilité des machines d'abord et de la gestion des files d'attente générée par le système de fabrication basé sur le critère d'optimisation (temps, consommation électrique, priorité machines, ...). Le travail de développement de ces modules nécessite des compétences multidisciplinaires en automatisation, robotique et usinage, d'où l'intérêt de ces travaux d'ingénierie, car une fois terminé, aucun développement supplémentaire ne sera plus nécessaire.

Tableau. 4 Exemple de modules fonctionnels de production

Modules	Operations	Module definitions	Settings
Raw transfer from initial stock to lathe	W_RM_Pick_TransStore		
	↳ W_RM_Drop_Tour		
Presence control	W_RM_Control_Tour	In-situ control of the presence of raw part	% de <i>n</i>
Machining lathe - Pawn	Prog_Tour_1	Start the machining program	Lathe
Machined part transfer to the transition store	W_RM_Pick_Tour	Get the machined part from the chuck and evacuate it to the accumulation table	<i>n</i>
	↳ W_RM_Drop_TransStore		

7.5.3 Orchestration du plan de production

La 3^{ème} phase de cette section est celle de la planification des modules de production pour obtenir un plan de production numérique et ainsi orchestrer les modules de production. Nous distinguons dans notre approche 3 versions de plans de production. Le primaire appelé "initial" qui prend en compte les contraintes précédentes entre les modules. Ce premier plan n'est pas bien optimisé puisqu'il vient enclencher les modules définis d'une façon séquentielle. La deuxième version du plan de production, dite « dynamique », devra être soumise aux contraintes de capacité de la plateforme 4.0 et aux disponibilités des machines. Par conséquent, le MES sera capable de piloter la production en exécutant plusieurs plans de production en parallèle en gérant le management des flux. Le système MES pourra planifier son exécution en tenant compte de la charge de production actuelle en gérant les flux d'attentes (Queuing Management). La 3^{ème} version du plan de production général consiste à optimiser les opérations d'usinages et de transferts en fonctions de temps, de cout ou d'énergie en se basant sur le traitement de données collectées des différents capteurs et des IoT superposées sur les machines. L'optimisation des différents processus de production peut être mono-objective qui minimise la consommation énergétique par exemple, ou multi-objective qui minimise le temps de la production tout en optimisant la consommation énergétique.

La **figure 24** illustre un plan de production pour un pion organisé en plusieurs scénarios de flux possibles. Le flux primaire transfère la pièce usinée du mandrin de tour au scanner 3D, active le scanner pour vérifier les écarts dimensionnels, puis la transfère du scanner au convoyeur. Le deuxième flux transfère la pièce usinée directement du mandrin de tour au convoyeur sans parcourir le scanner 3D. Ces flux alternatifs sont conditionnés par la fréquence de contrôle dimensionnel définie pour ce produit spécifique. Ces paramètres, contrôlés par le MES sont souvent fixes ou variés en fonction de l'évolution des écarts dimensionnels observés dans le temps. L'historisation des écarts dimensionnels des pièces usinées par rapport à leur modèle natifs CAO peut être une véritable source d'optimisation pour prendre en charge la production à une cadence optimale. En effet, le contrôle interne dynamique permet d'une part de limiter les interruptions de réglage et d'autre part de limiter le nombre de pièces rejetées pour non-conformités dimensionnelles et géométriques

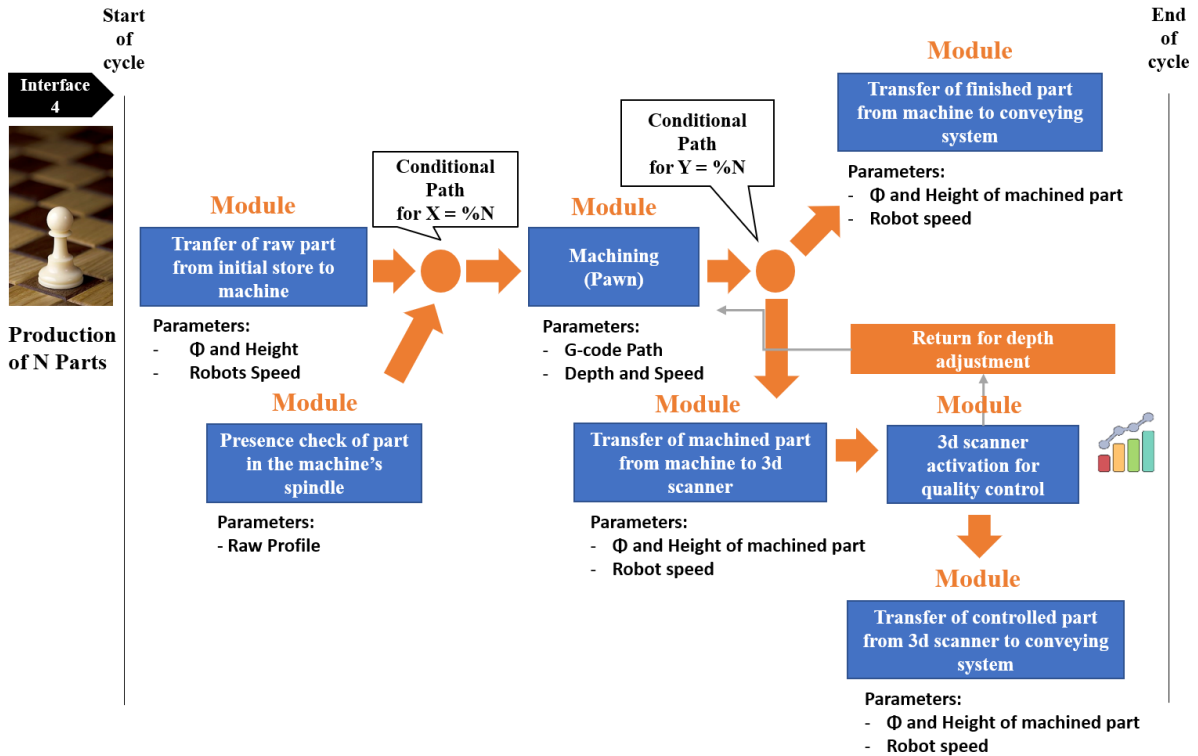


Fig. 24 Exemple d'un plan de production du pion

Enfin, le contrôle en temps réel des opérations et l'ordonnancement se font via une IHM développée via Wonderware System Platform WSP. Les applications logicielles WSP offrent une intégration améliorée et fournissent une plateforme de services d'applications industrielles commune et stratégique basé sur la technologie d'architecture orientée services SOA en temps réel, telle que le module IDE « ArchestrA » et le module IHM « OMI ».

Cette intégration fournit un environnement de développement pour MES, SCADA, IHM, historisation et autres applications de services de fabrication à l'aide d'une plateforme logicielle SOA unifiée. Ces nouvelles solutions logicielles unifiées sont conçues pour aider les fabricants à augmenter la capacité des actifs existants grâce à des optimisation dans l'exploitation des moyens (assets) ("Wonderware System Platform - Fondation de l'Industrie du Futur," 2017).

La **Figure 25** présente la version expérimentale de l'IHM pour tester la fiabilité du système de production. L'onglet présenté par cette figure est dédié à l'orchestration des modules composant le plan de production du produit.

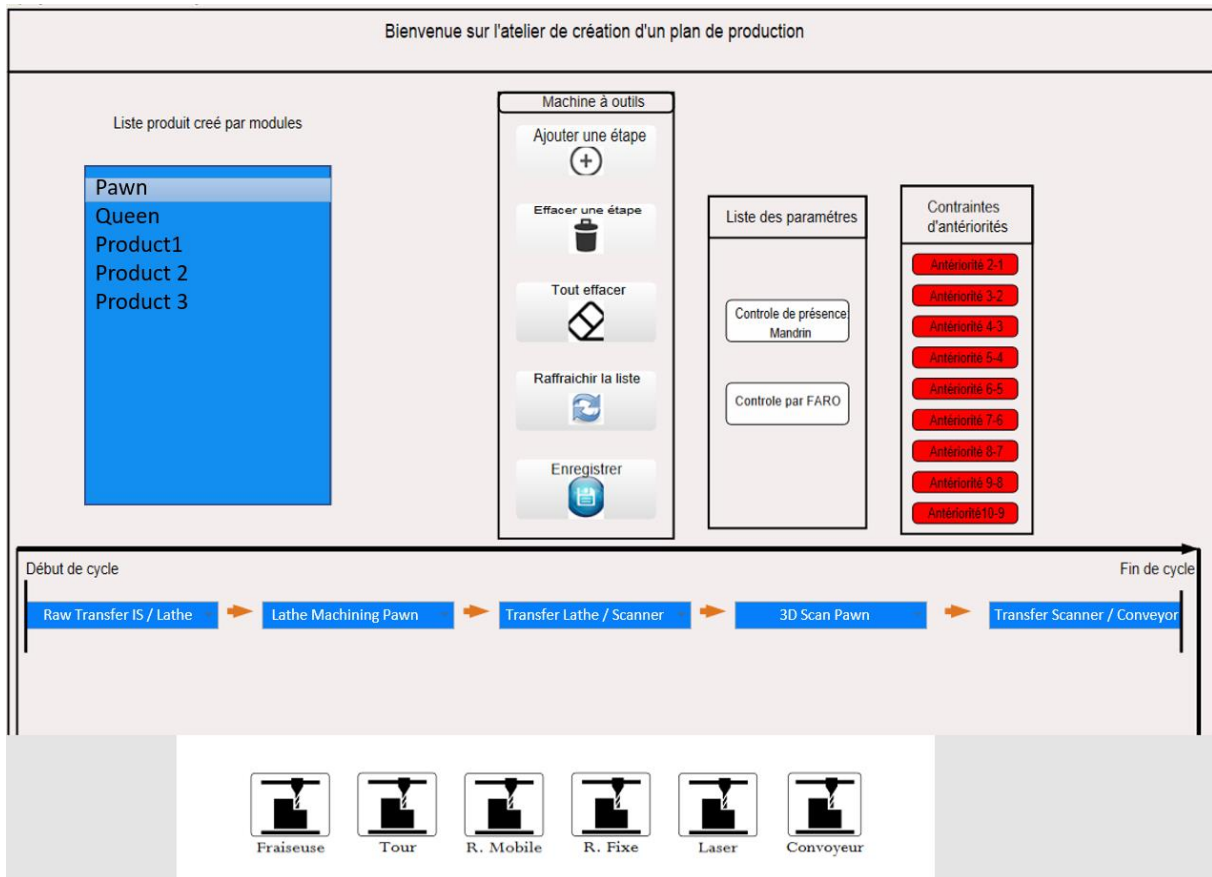


Fig. 25 IHM de production de la plateforme 4.0

7.5.4 Planification des processus de production

Les plans de production, sélectionnés et validés lors de la phase précédente, seront chargés et positionnés par ordre d'exécution prioritaire. Le MES gère la synchronisation des plans de production avec la charge de capacité de la plateforme.

Dans notre approche, la synchronisation se fait au niveau des modules, apportant la flexibilité opérationnelle à la flexibilité modulaire. Dans sa phase de préparation, le MES prend en compte le plan de charge de chaque machine, les arrêts programmés, les stocks, l'ordonnancement initial, la disponibilité des documents de référence, la constitution des lots, etc. équilibrage temporel des flux, des pannes, des écarts mesurés, des contingences, de la traçabilité et de la libération des lots, etc.

Pour cela, le MES développé ici sera doté d'un niveau d'autonomie et doit donc pouvoir prendre des décisions basées sur des données ascendantes presque en réel temps. Ainsi, la commande des modules, ou regroupement de modules, devient dynamique et sa mise à jour dépend d'une part de l'évolution de la situation en temps réel et d'autre part des aléas rencontrés.

7.6 Application démonstrative

A partir de la modélisation conceptuelle des systèmes de production numériques, un Framework d'intégration a été proposé pour augmenter la plateforme 4.0 de nouvelles fonctionnalités telles que la flexibilité, la modularité, la personnalisation, la décentralisation, et la portabilité. A cet effet, une nouvelle architecture de système a été déployée au niveau de la plateforme 4.0. Dans le cadre de cette expérimentation, une application qualitative est présentée dans cette section qui a pour objectif de valider les nouvelles fonctionnalités du système de production. Parmi les différentes fonctionnalités définis ci-avant, nous tenons à valider principalement la **flexibilité** du système de production ainsi que le **rendement en lead-time** pour la phase industrialisation et configuration du plan de production d'un nouveau produit ainsi que la phase d'exécution de la production. La validation de la flexibilité du système sera basée sur une comparaison fonctionnelle du système de production actuelle, proche du 4.0, avec l'ancien mode de fonctionnement 3.0, en proposant un référentiel d'appréciation quantitatif de la nouvelle performance.

Suite au développement de l'interface expérimentale, une phase de mise en service a été organisée pour vérifier le bon fonctionnement des opérations modulaires. Concernant les fonctions de transfert, toutes les combinaisons possibles ont été testées afin de valider le passage sécurisé et réussi des robots entre toutes les machines et les étapes / zones de production. En ce qui concerne les machines CNC, le G code flexible est testé aussi bien sur le tour que sur la fraiseuse. Le pilotage est confirmé par la possibilité de modifier la sélection du sous-programme (à partir d'une liste de 8 sous-programmes code G actifs sur la machine) correspondant à un produit spécifique.

Afin de valider l'architecture proposée et de la comparer à l'approche traditionnelle, plusieurs tests ont été menés par un groupe de stagiaires et d'étudiants en ingénierie de production. Le 1^{er} objectif des expérimentations menées est de valider la simplicité de la création d'un nouveau plan de production pour un nouveau produit commandé ainsi que les délais importants réservés en phase d'industrialisation pour configurer un plan de production. Le 2^{ème} objectif est de valider la fonctionnalité de la flexibilité de la nouvelle architecture de notre système de production en comparaison avec l'ancienne architecture. Pour cela, les expérimentations sont dirigées en deux étapes, considérant deux scénarii. Le 1^{er} scénario concerne la définition d'un nouveau plan de production d'un Pion « A ». Le 2^{ème} scénario concerne la réception d'une nouvelle commande d'un Pion « B » avec une variante dimensionnelle par rapport au pion « A », sachant que les pinces montées sur les deux robots fixe et mobile sont identiques et acceptent un intervalle de diamètre entre 20 et 35 mm. Le Pion « A » et le Pion « B » ont le même diamètre de base de 25 mm.

7.6.1 Etape n. 1 :

L'expérimentation est soutenue par une interface utilisateur créé sur l'IHM pour guider l'opérateur dans la configuration des opérations, des modules d'usinage et de transfert avec des descriptions et des annotations. Une pièce d'échecs 'Pion A' a été identifié pour être fabriquée et produite par la plateforme dans sa nouvelle configuration. L'ingénieur de production utilise l'IHM pour créer un nouveau produit appelé Pawn A. La première étape consiste à attribuer les différentes opérations de transfert nécessaires à la manipulation de la pièce par les robots, ainsi qu'à sélectionner les paramètres appropriés correspondant à la dimension de la pièce brute, sachant que toutes les opérations de transfert possibles sont déjà définies, répertoriées et bien indexées sur l'IHM. Concernant le paramétrage des opérations de transfert identifiés pour le Pion A sont identiques pour toutes les trajectoires, comme suivant :

- ID = 1001, l'identifiant 1001 a été assigné à ce Pion A qui désigne le produit numéro 1 de la série 1
- $\varnothing = 25$, le diamètre du Pion A est de 25 mm
- H = 5, la hauteur de la prise de la pièce entre la base de la pince et la base de la pièce est de 5 mm. Cette valeur correspond également à la hauteur de la prise en la récupérant du mandrin du tour, sachant que le mandrin porte la pièce à 3 mm de sa base
- S = 15%, correspondant à 15 % de la vitesse maximale des robots y compris les mouvements linéaires et Point to Point (PtP)

Concernant les opérations d'usinage, l'opérateur génère les programmes d'usinage sous forme de G-code correspondant au produit en fonction de son modèle 3D à travers une application FAO. Les programmes d'usinage créés et bien indexés sont importés vers le module IHM de l'MES et partagés par la suite avec les machines CNC en mettant à jour la liste des 8 sous-programmes actifs. Une fois les fonctions de transfert et les opérations d'usinage configurées et affectées au produit, l'opérateur génère des modules fonctionnels regroupant les opérations configurées comme expliqué précédemment. Ensuite, l'opérateur crée le plan de production comme présenté par la **Figure 24**, en ajoutant un ensemble de modules présentés par une zone de liste, et en orchestrant les modules générés sur la base du produit sélectionné. La dernière phase consiste à choisir le produit configuré dans l'interface du plan de production où l'opérateur peut ajouter la quantité requise du produit et lancer la production.

7.6.2 Etape n. 2 :

La 2^{ème} étape consiste à créer un nouveau plan de production d'un Pion B. Une fois le plan de production du Pion A est bien configuré, nous supposons à présent l'arrivée d'une nouvelle commande de type Pion « B ». Les deux pions demandés ont la même forme géométrique, cependant, le Pion B marque une différence de hauteur de 10 mm comparativement au Pion A, voire **Figure 26**. L'objectif de choisir les mêmes pièces avec des hauteurs différentes répond au besoin de changement que nous souhaitons

impulser dans le plan de production associé. Ce qui démontre de la capacité à répondre aux demandes personnalisées des clients. La hauteur du Pion A, $X1$ vaut 50 mm, tandis que la hauteur du Pion B, $X2$ vaut 40 mm. Par conséquent, la hauteur $Y1$ de la base cylindrique du pions A est de 8 mm et celle du Pion B est de 6.5 mm.

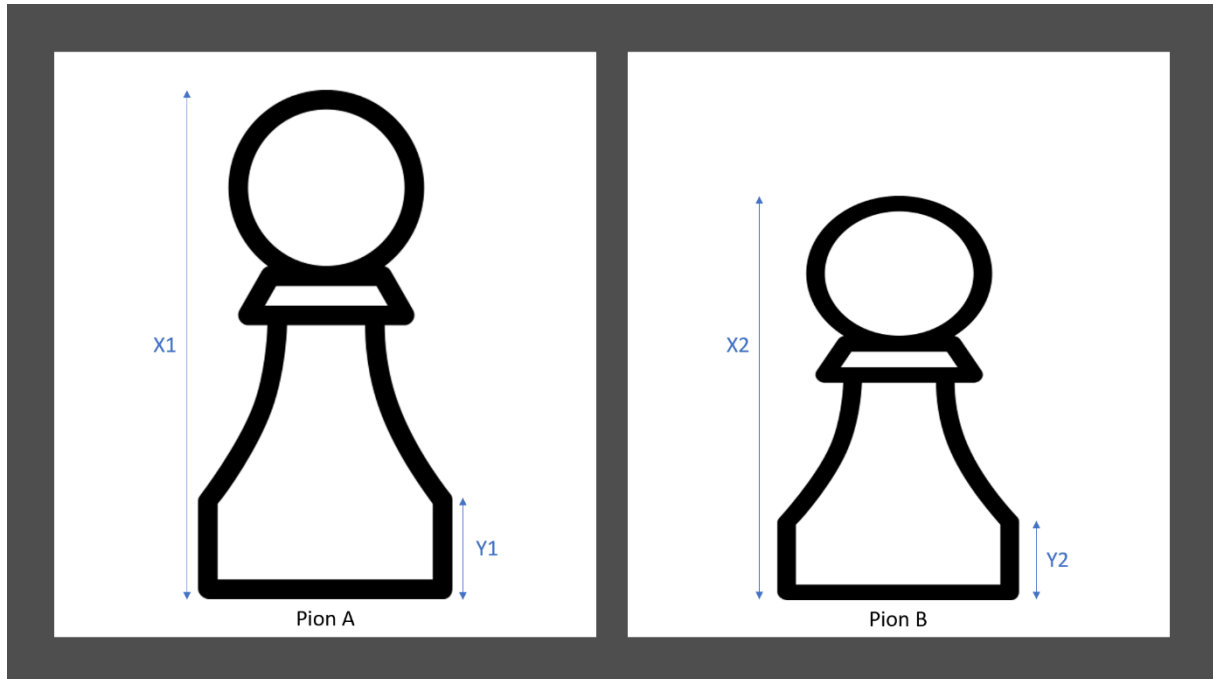


Fig. 26 Représentation dimensionnelle des commandes Pion A et Pion B

Une nouvelle tâche de création du plan de production du Pion B est requise au travers de l'IHM de l'MES développé. Les opérations de transfert requises pour l'usinage du Pion B sont les même que celles du Pion A :

- RF_Pick_InitStore : correspondant à la prise de pièce brut du magasin initiale par le robot fixe
- RF_Drop_TransStore : correspondant à placer la pièce brute dans le magasin intermédiaire toujours par le robot fixe
- RM_Pick_TransStore : correspondant à la prise de la pièce brute du magasin intermédiaire par le robot mobile
- RM_Drop_Lathe : correspondant à alimenter la pièce brute dans le mandrin du tour
- RM_Pick_Lathe : correspondant à récupérer la pièce usinée du mandrin du tour
- RM_Drop_TransStore : correspondant à retourner la pièce usinée dans le magasin intermédiaire
- RF_Pick_TransStore : correspondant à la prise de la pièce usinée par le robot fixe
- RF_Drop_Conv : correspondant à remettre la pièce usinée et finie sur le convoyeur des produits finis vers la table d'accumulation par le robot fixe

En revanche, les changements requis au niveau des opérations de transfert se trouvent dans les paramètres. En effet, le diamètre et la vitesse des robots restent identiques par rapport au Pion A, tandis

qu'un nouvel identifiant ($ID^2 = 2001$, pièce numéro 1 de la série numéro 2) du Pion B sera généré par l'MES et associé à ce nouveau produit, et un changement de la hauteur de prise sera requis spécifiquement pour la trajectoire RM_Pick_Tour (ID^2, \emptyset, H^2, S) qui récupère le Pion B usiné dans le tour. Puisque le mandrin tient la pièce sur une profondeur de 5 mm, la cote restante de la base cylindrique du Pion B sera de 1.5 mm, ce qui entraîne une difficulté de la prise de la pièce et un risque de faire tomber la pièce dans la machine. En conséquent, la hauteur de la prise de la trajectoire RM_Pick_Tour sera réajustée à la valeur 15 ($H^2 = 25$ mm), dans le but de récupérer le Pion B en tenant le corps de la pièce avec le profile sphérique en haut de la pièce. Par la suite, un deuxième g-code sera généré par l'outil FAO, importé à l'MES et envoyé directement au tour en mettant à jour la liste des programmes d'usinage actifs sur la machine. Le plan de production du Pion B sera créé en assemblant les modules fonctionnels de transfert et d'usinage en suivant la même logique du regroupement des opérations de base que le Pion A.

La dernière phase consiste à choisir les deux produits configurés Pion A et Pion B successivement dans l'interface de pilotage de la production. Le volume de production pour cette expérimentation est limité à pièce par produit. La production a été exécutée avec succès suivant le plan de production 'initial' correspondant à une exécution séquentielle automatique.

7.6.3 Référentiel de mesure proposé pour l'évaluation quantitative de la nouvelle performance :

En effet, la quantification pour ce type de projet est difficile à réaliser notamment les travaux d'intégration et de l'évolution des différents niveaux du système de production. A cet effet et afin de quantifier notre contribution, nous avons proposé un référentiel estimatif de comparaison des performances pour valider les fonctionnalités du système de production. Ce référentiel estimatif de comparaison considère principalement la **flexibilité** et le **rendement en lead-time** pour la phase industrialisation et configuration du plan de production d'un nouveau produit ainsi que la phase d'exécution de la production. Le **tableau 5** représente une estimation de mesure proposée pour pouvoir évaluer la nouvelle performance du système de production à la plateforme 4.0 en termes de flexibilité et de rendement en lead-time en comparant l'architecture évoluée en 4.0 avec l'approche traditionnelle 3.0.

Le référentiel de mesure proposé considère l'évaluation de 2 processus principaux :

- La création du plan de production d'un nouveau produit
- Le pilotage / exécution de la production

Tableau. 5 Référentiel de mesure proposé pour l'évaluation de la nouvelle performance

Processus	Taches	Sous taches	3.0	4.0	Unités de mesure
Création plan de production d'un produit	Configuration des opérations d'usinage	Génération G-code / FAO	Oui	Oui	-
		Paramétrages	Non	Oui	-
		Estimation temps	1h	2h	Heure
	Configuration des opérations de transfert	Génération des trajectoires robots	Oui	Non	-
		Paramétrages	Non	Oui	-
		Intervention roboticien	Oui	Non	\$
		Estimation temps	8h	1h	Heure
	Configuration des modules fonctionnels Orchestration du plan de production Planification des processus de production	Configuration	Oui (Equation de sorties + Graficets)	non	-
		Paramétrages	Oui Conditions de passage	Oui Paramétrages par produit	-
		Intervention automaticien	Oui	Non	\$
Estimation temps		8h	1h	Heure	
Pilotage	Usinage	Accès à distance	50%	80%	%
	Fonctions de transfert	Accès à distance	50%	90%	%
	Mise en service	Mise en service	Oui	Non	-
		Estimation temps	3h	2h	Heure
	Exécution	Exécution à distance	Oui	Oui	-
		Exécution Successive automatique	Non	Oui	-
		Possibilité d'optimisation globale	50%	80%	-
	Supervision et Traçabilité	Supervision	50%	99%	%
Traçabilité		50%	99%	%	

La création du plan de production d'un produit comprend des éléments de mesures qui concernent plusieurs taches :

- La configuration des opérations d'usinage consiste à générer les g-codes associés au produit ce qui est requis dans les 2 approches. L'estimation du temps requis pour effectuer cette tâche est correspondant à l'outil FAO utilisé en termes de simplicité et aux compétences de l'opérateur (estimé à une heure) ; tandis que la possibilité de paramétrage du programme d'usinage dans l'approche 4.0 marque un avantage par rapport à l'approche traditionnelle. La possibilité de paramétrer les programmes d'usinage dans l'approche 4.0 exige une tache supplémentaire d'encapsulation des programmes générés suivant un protocole bien défini. Le temps supplémentaire nécessaire pour effectuer cette configuration est estimé à 30mn
- La configuration des opérations de transfert consiste à générer les trajectoires robots associées à la fabrication d'un nouveau produit en tenant compte de ses spécifications dimensionnelles. Cette tâche est nécessaire à être effectuer dans l'approche traditionnelle vue du manque de

paramétrage des trajectoires possible, ce qui exige des coûts supplémentaires grâce à l'intervention d'un roboticien et des pertes de temps estimées à une journée de travail. Dans le cas d'un atelier 4.0 flexible, les trajectoires sont conçues pour servir une diversité de produits et sont disponibles avec une configuration flexible et paramétrique ce qui marque un avantage important par rapport à l'approche traditionnelle en termes de temps et de coûts.

- La configuration des modules fonctionnels ainsi que l'orchestration du plan de production d'un produit et la planification de la production sont regroupées dans la 3^{ème} tâche concernant la création du plan de production. La configuration de cette tâche est requise dans l'approche traditionnelle par le fait de créer des équations de sorties et des grafjets associées à un produit menées des conditions de passage en termes de paramétrages ce qui exige le besoin de l'intervention d'un automaticien marquant une majoration de coût et de temps estimé à une journée de travail pour la création des nouveaux programmes automatiques de la production. Dans la nouvelle architecture 4.0 il suffit d'effectuer ces configurations à travers l'IHM dédiée à la production sans le besoin d'un effort supplémentaire concernant la couche automatique et sans aucune modification requise pour la couche de commandes.

Le processus de pilotage comprend d'autres éléments de mesures qui concernent l'exécution de la production :

- L'accès à distance aux machines d'usinage et aux robots est limité à l'exécution automatique des machines à distance estimé à un taux d'accessibilité maximum de 50% dans l'approche traditionnelle, tandis que ce taux s'élève à 80% - 90% pour les machines d'usinage et les robots respectivement dans la nouvelle approche interopérable. Cette estimation s'est basée tout d'abord sur la possibilité de paramétrer les fonctions de transfert des robots et les programmes d'usinage grâce à la nouvelle configuration de ces machines, la possibilité de sélectionner et exécuter une liste de programmes échangés à distance avec les machines, et la création d'une base de données embarquée sur les robots qui gère les locations des produits à la plateforme et échange ces informations avec le système de production. Du point de vue fonctionnel, le fait d'évoluer les configurations machines / robots au niveau shop floor vers une configuration CPS tout en résolvant les contraintes d'interopérabilité comme expliqué dans la section 7.2.1 a contribué à améliorer le fonctionnement et le niveau d'accès des machines.
- La tâche mise en service est pré-requise à l'exécution de la production dans le cas de l'approche traditionnelle pour valider les nouveaux programmes automatiques développés et vérifier l'assignation des variables des entrées / sorties. Cette tâche est estimée à une demi-journée de travail supplémentaire et peut s'élever à une journée complète contre une heure de validation générale de fonctionnement des machines dans la nouvelle approche 4.0.

- L'exécution automatique à distance est désormais possible dans les 2 approches, mais l'exécution successive automatique de plusieurs produits n'est pas autorisée dans l'approche traditionnelle grâce à la nécessité du déploiement manuel des programmes automates produit par produit. La possibilité d'optimisation globale des processus de production marque une différence pour l'approche 4.0 estimée à un minimum de 80% grâce à la génération des données et la possibilité de les traiter.
- La supervision de la production et la traçabilité des produits sont estimées à 99% en mode 4.0 contre 50% dans l'approche traditionnelle, grâce à l'intégration de l'MES et l'échange de données générées des différentes postes de travail en cours de la production.

7.6.4 Analyse et discussion des résultats :

L'approche traditionnelle qui permet de générer un nouveau plan de production pour un nouveau produit consiste à créer toutes les opérations d'usinage et de transfert correspondantes (et parfois à partir de zéro) nécessaires à la fabrication du produit. Ensuite, un technicien ou un ingénieur de contrôle automatique est nécessaire pour attribuer des fonctions logiques aux opérations configurées et par conséquent créer un nouveau programme de contrôle / par produit, et le déployer sur le contrôleur / automate PLC, suivi d'une phase de mise en service.

En reprenant la 1^{ère} étape de l'application menée, la simplicité des différentes tâches et sous tâches, mesurées dans le référentiel, de la création et de la configuration d'un nouveau plan de production a été bien validée. En effet, la réalisation d'un nouveau plan de production en se basant sur l'ancienne architecture traditionnelle de la plateforme, nécessite tout d'abord le développement d'un nouveau programme au niveau de l'automate sous forme d'un grafcet qui vient déployer les différentes fonctions d'usinages et de transfert robotique, associées à un produit bien défini. Une phase de mise en service sera toujours exigeante afin de vérifier les assignations des variables logiques correspondantes aux différentes opérations, et de vérifier les nouvelles opérations configurées en termes de fonctionnement.

La 2^{ème} étape de l'application valide de nouveau la simplicité et la rapidité de la création d'un nouveau plan de production. Elle a mis en évidence la flexibilité de la nouvelle configuration du système de production au niveau Planification / Pilotage ainsi qu'au niveau shop floor. En réalisant le même scénario sur les deux produits Pion A et Pion B avec l'ancienne approche traditionnelle, trois dimensions techniques se rajoutent. La 1^{ère} dimension concerne la contrainte issue du besoin de récupérer la pièce usinée à une hauteur de prise spécifique au Pion B, et différente de celle de base configurée. Cette contrainte exige deux tâches techniques dans la configuration traditionnelle de la plateforme. La 1^{ère} tâche technique requise est tout d'abord la création d'une nouvelle trajectoire spécifique pour récupérer ce produit du tour qui reprend les mêmes déplacements de la trajectoire basique en changeant le point d'arrivée sur le mandrin de la machine en axe Z. La 2^{ème} tâche technique concerne l'assignation d'un

nouveau cycle code à cette trajectoire et son déploiement à travers la création d'une nouvelle fonction logique à implémenter dans le grafset correspondant à ce produit. Cette difficulté a été surmontée dans la nouvelle architecture de la plateforme en paramétrant les fonctions de transfert robotique. La 2^{ème} dimension technique concerne le besoin d'activer un nouveau programme d'usinage g-code sur le tour. Le chargement du nouveau g-code dans la machine était manuel, ainsi que sa sélection. Cette contrainte a été résolue grâce à l'interopérabilité déployée au niveau de la plateforme qui a facilité l'échange entre le MES et les différentes machines d'usinage. La 3^{ème} dimension considère le rôle avancé de l'MES dans la planification et le pilotage de la production d'une diversité de produit. Toujours en comparant l'application menée avec l'ancien fonctionnement de la plateforme, il fallait lancer le 1^{er} programme de production du Pion A qui figure dans le programme de l'automate, ensuite déployer le 2^{ème} programme de production du Pion 2 au niveau de l'automate et lancer le cycle de la fabrication du 2^{ème} produit simultanément. Le fait qui marque une flexibilité accrue dans la nouvelle architecture et un niveau de pilotage considérable en termes d'autonomie.

Les fonctions de transferts sont bien configurées et la conception flexible de ce système de production a bien fonctionné, donnant à l'opérateur la possibilité de piloter facilement le plan de production dans diverses configurations et combinaisons via une simple IHM sans aucun codage supplémentaire ni effort technique requis comme le montre le référentiel de mesures. Trois dimensions principales méritent d'être mentionnées en termes de comparaison de la nouvelle approche avec l'approche traditionnelle. Principalement les compétences techniques, y compris la dimension « complexité » et la dimension « gain de temps en phase d'industrialisation ». Dans la première dimension l'opérateur ou l'ingénieur de production n'a pas besoin d'avoir des compétences spécifiques en contrôle, robotique et autres domaines techniques pour la génération d'un nouveau plan de production, réduisant ainsi les coûts de l'intervention des intégrateurs externes. Le gain de temps est assuré en réduisant le temps de configuration nécessaire à la phase d'industrialisation et d'exécution de la production avec une estimation de 14 heures en moins. Ainsi, La réduction du temps réalisée est liée aussi à minimiser le besoin d'une phase de mise en service puisque la nouvelle approche est bien flexible et conçue en amont pour gérer une diversité de produits en tenant compte des capacités machines. La troisième dimension se concentre sur la flexibilité du système de production évolué. Cette flexibilité déployée dans le système, est due grâce à l'intégration du Framework et l'évolution des différentes couches de notre système de production y compris la couche shop floor mais aussi bien à l'évolution la couche de la commande, de pilotage et de planification.

Les travaux présentés dans cette section montrent que le MES joue un rôle important dans les processus de fabrication intelligents, et démontrent également que la notion de la flexibilité opérationnelle doit être prise en compte dans la phase de conception du système de production avancé, en particulier lorsque l'on travaille dans un système de fabrication plus complexe avec plus de machines, d'appareils et de capteurs. Le Framework réalisé a montré la pertinence de nos choix méthodologiques et de nos

orientations de recherche. Les perspectives en termes de développement consistent à développer l'autonomie de la fonction « pilotage » ainsi que déployer des algorithmes d'optimisation de production multicritères.

8. Résultats et discussion générale

L'intégration verticale prise en compte au niveau de la modélisation du programme de production ainsi que le Framework développé en se basant sur le concept de modélisation essentiel nous amènent dans la phase d'expérimentation par l'application d'une large gamme incluant différents niveaux du système de production. L'intégration réalisée à partir du Framework nous a conduit à étudier et à développer une nouvelle approche au niveau de la configuration du nouveau système de production à déployer. Cette configuration basée sur la flexibilité et la modularité assurées par la nouvelle architecture du système a contribué à différentes opportunités ouvertes compte tenu de l'organisation du système de production, de la planification des processus et de l'intégration améliorée des modules, ainsi que d'un déploiement avancé des technologies implantées.

Le travail effectué lors de cette thèse de doctorat est une nouvelle approche permettant une flexibilité accrue d'une ligne de production. Cela nous permet de contrôler facilement la fabrication de divers produits via une IHM plutôt que de reprogrammer les contrôleurs industriels normalement requis pour permettre un nouveau processus de fabrication de produit. La contribution de cette thèse se situe d'abord dans l'intégration réussie du système de production basé sur le modèle proposé et le Framework développé. Deuxièmement, le développement de cette approche flexible et modulaire basée sur plusieurs technologies avancées telles que la robotique avancée, les systèmes de caméras embarquées et les machines-outils flexibles, ainsi que la mise en œuvre d'une nouvelle architecture de contrôle qui consiste à faire évoluer le processus de prise de décision vers un système MES avancé et interopérable. Le fonctionnement de notre architecture a été testé avec succès. Malgré des difficultés d'interopérabilité, nous avons réussi à développer un système de reconfiguration de l'espace de production automatisé pour fabriquer une large gamme de produits à partir des mêmes matières premières.

Suite au développement de l'interface MES expérimentale, toutes les combinaisons possibles ont été testées, afin de valider le passage sécurisé des robots dans les différentes zones et réussi entre toutes les machines et les étapes de production. La conception modulaire de ce système de production a bien fonctionné, donnant à l'opérateur la possibilité de piloter facilement le plan de production dans diverses configurations et combinaisons via une simple IHM sans aucun codage supplémentaire ni effort technique. Cela valide des bénéfices considérables et intéressants au niveau de la flexibilité du système de production et un délai remarquablement réduit pour intégrer un nouveau produit au système de production dans la phase d'industrialisation.

Le nouveau module proposé pour un système visuel intelligent bien intégré dans le système d'exécution de fabrication ainsi que le module jumeau numérique contribuent à améliorer le système de production. Cette intégration est une contribution concrète qui peut être utilisée pour plusieurs applications et assurer l'optimisation du processus de production et du contrôle. Ces modules nous offrent de larges

opportunités pour développer différents modules parallèles pour le traitement des données et des images et les intégrer dans le système de fabrication afin d'améliorer et d'optimiser l'ensemble des processus de production.

Enfin, la dimension des données est bien prise en compte lors de la phase de développement. Cette intégration de la gestion des données en parallèle avec la nouvelle configuration flexible de la plateforme permettra la possibilité d'une auto-optimisation continue des processus de production à travers le traitement des données et l'exploitation à effectuer afin d'aboutir à une configuration dynamique de notre système de production.

En outre, et sur la base de la méthodologie développée, l'architecture proposée peut être appliquée à des autres systèmes de fabrication avec des exigences spécifiques impliquant des robots contrôlables et programmables jouant des fonctions de transfert. Les exigences spécifiques susmentionnées concernent tout d'abord le degré de flexibilité des machines en atelier et leur capacité à effectuer des opérations multiples à partir d'un nombre limité de ressources. La flexibilité des machines nécessite au moins de résoudre des problèmes tels que l'interopérabilité, l'accessibilité ou l'accès à distance aux machines, et permettre une configuration flexible du processus d'usinage en termes de capacité dimensionnelle pour réaliser une marge de pièces, et en termes de paramétrisation. Deuxièmement, une attention particulière doit être portée à la configuration des fonctions logiques au niveau de la couche API en tenant compte de la flexibilité opérationnelle des machines. Troisièmement, la plateforme MES numérique développée ou adaptée pour jouer le rôle de système PPC de planification et de contrôle de la production doit faire face aux nouveaux défis créés par l'industrie 4.0. Le MES doit devenir logiquement décentralisé et composé d'objets découplés ou d'applications avec un service externe chargé du couplage des machines connectées et du CPS. Enfin, il convient de mentionner que l'application de la méthodologie de conception proposée doit être guidée par une nouvelle vision de la configuration de l'atelier en tenant compte des fonctionnalités attendues du système de production. Nous pensons que notre travail est une base qui peut être déployé aux niveaux des entreprises de fabrication manufacturière, notamment pour les petites et moyennes entreprises, en particulier lorsque la flexibilité opérationnelle joue un rôle important dans un marché en constante évolution.

En termes de limitations, nous distinguons deux axes qui les catégorisent : les limitations scientifiques de recherche et les limitations techniques concernant le développement et les travaux expérimentales. Concernant les limitations de recherche, une attention spécifique au principe des systèmes multi-agent pourra enrichir ce travail de recherche. D'une autre part, la définition des compétences requises pour la numérisation des systèmes de fabrication ainsi que la réalisation d'une synthèse de l'évolution des métiers dans le contexte de l'industrie 4.0 pourra améliorer ce travail. En ce qui concerne les limitations expérimentales, il faut citer au tout début que la réalisation des travaux d'intégration et le déploiement

de la nouvelle architecture est un challenge principal en termes de gestion de projet d'intégration. Le fait de générer une feuille de route à partir de cette démarche expérimentale devra être bien apprécié.

9. Conclusion et perspectives

Les futurs systèmes de fabrication doivent être plus flexibles et intelligents afin de répondre aux demandes des clients et du marché. L'industrie 4.0 permet d'amener le monde industriel à un niveau avancé de personnalisation de masse de produits et permettant un niveau élevé de la fabrication numériques. Pour bien gérer la transition numérique, plusieurs étapes de développement sont nécessaires, des technologies innovantes doivent être intégrées et l'entreprise doit faire face à un large éventail de défis affectant différents composants de la structure de l'entreprise. Le défi principal est de savoir comment guider les entreprises dans l'évolution de l'Industrie 3.0 vers le 4.0. L'objectif de cette thèse est de proposer un Framework de transition basée sur un modèle approprié pour aider les entreprises à réussir la transformation numérique des systèmes de fabrication **Fig. 27**. Ce Framework prend en considération trois axes principaux **le système de production, y compris le système de contrôle de l'atelier SFCS, les machines et technologies avancées, et enfin le traitement et le déploiement des données.**

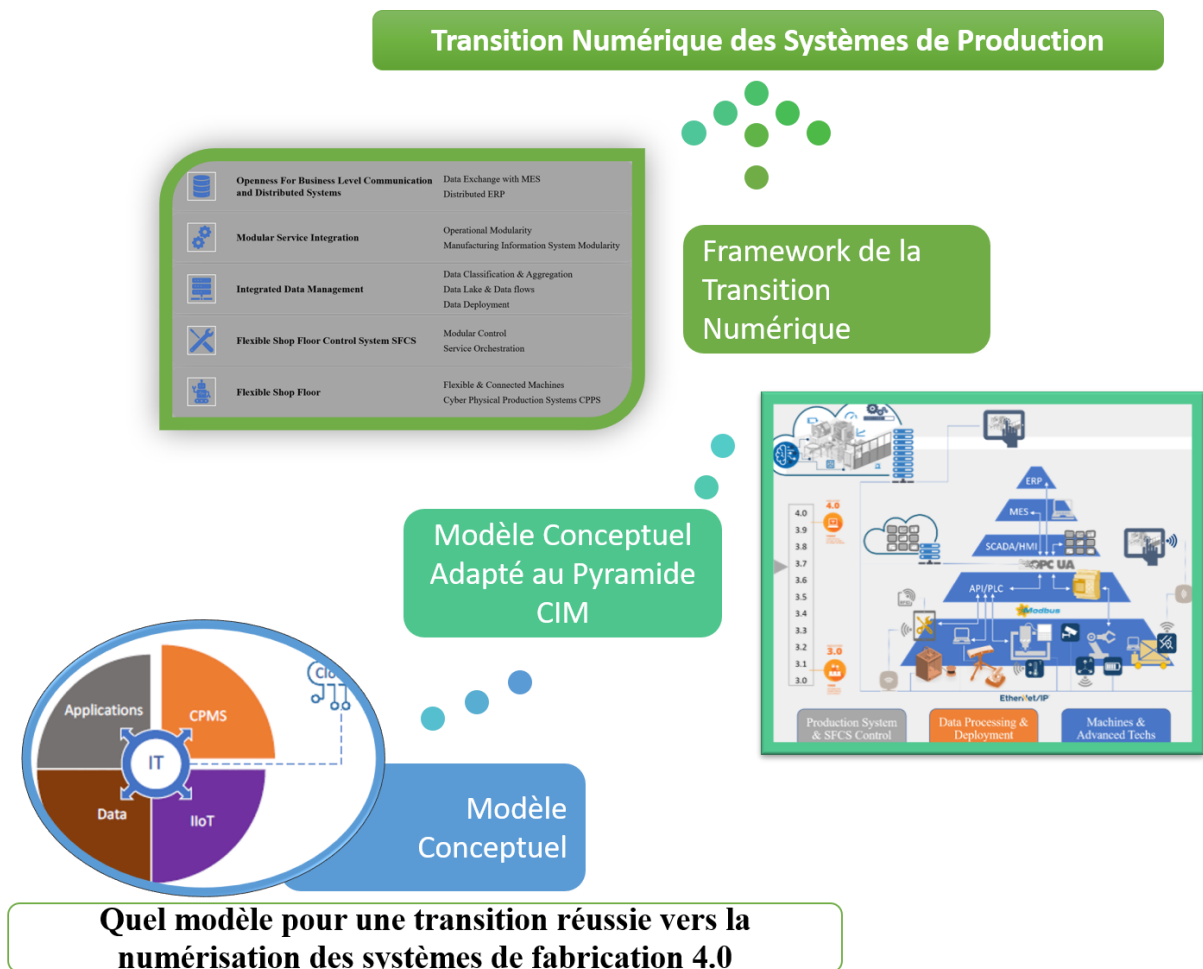


Fig. 27 Apport scientifique de la présente thèse de doctorat

Dans cette thèse, une étude bibliographique détaillée a été menée sur l'industrie 4.0 et la numérisation des systèmes de fabrication pour les entreprises de production. La définition et le concept de l'industrie 4.0 sont présentés, ainsi que les changements et avantages affectant le secteur manufacturier en transformation numérique. Les axes de recherche sont bien définis et un résumé des tendances, principes et fonctionnalités technologiques de l'Industrie 4.0 ont été fournis. De plus, les modèles d'intégration existants ont été présentés et les défis auxquels sont confrontées les entreprises à l'ère de l'Industrie 4.0 sont bien discutés, afin de répondre à notre problématique de recherche centrale :

Quel modèle pour une transition réussie vers la numérisation des systèmes de fabrication 4.0 ?

En conséquence, l'hypothèse du doctorat a été identifiée comme **l'évolution des systèmes de production vers l'Industrie 4.0 nécessite d'agir sur trois axes principaux : le système de production, y compris le système de contrôle de l'atelier SFCS, les machines et les technologies avancées, et le traitement et le déploiement des données.**

Cette proposition s'appuie sur la littérature, les défis et problématiques de recherche connexes abordées dans le cadre d'un projet de recherche global porté par K. Benfriha, qui nous a proposé un nouveau modèle conceptuel qui permet de décrire d'une manière générique un système de production 4.0. Le modèle proposé est ensuite déployé sur un système de production conventionnel existant (plateforme 4.0) afin d'identifier les évolutions requises et de définir en conséquence le Framework de transition concernant les actions à entreprendre pour l'objectif d'intégration numérique. La conception d'une nouvelle architecture d'intégration vers la transition de la fabrication numérique est introduite. Le Framework proposé contribue à considérer les différentes couches du système de production d'une entreprise et recommande des modifications innovantes et avancées afin d'assurer une évolution robuste vers la numérisation du système de fabrication. Ce Framework est bien appliqué à une architecture traditionnelle existante implémentée sur la plateforme industrielle 4.0.

Finalement, une application démonstrative a été menée, au niveau la plateforme industrielle 4.0 des Arts et Métiers, afin de valider la nouvelle architecture du système de production facilitant la transition numérique vers l'Industrie 4.0. Cette architecture a permis l'émergence de nouvelles fonctionnalités avancées telles que la flexibilité, et le rendement en lead-time.

Plusieurs autres travaux de recherche et de développement sont identifiés comme perspectives. Sur la base du développement mentionné ci-dessus, nous constatons que la configuration du système de production définissant la planification des processus doit être prise en considération avec le système flexible évolué dans la phase de conception de l'MES ou de la plateforme numérique responsable de la planification et de pilotage. La conception du programme de production est un domaine distinct de recherche et de développement, ainsi une attention particulière doit y être accordée dans le contexte de l'Industrie 4.0. La planification des processus dans le système de production numérisé est une tendance

cruciale et a un lien étroit avec le Lean 4.0, en particulier lorsque l'on considère les aspects logistiques intelligents.

De plus, les développements ultérieurs se concentreront sur les opportunités d'optimisation par rapport aux critères de temps, de coût et de consommation d'énergie grâce à des capteurs intégrés déjà montés sur les machines. La dimension data mining et la possibilité d'avoir une auto-optimisation continue des processus de production grâce au traitement des données activé est une piste riche de recherche. Suite à la configuration flexible du système de production, le data mining contribue à bien quantifier et profiter de la numérisation des processus de fabrication et valoriser les performances et les fonctionnalités visées des systèmes de production 4.0.

Enfin, il est nécessaire d'exprimer la nécessité d'une approche multidisciplinaire dans les projets de ce type. La transition vers l'Industrie 4.0 est le paradigme de l'intersection de multiples domaines d'expertise et de compétences en ingénierie. Capitaliser les connaissances et les compétences requises de chacun de ces domaines pour transformer l'industrie est, à notre avis, l'un des enjeux majeurs.

References

- Bajic, B., Cosic, I., Lazarevic, M., Sremcevic, N., Rikalovic, A., 2018. Machine Learning Techniques for Smart Manufacturing: Applications and Challenges in Industry 4.0 11.
- Benfriha, K., 2020. Conception, Modélisation, Architecture, Technologie et Pédagogique (Mémoire HDR). ENSAM Paris.
- Bloch, H., Hensel, S., Hoernicke, M., Stark, K., Menschner (né Hahn), A., Fay, A., Urbas, L., Knohl, T., Bernshausen, J., 2018. State-based control of process services within modular process plants. *Procedia CIRP* 72, 1088–1093. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.03.037>
- Block, C., Lins, D., Kuhlenkötter, B., 2018. Approach for a simulation-based and event-driven production planning and control in decentralized manufacturing execution systems. *Procedia CIRP* 72, 1351–1356. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.03.204>
- Bodrow, W., 2017. Impact of Industry 4.0 in service oriented firm. *Adv. Manuf.* 5, 394–400. <https://doi.org/10.1007/s40436-017-0196-3>
- Bonnard, R., Vieira, K.M.M., Arantes, M.D.S., Lorbieski, R., Nunes, C., Mattei, A.P., 2019. A BIG DATA / ANALYTICS PLATFORM FOR INDUSTRY 4.0 IMPLEMENTATION IN SMEs 10.
- Borangiu, T., Trentesaux, D., Thomas, A., Leitão, P., Barata, J., 2019. Digital transformation of manufacturing through cloud services and resource virtualization. *Computers in Industry* 108, 150–162. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2019.01.006>
- 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>
- El Zant, C., Charrier, Q., Benfriha, K., Le Men, P., 2021. Enhanced Manufacturing Execution System “MES” Through a Smart Vision System, in: Roucoules, L., Paredes, M., Eynard, B., Morer Camo, P., Rizzi, C. (Eds.), *Advances on Mechanics, Design Engineering and Manufacturing III, Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer International Publishing, Cham, pp. 329–334. https://doi.org/10.1007/978-3-030-70566-4_52
- Erol, S., Schumacher, A., 2016. Strategic guidance towards Industry 4.0 – a three stage process model 8.
- 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>
- Ghobakhloo, M., 2018. The future of manufacturing industry: a strategic roadmap toward Industry 4.0. *Jnl of Manu Tech Mnagmnt* 29, 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>
- Gorecky, D., Weyer, S., Hennecke, A., Zühlke, D., 2016. Design and Instantiation of a Modular System Architecture for Smart Factories. *IFAC-PapersOnLine* 49, 79–84. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.12.165>
- Gürdür, D., El-Khoury, J., Seceleanu, T., Lednicki, L., 2016. Making interoperability visible: Data visualization of cyber-physical systems development tool chains. *Journal of industrial information integration*, 4, 26-34.
- Henning, K., Wolfgang, W., Johannes, H., 2013. Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0. Final report of the Industrie, 4, 82.
- Hermann, M., Pentek, T., Otto, B., 2016. Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios, in: 2016 49th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS). Presented at the 2016 49th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS), IEEE, Koloa, HI, USA, pp. 3928–3937. <https://doi.org/10.1109/HICSS.2016.488>
- Jasperneite, J., 2012. Was hinter Begriffen wie Industrie 4.0 steckt. *Computer & Automation*, 19.
- Jung, J.Y., 2002. Manufacturing cost estimation for machined parts based on manufacturing features. *Journal of Intelligent Manufacturing*, vol. 13(4), pp. 227-238.
- Kamble, S.S., 2018. Sustainable Industry 4.0 framework: A systematic literature review identifying the current trends and future perspectives. *Process Safety and Environmental Protection* 18.
- Kamble, S.S., Gunasekaran, A., Gawankar, S.A., 2018. Sustainable Industry 4.0 framework: A systematic literature review identifying the current trends and future perspectives. *Process Safety and Environmental Protection* 117, 408–425. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.05.009>
- Karnouskos, S., Colombo, A.W., Jammes, F., Delsing, J., Bangemann, T., 2010. Towards an architecture for service-oriented process monitoring and control, in: IECON 2010 - 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society. Presented at the IECON 2010 - 36th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics, IEEE, Glendale, AZ, USA, pp. 1385–1391. <https://doi.org/10.1109/IECON.2010.5675482>
- Kaushal, A., Vardhan, A., Rajput, R.S., 2016. Flexible Manufacturing System A Modern Approach To Manufacturing Technology 8.
- Khan, W.Z., Rehman, M.H., Zangoti, H.M., Afzal, M.K., Armi, N., Salah, K., 2020. Industrial internet of things: Recent advances, enabling technologies and open challenges. *Computers & Electrical Engineering*, 81, 106522.
- Kumar, K., Zindani, D., Davim, J.P., 2019. Process Planning in Era 4.0, in: *Industry 4.0, SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology*. Springer Singapore, Singapore, pp. 19–26. https://doi.org/10.1007/978-981-13-8165-2_2

- Lasi, H., Fettke, P., Kemper, H.G., Feld, T., Hoffmann, M., 2014. Industry 4.0. *Business & information systems engineering*, 6(4), 239-242.
- Lin, Y., Lan, C.-B., Huang, C.-Y., 2019. A Realization of Cyber-Physical Manufacturing Control System Through Industrial Internet of Things. *Procedia Manufacturing* 39, 287–293. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.01.449>
- Lina, Y.J., Lana, C.B., Huang, C.Y., 2019. A Realization of Cyber-Physical Manufacturing Control System Through Industrial Internet of Things Through Industrial Internet of Things. Presented at the 25th International Conference on Production Research Manufacturing Innovation: Cyber Physical Manufacturing Cyber Physical Manufacturing, Chicago, Illinois (USA).
- Mes, M., Gerrits, B., 2019. Multi-agent Systems, in: Zijm, H., Klumpp, M., Regattieri, A., Heragu, S. (Eds.), *Operations, Logistics and Supply Chain Management, Lecture Notes in Logistics*. Springer International Publishing, Cham, pp. 611–636. https://doi.org/10.1007/978-3-319-92447-2_27
- Moeuf, A., 2018. The industrial management of SMEs in the era of Industry 4.0. *International Journal of Production Research* 20.
- Mourtzis, D., Vlachou, E., Xanthopoulos, N., Givehchi, M., Wang, L., 2016. Cloud-based adaptive process planning considering availability and capabilities of machine tools. *Journal of Manufacturing Systems* 39, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2016.01.003>
- Ollinger, L., Abdo, A., Zühlke, D., Heutger, H., 2014. SOA-PLC – Dynamic Generation and Deployment of Web Services on a Programmable Logic Controller. *IFAC Proceedings Volumes* 47, 2622–2627. <https://doi.org/10.3182/20140824-6-ZA-1003.02189>
- Rojko, A., 2017. Industry 4.0 Concept: Background and Overview. *Int. J. Interact. Mob. Technol.* 11, 77. <https://doi.org/10.3991/ijim.v11i5.7072>
- Rüßmann, M., Lorenz, M., Gerbert, P., Waldner, M., Justus, J., Engel, P., Harnisch, M., 2015. Industry 4.0: The Future of Productivity and Growth in Manufacturing 20.
- Santos, C., Mehrsai, A., Barros, A.C., Araújo, M., Ares, E., 2017. Towards Industry 4.0: an overview of European strategic roadmaps. *Procedia Manufacturing* 13, 972–979. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.09.093>
- Schierholt, K., 2001. Process configuration: Combining the principles of product configuration and process planning. *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing: AIEDAM* 15, 411–424.
- Schlapfer, R.C., Koch, M., Merkofer, P., 2015. Industry 4.0 Challenges and solutions for the digital transformation and use of exponential technologies.
- SenTryo, 2017. The 4 industrial revolutions [WWW Document]. URL <https://www.sentryo.net/the-4-industrial-revolutions/> (accessed 6.17.19).

- Strategy&, 2015. Small automation, big benefits [WWW Document]. PwC. URL <https://www.strategyand.pwc.com/gx/en/functions/technology-strategy/big-benefits.html> (accessed 3.5.20).
- Sung, T.K., 2018. Industry 4.0: A Korea perspective. *Technological Forecasting and Social Change* 132, 40–45. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2017.11.005>
- 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>
- Thames, L., Schaefer, D., 2016. Software-defined cloud manufacturing for industry 4.0. *Procedia cirp*, 52, 12-17.
- Theorin, A., 2012. Service-oriented Process Control with Grafchart and the Devices Profile for Web Services 6.
- Theorin, A., Bengtsson, K., Provost, J., Lieder, M., Johnsson, C., Lundholm, T., Lennartson, B., 2017. An event-driven manufacturing information system architecture for Industry 4.0. *International Journal of Production Research* 55, 1297–1311. <https://doi.org/10.1080/00207543.2016.1201604>
- Wonderware System Platform - Fondation de l'Industrie du Futur [WWW Document], 2017. . Wonderware. URL <https://www.wonderware.fr/produit/supervision-et-controle/ihm-supervision-et-controle/system-platform-2> (accessed 5.5.20).
- Xu, L.D., Xu, E.L., Li, L., 2018a. Industry 4.0: state of the art and future trends. *International Journal of Production Research* 56, 2941–2962. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1444806>
- Xu, L.D., Xu, E.L., Li, L., 2018b. Industry 4.0: state of the art and future trends. *International Journal of Production Research* 56, 2941–2962. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1444806>
- Zdravković, M., Zdravković, J., Aubry, A., Moalla, N., Guedria, W., Sarraipa, J., 2018. Domain framework for implementation of open IoT ecosystems. *International Journal of Production Research* 56, 2552–2569. <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1385870>
- Zhang, L.L., Rodrigues, B., 2009. A tree unification approach to constructing generic processes. *IIE Transactions* 41, 916–929. <https://doi.org/10.1080/07408170903026049>
- Zheng, L.Y., Dong, H.F., Vichare, P., Nassehi, A., Newman, S.T., 2008. Systematic modeling and reusing of process knowledge for rapid process configuration. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 24, 763–772. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2008.03.006>
- Zhong, R.Y., Xu, X., Klotz, E., Newman, S.T., 2017. Intelligent Manufacturing in the Context of Industry 4.0: A Review. *Engineering* 3, 616–630. <https://doi.org/10.1016/J.ENG.2017.05.015>
- Zhou, K., Taigang Liu, Lifeng Zhou, 2015. Industry 4.0: Towards future industrial opportunities and challenges, in: 2015 12th International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD). Presented at the 2015 12th International Conference on Fuzzy Systems and

Knowledge Discovery (FSKD), IEEE, Zhangjiajie, China, pp. 2147–2152.
<https://doi.org/10.1109/FSKD.2015.7382284>

ÉCOLE DOCTORALE SCIENCES DES MÉTIERS DE L'INGÉNIEUR
[Laboratoire Conception de Produits et Innovation – Campus de Paris]

THÈSE

présentée par : **Chawki EL ZANT**

soutenue le : **16 Juillet 2021**

pour obtenir le grade de : **Docteur d'HESAM Université**

préparée à : **École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers**

Spécialité : **Industrial Engineering**

Industry 4.0 Process, Which Model for A Successful Integration

THÈSE dirigée par :
[Pr AOUSSAT Améziane]

et co-encadrée par :
[Mr BENFRIHA Khaled]

Table des matières

1. Introduction	103
2. General Context of the 4th Industrial Revolution.....	106
2.1 Industrial Revolutions	106
2.1.1 The First Industrial Revolution.....	107
2.1.2 The Second Industrial Revolution.....	107
2.1.3 The Third Industrial Revolution	108
2.2 Industry 4.0, The Fourth Industrial Revolution.....	109
2.2.1 Economical Context and Challenges.....	109
2.2.2 Industry 4.0 Unique Concept	109
2.2.3 Industry 4.0 Origin.....	111
2.3 Research objectives in the context of Industry 4.0 and the digital transition of companies ...	112
2.3.1 Digital Continuity of Products & LCPI Research fields	112
2.3.2 Industrial Platform 4.0	113
2.4 General positioning of the present PhD thesis.....	114
3. Industry 4.0 Reviewed	115
3.1 Industry 4.0 Definition	115
3.2 Changes and Benefits.....	116
3.3 Industry 4.0 Tools	120
3.3.1 Industry 4.0 Innovative Technologies	120
3.3.1.1 3D printing	120
3.3.1.2 Augmented Reality AR and Virtual Reality VR	121
3.3.1.3 Cyber security and Blockchain	121
3.3.1.4 Cloud computing	122
3.3.1.5 Robotic systems	123
3.3.1.6 Simulations and prototype	124
3.3.1.7 The Internet of Things IoT	124
3.3.1.8 Horizontal and vertical transformation	125
3.3.1.9 Big Data	127
3.3.2 Design Principles and Functionalities	127
3.3.2.1 Interoperability	127
3.3.2.2 Decentralization	127

3.3.2.3 Virtualization	128
3.3.2.4 Modularity	128
3.3.2.5 Service orientation	129
3.4 Industry 4.0 Axes of Research	129
4. Scientific Context & Research Problematic	132
4.1 Business Model Evolution in The Context of Industry 4.0	132
4.2 Analyzing Aspects of Industry 4.0 Integration in the Manufacturing Companies.....	134
4.3 Perimeter of Industry 4.0 Integration into Manufacturing Companies	135
4.4 Attributing Industry 4.0 Integration to Product Life Cycle, Research Positioning Identification	137
4.5 Positioning & Problematic	138
5. Digitization of Manufacturing Systems in The Context of Industry 4.0 – State of the Art	141
5.1 General Challenges Regarding Manufacturing Systems Evolution	141
5.2 Vertical Integration in The Context of Industry 4.0	144
5.3 REVIEWING FLEXIBILITY AND MODULARITY IN THE CONTEXT OF INDUSTRY 4.0	146
5.3.1 Flexible Manufacturing Systems FMS in the context of Industry 4.0.....	149
5.3.2 Modularity in the context of Industry 4.0	151
5.4 Reviewing Traditional & Proposed 4.0 Architectures	153
5.4.1 Traditional Hierarchical ICT Structure	153
5.4.2 Vertical Integration and Smart Manufacturing Purposes	156
5.4.3 Existing 4.0 Architectures.....	159
5.5 Positioning Toward the State of the Art.....	164
6. PhD Hypothesis	167
6.1 Analysis of Recent 4.0 Architectures	167
6.2 Hypothesis Proposal.....	168
6.2 Scientific approach to the resolution of the proposed hypothesis.....	169
7. Modelling of 4.0 production systems	172
7.1 Modelling of 4.0 production systems: Case of a new production system.....	172
7.2 Modelling of production systems 4.0: Existing Production System Case	177

8. Proposed transition framework toward industry 4.0 production systems **180**

8.1 Existing Integration Frameworks	180
8.2 Advanced Manufacturing System, A Design principles Framework.....	183
8.2.1 Flexible Shop Floor	184
8.2.2 Flexible Shop Floor Control System SFCS.....	185
8.2.3 Integrated Data Management	186
8.2.4 Modular Service Integration	188
8.2.5 Openness for Business Level Communication and Distributed Industries.....	189

9. Experimentation, Application on Industrial Platform 4.0..... 191

9.1 Objectives & Protocol of the Experimentation.....	192
9.2 Deployment of The Proposed Framework.....	193
9.2.1 Flexible Shop Floor	193
9.2.2 Flexible Shop Floor Control System.....	195
9.2.3 Modular Service Integration	196
9.2.4 Integrated Data Management	197
9.2.5 Openness for business level communication and distributed industries.....	198
9.3 Industrial Platform 4.0 Novel Architecture	199
9.3.1 Industrial Platform 4.0 System Architecture.....	199
9.3.2 Industrial Platform 4.0 IT Architecture.....	200
9.3.3 Industrial Platform 4.0 Decision Making Model Based Machines.....	201
9.3.4 Synthesis.....	202
9.4 A Design Methodology for Modular Processes Configuration.....	203
9.4.1 Modular Process Methodology	204
9.4.2 Shop Floor Control System SFCS	206
9.4.3 Modular Process Design Patterns.....	207
9.5 Implementation of the New Modular Process Approach to Enhance Flexible Manufacturing Program	210
9.5.1 Standardized Parametric Operations	211
9.5.2 Modules	214
9.5.3 Production Plan ‘Orchestration’	215
9.5.4 Production Process Planning.....	218
9.6 Additional Modules Integration.....	218

9.6.1 Smart Visual Inspection System Module	219
9.6.2 Digital Twin Application Module	221
9.7 Implemented System Ontology and Data Flows	223
9.8 Demonstrative Application.....	225
9.8.1 Phase 1	226
9.8.2 Phase 2.....	227
9.8.3 Proposed measurement frame of reference for the quantitative assessment of the new performance.....	229
9.8.4 Analysis and discussion of results	231
10. Results & General Discussion.....	234
Conclusion & perspective	236
References	239

1. Introduction

Europe's industry is facing essential economic challenges due to an increasing pace of societal and technological developments, such as decreasing availability of natural resources, increasing energy prices, increasing the age of employees and globalization of markets. Moreover, consumers are increasingly demanding for improved product-service innovation, product variety, quality standards, support services, and immediacy or order satisfaction. These challenges drive industrial enterprises to be capable of managing their whole value-chain in an agile and responsive manner.

Industrial production is nowadays driven by global competition and the need for fast adaptation of production to the ever-changing market requests. These requirements can be met only by radical advances in current manufacturing processes, as well as the integration of all actors in the company's value chain (suppliers and customers). Technical aspects of these requirements are addressed by the application of the genetic concepts of Cyber-Physical Systems CPS, industrial Internet of Things IoT, and the integration of the new functionalities and technologies to the industrial production systems. The understanding of industry 4.0 is the application of the internet of things to the industrial processes, referring especially to the representation of physical objects such as machines, tools, workpieces, and their equipment in the digital world, with the ability to communicate with other objects. These resulting smart objects related to each other and together they build a system that allows for more flexible, more efficient, and transparent planning control, and execution of production and logistics. To be more specific: companies need both - virtual and physical structures that allow for close cooperation and rapid adaption along the whole lifecycle from innovation to production and distribution (Erol and Schumacher, 2016). This also requires changes along different layers of the company's production system from control systems to the information system at the planning and execution level as well as at the business and management level.

Thus, all manufacturers need to ready themselves to embrace this potential industrial revolution to remain competitive in the turbulent and hyper-competitive market. Technological innovations and changes in business environments affect both firms' short-term performance and long-term sustainability. When future directions and options in technology are obscure and uncertain, firms need to formulate an appropriate technology strategy to support their planning for interacting with upcoming future technological developments such as Industry 4.0. From both strategic and technologic perspectives, the transitioning toward Industry 4.0 requires a comprehensive strategic model that visualizes every further step on the route toward an entirely digital manufacturing enterprise. Contemporary firms use technology road mapping extensively as a framework for supporting research and development of future technologies that could sustain a competitive advantage. Road mapping is an important method that has become integral to creating and delivering strategy and innovation in many

organizations. It is, therefore, obvious that an accurate technological and strategic model is indispensable for securing success in the digital transformation process needed by Industry 4.0. Most research on Industry 4.0 is focused on the Reference Architecture Model for Industry 4.0 RAMI 4.0 framework. The conversation is around how to implement Industry 4.0 business models and how these will increase productivity (Santos et al., 2017).

A major problem occurred, when a company decides to shift from 3.0 to 4.0 functionalities, and the question is how to create this transformation in terms of integration level, tools, and strategy. Well, trying to meet new technologies and upgrade the existing production lines with respect to the industry's actual structure must be deeply studied. An accurate integration process/remodelling Framework needs to be developed carefully. Furthermore, the initial point is to identify the integration concept and boundary.

The present PhD thesis aims to offer an integrative model that can be used as a steppingstone tool by academicians and industrials toward the development of a detailed strategic and technological model for the successful transformation from traditional manufacturing to digital manufacturing systems in the context of Industry 4.0. It is obvious that having a deep understanding of the particularities of Industry 4.0 is a prerequisite for the development of the strategic and technological roadmap. Our scientific approach consists in developing this conceptual model and applying it to a traditional production system in order to identify the required changes and to define a framework for the digital transition accordingly. The proposed Framework will be applied to the 4.0 industrial platform of Arts et Métiers of Paris in order to experiment and validate our scientific approach.

The agility offered by Industry 4.0 allows plants to handle a more diverse product range with shortening lead time, and quickly customize products to specific requirements, assuring higher responsiveness to customers' needs. While Industry 4.0 offers enormous, new opportunities for businesses; the scale of its impact also brings new challenges. The dynamic issue of the traditional vertical structure of the production is to be investigated since production systems need to be capable of adapting to new products and responding quickly to fluctuations in demand first. Second, production systems must allow deploying data collected from machines, and sensors in order to learn and self-optimize its processes.

This PhD thesis is organised into eleven chapters. Following the introduction, chapter 2 introduces the industrial context of Industry 4.0 regarding the production system evolution through the four-industrial revolutions. Chapter 3 reviews Industry 4.0 definition, benefits, design principles and functionalities, and explores the potential of Industry 4.0 technology trends. Chapter 4 identifies the research positioning and the main objectives of this project. Chapter 5 addresses the challenges facing the integration process of Industry 4.0 into the manufacturing systems based on a state of art study. In chapter 6 the hypothesis

of this PhD is proposed, before presenting the model in chapter 7. Chapter 8 discusses the integration framework proposed assuring mainly the vertical integration and allowing the horizontal one into the company's structure. In chapter 9, we experiment a novel integration architecture toward the digital manufacturing transition developed and explained based on the literature review findings in order to help companies toward the digital transformation. Chapter 10 will discuss results and findings, while chapter 11 concludes the PhD thesis.

2. General Context of the 4th Industrial Revolution

Over the course of history, mankind has perfectly improved its industry by not only relying on technical evolution but also by reinventing new resources which have created new technical means. Therefore, the industry has benefited from qualitative advancements that have sometimes been so ingrained in a certain time period and have had such an overwhelming impact that we have dubbed them revolutions" (Derbel et al., 2019). The industrial needs and requirements of evolution drive the industrial revolution. This is to say that the need for business evolution has conducted to the 4th industrial revolution along with the emergence of new technologies and functionalities.

While the recent industrial revolution came up with the discovery of a novel technology or a new source of power, Industry 4.0 offers a combination of technologies and functionalities (El Zant et al., 2021) to be implemented into the whole value chain of an enterprise. Industry 4.0 is not offering a mechanized steam machine to be added to the production line or a functionality aiming to optimize the production time, it is a full transformation proposal, interconnected industry, a smart factory, and a whole new approach to enhance businesses.

The objective of this chapter is to establish the link between the industrial needs vis-à-vis the digital transition of companies and the objective of our scientific research in order to specify the general positioning of this PhD thesis. The general context upon industrial revolutions is introduced in section 2.1. Industry 4.0 is introduced in section 2.2 as well as the economic and industrial aspects that accompany the emergence of Industry 4.0. The aim of section 2.2 is to discuss industrial needs in the context of the digitization of companies and production systems. Section 2.3 presents the research need in the context of the 4th industrial revolution while positioning among the research axes of the Product Design and Innovation Laboratory (LCPI), and by introducing the research project of the platform 4.0. Section 2.4 identifies the objective of the PhD thesis among the defined research axes.

2.1 Industrial Revolutions

Explaining the Industrial Revolution, the global context for this epochal economic transformation lies in a very substantial increase in human numbers from about 375 million people in 1400 to about 1 billion in the early nineteenth century. Accompanying this growth in population was an emerging energy crisis, most pronounced in Western Europe, China, and Japan, as wood and charcoal, the major industrial fuels, became scarcer and their prices rose. In short, global energy demands began to push against the existing local and regional ecological limits. In broad terms, the Industrial Revolution marks a human response to that dilemma as fossil fuels replaced the earlier reliance on wind, water, wood, and the muscle power of people and animals. All of those had derived from recently captured solar energy, but now human ingenuity found the means to tap the anciently stored solar energy of coal, oil, and natural gas as well (Strayer and Nelson, 2009).

Hartwell (Hartwell, 2017) listed in his book several causes of the industrial revolution, as the increase in the capital rate and the world trade, the technological revolution, and the rise of the rational ethic and culture which liberalized the context of enterprise.

2.1.1 The First Industrial Revolution

Following a slow period of proto industrialization, the first industrial revolution spans from the end of the 18th century to the beginning of the 19th century. It witnessed the emergence of mechanization, a process that replaced agriculture with industry as the foundation of the society economic structure. This transition included going from hand production to machines, improved efficiency of waterpower, new industrial manufacturing, and iron production processes.

The Birth of the industrial Revolution in Great Britain provided the legal and cultural foundations that enabled entrepreneurs to pioneer the industrial revolution. The absence of the trade barriers between England and Scotland, the coal availability all over Britain especially in Wales, and free market economy were key factors enabling the rise of that new industrial era. In its earliest form, the manufacturing in XVIII century was usually carried out by a single skilled artisan with assistants. Before the Industrial Revolution, most manufacturing occurred in rural areas to serve the agricultural activities. In XVII century, entrepreneurs organized several manufacturing households into a single enterprise through the putting out system. The most important techno-developments were Textiles - Mechanized cotton spinning powered by steam or water that increased the output of a worker, Steam power - The efficiency of steam engines increased greatly, the adaption of stationary steam engines made them suitable for industrial use, Iron making - The substitution of coke for charcoal, lowered the fuel cost of iron and wrought iron production. Mass extraction of coal along with the invention of the steam engine created a new type of energy that thrust forward all processes thanks to the development of railroads and the acceleration of economic, human and material exchanges. Other major inventions such as forging and new know-how in metal shaping gradually drew up the blueprints for the first factories and cities as we know them today.

2.1.2 The Second Industrial Revolution

Mass production played a lead role in the second Industrial Revolution, inspired through many inventions. Right about 1890's many more inventions were created making this era unique. The newer inventions advanced the speed and quality of thread spinning overriding most other machinery and products. A novel strategy came to the industrial field, one of the best production ways was the assembly line. Workers would stand at fixed stations and a pulley system would bring the meat to each worker and they would complete one task. Henry Ford and others have written about the influence of this American slaughterhouse practice on the later developments at Ford Motor Company. In the assembly line, one person would do a specific task, while others are doing different ones, this way

made making cars much easier than usual.

As a result, the development of the combustion engine set out to use these new resources to their full potential. Furthermore, the steel industry began to develop and grow alongside the exponential demands for steel. Chemical synthesis also developed to bring us synthetic fabric, dyes, and fertilizer. Methods of communication were also revolutionized with the invention of the telegraph and the telephone and so were transportation methods with the emergence of the automobile and the plane at the beginning of the 20th century. All these inventions were made possible by centralizing research and capital structured around an economic and industrial model based on new “large factories” and the organizational models of production as envisioned by Taylor and Ford.

2.1.3 The Third Industrial Revolution

In the second half of the 20th century, a third industrial revolution appeared with the emergence of a new type of energy whose potential surpassed its predecessors: nuclear energy. This revolution witnessed the rise of electronics with the transistor and micro-processor but also the rise of telecommunications and computers along with the internet and the renewable energies. This new technology led to the production of miniaturized material which would open doors, most notably to space research and biotechnology. For industry, this revolution gave rise to the era of high-level automation in production thanks to the information technology, the programmable logic controllers PLCs and the robots.

Trade began to be easier with new innovations, companies started to produce in foreign countries. This system now is called “offshoring” and it is used to reduce labour costs and raw materials. A new process started in this century, which is now called “globalization”. By this process the world is becoming interconnected as a result of increased trade and cultural exchange. It has increased the production of goods and services and the biggest companies now are called multinational corporations.

To sum up, the key invention in Europe’s industrial revolution was the steam engine, taking advantage of the energy potential of coal. Later industrial revolutions also used electric and internal combustion motors (developed by the 1870s) and petroleum as well as coal. Before the industrial revolution, almost all production in manufacturing and agriculture relied on equipment powered by people or draft animals, with some assistance from waterwheels. Except for waterwheels, used mainly to mill grain, almost all tools were designed for manual use. The industrial revolution progressively introduced steam or other power to the production process and steadily increased the proportion of the process accomplished by equipment without direct human guidance” (STEARNS, 2020). Some notable inventions of the industrial revolution include:

Atmospheric steam engine - invented by Thomas Newcomen in 1712, Cotton gin - invented by Eli Whitney in 1793, Telegraph - invented by Samuel F.B. Morse in 1836, Sewing machines - invented

by Elias Howe in 1844, Telephone - patented by Alexander Graham Bell in 1876, Phonograph - invented by Thomas Edison in 1877, Induction electric motor - invented by Nikola Tesla in 1888, Roller Coaster - patented by Edwin Prescott in 1898, Airplane - invented by Orville and Wilbur Wright in 1903, Model T Ford and the large-scale moving assembly line - invented by Henry Ford in 1908 and 1913.

2.2 Industry 4.0, The Fourth Industrial Revolution

Industrial revolutions have systematically been accompanied with an unquiet increase in productivity. the rise in productivity has consequently enhanced wages and, the standard quality of life of people. The evolution of Industry 4.0 is progressive; however, its impact can have an unquiet impact on company performance, productivity and overall markets and industries (Santos et al., 2017).

The economical context and challenges of Industry 4.0 are presented in section 2.2.1. In section 2.2.2, Industry 4.0 is introduced as a unique concept among other industrial revolutions. Finally, section 2.2.3 presents the origin of Industry 4.0.

2.2.1 Economical Context and Challenges

Three main economical and industrial challenges are driving the emergence of Industry 4.0. Decreasing availability of natural resources, increasing energy prices, increasing the age of employees and the globalization of markets are key challenges in the economical context. Alongside, customer demands are getting more and more challenging from improved product-service innovation to product variety with high quality standards and reinforced support services as well as immediacy or order satisfaction.

In addition to abovementioned serious challenges, the advancement of technologies such as the availability of internet services, the wide use of connected objects and Internet of Things IoT along with the development of Information Technologies (IT) infrastructure and networks are key enablers to the digitalisation of the manufacturing systems. In this context, the digitalisation and the integration of Industry 4.0 into the manufacturing systems is a considered solution contributing to enhance the industrial performance and responding to economical and industrial challenges.

2.2.2 Industry 4.0 Unique Concept

Stages within the development of industrial manufacturing systems from manual work towards Industry 4.0 concept is given as a path through the four industrial revolutions. The first industrial revolution began with the mechanization and mechanical power generation, broke out only in a certain country, England. It brought the transition from manual work to the first manufacturing processes, principally in textile business. The 1st industrial revolution is characterized by the dominance of the textile industry and the use of coal. The symbols are the steam engine and trains. The second industrial

revolution was triggered by electrification that enabled industry and production. The 2nd industrial revolution is marked by a wide range of sectors entirely new as the chemical industry, mechanical engineering, food. If the energy in the 1st industrial revolution was coal, in the 2nd industrial revolution were the electricity, oil and gas. In the 2nd industrial revolution era, binomial fundamental science and industry also arises. The results of science flow together in the industries especially in the chemical industry that made her mistress in the pharmaceutical and food industries. The symbol of the 2nd industrial revolution is steel and Eiffel Tower construction. Typically mentioned in this context a quote of Henry Ford, saying about the Ford T-Model car “You can have any colour as long as it is black”. The quote introduces well the mass production but without the possibility of products customization. The third industrial revolution is characterized by the automation with introduction of microelectronics (Rojko, 2017). Industry 3.0 evolved from the second generation of industrial revolution. It is the Information Technology (IT) era. Integrated Management Systems IMS were introduced to reduce considerably the management costs. Industry 1.0 and 2.0 enable the production as a service in industry 3.0. The whole company structure has been affected and reorganized into more specialized and separated functions defining their core of business such as Research and Development department, Finance, and Marketing (Santos et al., 2017).

Nowadays, we are living the fourth industrial revolution, called Industry 4.0. Industry 4.0 differs from previous industrial revolutions in terms of concept and actuators. It is the first industrial revolution to deviate from the energy-greed trend in terms of non-renewable resources since we have been integrating more and more possibilities to power our production processes with alternative resources. Tomorrow, factories 4.0 will be embedded in smart cities and powered by wind, sun, and geothermal energy (SenTryo, 2017).

From the technological side, industry 4.0 is not about discovering a novel mechanical, electrical, or even communication phenomenal, but a true combination between many novel technologies. Thanks to the wide use of internet of things (IoT), the introduction of Cyber Physical Systems (CPS), Cloud Manufacturing (CM), Additive Manufacturing, and many other technologies and actuators, a new level of Industry and manufacturing could be reached, forming together the core technologies of the Industry 4.0. This new industrial revolution is mainly characterized by the connectivity and the interoperability, the flexibility, the intelligence through the implementation of smart industries and smart products, the prediction, the modularity, and the mass product customization. In another word, industry 4.0 helps companies to produce increasingly individualized products with a short lead-time to market while enhancing quality requirements. Intelligent manufacturing plays an important role in Industry 4.0. Typical resources are converted into intelligent objects so they can act, sense, and behave within a smart environment (Zhong et al., 2017).

Industry 4.0 is the first industrial revolution rooted in a new technological phenomenon - digitalization

- rather than in the emergence of a new type of energy. This digitalization enables us to build a new virtual world from which we can steer the physical world. Today's industries aim to connect all production means to enable their interaction in real time. Factories 4.0 make communication among the different actors and connected objects in a production line possible thanks to technologies such as Cloud, Big Data Analytics, and the Industrial Internet of Things (SenTryo, 2017).

Traditional industry is currently undergoing a digital transformation, and industrial processes are increasingly merging with modern information technologies. Industry 4.0 was developed as a picture of the future that stretches out for 20 years or more. It is based on many available and ongoing development technologies as the American William Gibson once wrote "I'd suggest that the future has already arrived, it's just not very evenly distributed yet". The digital enterprise of the future will be based on 4 key pillars: data backbone consistent across the organization, data connectivity through networks, data mining, and finally data security. Between 20 and 50% savings might be achieved at the top end of high agility. A lot could be saved in the reconfiguration reuse of the production equipment or indeed dynamic changes in the product (Schlapfer et al., 2015).

2.2.3 Industry 4.0 Origin

The continuous progress of science and technology support the development of industrialization all around the world, taking the manufacturing sector to an advanced stage (Belvedere et al., 2013). In recent years, the Internet of Things and Cyber- Physical Systems have received an increased attention from researcher, governments and industries, acting seriously to benefit from what this new industrial revolution could provide (Liao et al., 2017).

Industry 4.0 is a strategic initiative of the German government, which was first announced at Hannover fair 2011. Germany has one of the most potential economy and manufacturing sector presence worldwide, especially in machinery and automotive sector (Rojko, 2017). This announcement presented a strategic start point of the German ambitions in the manufacturing development. In 2012, the German government passed the 'High-Tech Strategy 2020' action plan, investing billions of euros for the development of cutting-edge technologies (Liao et al., 2017). In 2011, series of national level discussions called 'Advanced Manufacturing Partnership (AMP)' were launched on behalf of the United States government, aiming to prepare its industries for the next manufacturing generation (Science and Technology (U.S.), 2014). In France, the concept 'Industrie du futur' was introduced and initiated as a strategic review in 2013. It is based on the cooperation of industry and science and defined as France's industrial policy priorities. The United Kingdom government proposed a long-term strategy in 2013 until 2050, called the 'Future of Manufacturing', in order to reinforce and support the UK manufacturing in the 4.0 era (Foresight, 2013). The 'Innovation in Manufacturing 3.0' was launched in 2014 by the South Korean government (Kang et al., 2016), the 'Factories of the Future'

(FoF) launched in 2014 by the European Commission is funded by 80 billion euros for a 7-year plan. The Chinese government issued the ‘Made in China 2025’ strategy alongside the ‘Internet Plus’ plan in 2015, accelerating the industrialization in many manufacturing field (Kennedy, 2015).

2.3 Research objectives in the context of Industry 4.0 and the digital transition of companies

Based on the industrial context introduced below, a critical need for a guide allowing the company to adopt a successful digital transition towards the digitization of manufacturing systems is identified. Taking into account the existing production system, the major question that arises is not anymore more why, but how?

This research project subscribes in the field of industrial engineering and is particularly interested in the digitization of manufacturing systems, based on a scientific approach.

2.3.1 Digital Continuity of Products & LCPI Research fields

In the revolutionary context of Industry 4.0, (Benfriha, 2020) proposed a research initiative which considers 2 main axes:

- Axis 1: Digital transition to 4.0 production systems
- Axis 2: Design optimization in the context of Industry 4.0

Axis 1 involves the development of a generic approach to the digital transition of production systems. The main objective of this axis is to help companies in their digital transition based on a gradual approach (Benfriha, 2020). The digital transition of the company requires an evolution of the production system and the integration of new technological pillars offered by Industry 4.0. This approach takes into consideration the desired functionalities and the level of integration and evolution targeted by the company, which defines the scope of this digital transition in terms of technological investment.

Axis 2 addresses the design optimization phase in the context of Industry 4.0, based on generated data from digital production processes in order to optimize the design attributes of certain components. Digitized manufacturing contributes to a critical generation of data and information from different production processes and therefore different phases of the product life cycle. Data processing provides useful information for the optimization of various production processes of a product in terms of costs, energy consumption and time (lead-time), which brings considerable improvements of design by creating a digital continuity of the product.

The integration of 4.0 concepts and technologies into manufacturing systems helps to create this digital continuity of the product through its different life cycle phases. The digital continuity of the product is a research axis of the Product Design and Innovation Laboratory (LCPI). The research activities of the

Product Design and Innovation Laboratory (LCPI, EA 3927) of the HESAM, Paris, fall essentially in the field of industrial engineering as shown in **Figure 1**. Consequently, our research focused on the integration of 4.0 concepts and technologies into manufacturing systems, in order to develop a scientific decision-making support process for the transition to the digitalization of manufacturing systems.

OBJECTIF : OPTIMISATION DU PROCESSUS DE CONCEPTION ET D'INNOVATION

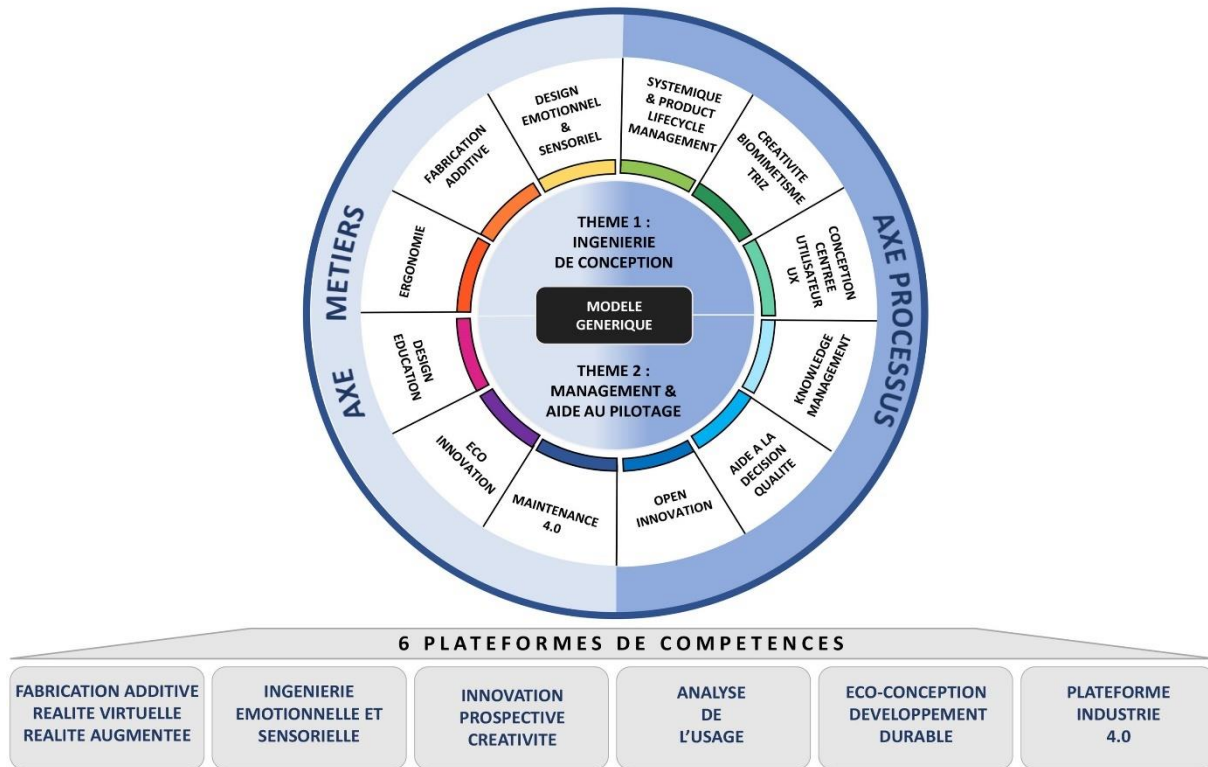


Fig. 1 Laboratoire Conception de Produits et Innovation LCPI research fields and activities

2.3.2 Industrial Platform 4.0

Continued advances in science and technology are supporting the development of industrialization all over the world, bringing the manufacturing sector to an advanced stage (Belvedere et al., 2013). In recent years, the IoT Internet of Things and CPS cyber-physical systems have received increased attention from researchers, governments, and industries, taking serious action to benefit from what this new industrial revolution could offer (Liao et al., 2017). Along with government actions, many research and development studies point in the same direction. Universities, research centres and companies are increasingly interested in discovering industry 4.0 initiatives, contributing to the implementation and integration of these new technologies. The goal behind all these efforts is to harness the potential of new technologies and concepts, in particular the use of IoT, the integration of technical and business processes, virtualization, flexibility, connected factory and smart product (Rojko, 2017).

In this context, the 4.0 industrial platform was developed to integrate the CPI laboratory scopes within the Arts et Métiers school of Paris, in partnership with the Apprenticeship Training Center (CFA) Ingénieurs 2000. This platform allows the development of experimental research in design, maintenance, LCC, and production. This platform makes it possible to experiment models and architectures of complex production systems. The second objective is educational. Indeed, on the basis of the research work carried out, it becomes possible to offer innovative teaching and simulation courses for learning the principles of Industry 4.0.

2.4 General positioning of the present PhD thesis

Among the two-axis identified in section 2.3.1, this thesis is the first thesis carried out at the platform 4.0 by considering the 1st axis: Digital transition towards 4.0 production systems. The objective of this axis is to develop a scientific process of gradual transition to the digitization of production, thus offering new functionalities that break with traditional production models. It consists of proposing a general approach adapted to the company's needs, taking into account the desired performances, the expected technological deficit and the desired investment of the digital integration.

From new functionalities identified and targeted by the company, in terms of operational flexibility, integrated quality, decision autonomy, predictive maintenance, optimization of energy consumption and the desired level of portability, the idea is to propose a new production system model which defines and integrates a distributed system architecture, cyber-physical systems (CPS), and connected 4.0 technological layers. The originality of this research lies in the consideration of all the layers of a production system including the technological level but also the IT architecture and the control layer. Obviously, the technological aspect is not the only factor of success, other factors such as the management, the competencies, ... contribute to the outcome of such a project which marks a break in industrial practices. However, only the technological aspect will be discussed in this thesis.

In what follows, chapter 3 is reserved to a general review concerning Industry 4.0 definition, benefits, design principles and functionalities, and explores the potential of Industry 4.0 technology trends, while chapter 4 identifies the research problematic in the perimeter of the digital transition of manufacturing systems in the context of Industry 4.0, based on an analysis of the literature review.

3. Industry 4.0 Reviewed

Traditional industry is currently undergoing a digital transformation, and industrial processes are increasingly merging with modern information technologies. There are many different descriptions and characterizations of industry 4.0. In this chapter, the definition of Industry 4.0 is discussed, what changes and benefits could the integration of Industry 4.0 offers, Industry 4.0 tools and functionalities are introduced, and finally, Industry 4.0 main axes of research are identified from the literature.

3.1 Industry 4.0 Definition

Industry 4.0 as (Zhong et al., 2017) is characterized by increased flexibility in manufacturing, improved quality and mass customization. In other words, companies tend through Industry 4.0 to produce increasingly individualized products with a short lead-time to market and higher quality. (Zhong et al., 2017) referred Industry 4.0 to intelligent factories where manufacturing technologies are upgraded and transformed by cyber-physical systems, the Internet of Things, and cloud computing. The contribution of Industry 4.0 is to enable manufacturing systems to create the “digital twin” (or “cyber twin”) of the physical world and make smart decisions through real-time communication and cooperation with humans, machines, and sensors, along with monitoring physical processes. Combining embedded production system technologies and intelligent production processes will fundamentally transform industry value chains, production value chains, and business models. In the context of Industry 4.0, manufacturing systems are updated to an intelligent level. Intelligent or smart manufacturing aims to convert data acquired across the product lifecycle into manufacturing intelligence in order to yield positive impacts on all aspects of manufacturing (Tao et al., 2018). It enables all physical processes and information flows to be available when and where they are needed across holistic manufacturing supply chains, multiple industries, small and medium-sized enterprises SMEs, and large companies. Intelligent manufacturing requires certain underpinning technologies in order to enable devices or machines to vary their behaviours in response to different situations and requirements based on past experiences and learning capacities. These technologies enable direct communication with manufacturing systems, thereby allowing problems to be solved and adaptive decisions to be made in a timely fashion. Some technologies also have artificial intelligence (AI), which allows manufacturing systems to learn from experiences in order to ultimately realize a connected, intelligent, and ubiquitous industrial practice (Zhong et al., 2017).

According to (Dalenogare et al., 2018), Industry 4.0 can be seen as a matter of technology diffusion and adoption. The Industry 4.0 concepts are proposed to enable companies to have flexible manufacturing processes and to analyse large amounts of data in real time, improving strategic and operational decision-making. (Duckworth, 2019) claims that Industry 4.0 is about a constellation of technologies that perform optimally when interconnected and intelligently coordinated across the

parties and across the cyber-physical divide. It is this communication and collaboration that drive much of the business value that Industry 4.0 offers. An industrial revolution is a fundamental shift in the way industry works that forever changes the way manufacturing is done. However, besieged by bright shiny objects of Industry 4.0, manufacturers should focus on long term goals instead of being swept up by the abundance of new technologies, such as cloud, big data,...

(Radziwon et al., 2014) defines the smart factory as a manufacturing solution in a world of increasing complexity, where flexible and adaptive production processes can solve dynamically production issues. This solution is provided through the implementation of advanced automation saving exceeded labour and waste of resource, and the collaboration between different industrial and nonindustrial partners, forming a dynamic organization. (Zhou et al., 2015) considers innovative aspects of Industry 4.0 as a move from resource consumption, pollutant emissions and more extensive manufacturing to green manufacturing changes, and development from production manufacturing to service-oriented manufacturing. (Erol and Schumacher, 2016) proposed four main areas of actions to realize the novel approaches to business and manufacturing operations, vertical integration of all layers of a production system, horizontal integration of all partners in a value chain, lifecycle-engineering across the entire value chain, and acceleration through exponential technologies. The digital enterprise of the future will be based on four key pillars: data backbone consistent across the organization, data connectivity through networks, data mining, and finally data security.

To sum up, Industry 4.0 is based on the integration of the business and manufacturing processes, alongside with all actors in the company's value chain including suppliers and customers. Three main aspects are required in order to well achieve a successful integration and to apply potentially the promised functionalities of Industry 4.0. Starting from the application of Cyber-Physical Systems CPS and Industrial Internet of Things IoT to the production systems, by implementing CPS blocks with decentralized control through an advanced network. Secondly, adapting the Manufacturing Execution Systems MES and Enterprise Resource Planning ERP to integrate the manufacturing and business processes adding higher levels of flexibility in control and connectivity is required. The third important aspect is handling of a big amount of data collected from the processes, machines and products. Typically, the data is stored in a cloud storage. This data requires extensive analytics that lead from the 'raw' data to the useful information and, finally to the concrete actions that support an adaptive and continuously self-optimizing industrial production process.

3.2 Changes and Benefits

According to (Bodrow, 2017), the economic survival of each company is dependent on its willingness to change. Industry 4.0 applies substantial changes in business affecting small, medium, and big sized enterprises, specifically in three areas.

Changes in production

The production process changes are expected due to the quality improvement of products, and production means, when assigned to information and data management methods. These changes will be visualized through enabling digital value stream image and the real-time control, process flexibility and smart assistance systems, online supervision and energy consumption, quality assurance improvement. Based on these changes new perspectives for business will appear or strengthen their position on the market.

Changes in logistic

The essential component of Internet of things is their autonomy. The same idea is fundamental in respect to logistic in Industry 4.0. Within the vision of Internet of things planning, controlling, connecting tasks are mainly delegated to employees. Otherwise, trucks transport the goods autonomously; cars and forklifts organize themselves based on particle swarm approach; containers organize their cargo and exchange with others in the logistic networks.

Influence of big data and cloud

The wide use of sensors and digitalization of data acquisition provide the analysts and decision maker with information. The storage of this data in the cloud will enable its accessibility and processing anytime everywhere. Using the predictive applications management can investigate the expectable events and optimize the business decisions and processes.

According to the McKinsey and Company, Industry 4.0 is the integration of the manufacturing sector with the IoT framework using the latest sensors, integrating production systems with the back-end supply chain and with the front-end market demand functions using analytic powers, and further reducing contractual risks by using blockchain technologies and the latest manufacturing techniques, eliminating human intervention all together (Santos et al., 2017). Management structures are pretended to be more decentralized and flatter, albeit more specialized. Newer organizational functions such as expertise in data analytics are prominently getting updated into management.

Regarding IT support, software tools are crucial for operating of the Industry 4.0 smart factory. **Figure 2** depicts the well-known pyramid structure of support software of modern production systems. On the business level, the Enterprise Resource Planning ERP tool is implemented. ERP supports enterprise-wide planning such as business planning, supply chain management, sales and distribution, accounting, human resource management and similar. Usually commercially available solutions are implemented. In traditional ERP tools, the decision process is centralized on the highest level in the automation pyramid. Most of the available ERP solutions do not support fast adaptation in production planning due to the unplanned events. The second level in the traditional automation pyramid is

Manufacturing Execution System MES. It supports production reporting, scheduling, dispatching, product tracking, maintenance operations, performance analysis, workforce tracking, resource allocation and similar. It covers aspects such as management of the shop floor and communication with the enterprise (business) systems. Most of the software solutions available on the market are centralized and not distributed to the shop floor elements. This is a major limiting factor when flexibility is needed due to the dynamics of customers' order flow and/or changing production environment, including shop floor configuration. The next operative level is process level control based on Supervisory Control and Data Acquisition SCADA control system architecture followed by controllers on machine/device level such as Programmable Logic Controllers PLCs, robot controllers and other controllers. The last level of the automation pyramid is a machine/device level. In opposition to the top two layers, this level has a naturally distributed control level. ERP and MES tools represent basic software in the company and are used since the nineties. Both systems have typically a modular structure but are centralized in their operation and thus have limited capability for dynamic adaptation of the production plan.

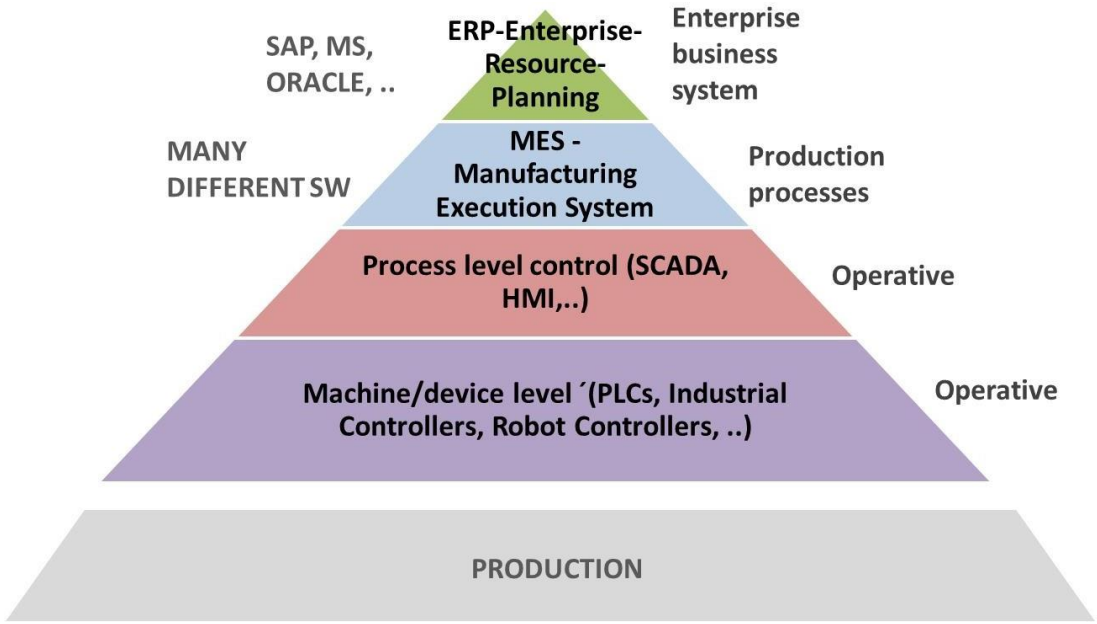


Figure 2 Automation pyramid in modern production systems (Rojko, 2017)

Nevertheless, already implemented conventional ERP and MES systems should not be seen as main obstacles to the introduction of the Industry 4.0 concept but more as a step towards it. Namely already the introduction of a common MES tool requires advanced IT infrastructure on the shop floor level and this is also a precondition for further development towards smart factory. The next important issue is information integration among ERP, MES and other software tools used in the company such as, for example, Customer-Relationship-Management (for help at managing relationships with the outside) and

Business Intelligence (for business analysis purposes). The problems such as database integration and communication protocols need to be resolved. It can be concluded that for the Industry 4.0 the classical automation structure does not present the best solution as it is not flexible enough for adapting to the dynamic changes in the order flow and at the shop floor. Distributed MES solution, where most of the functions are decentralized, is expected to be more suitable for the reconfigurable production systems, **Figure 3**. For full support of reconfigurable systems, a continuous flow of information (vertical and horizontal integration) between all elements should be realized (Rojko, 2017).

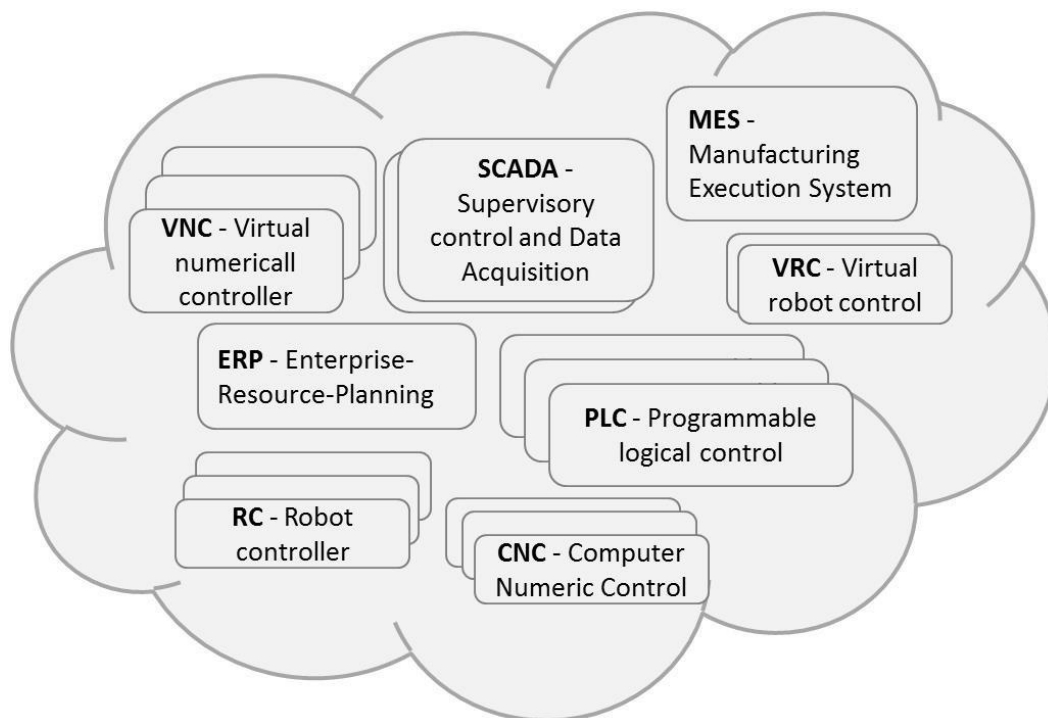


Figure 3 Industry 4.0 structure of IT support and operative level control (Rojko, 2017)

According to (Schlapfer et al., 2015), between 20 and 50% savings might be achieved at the top end of high agility. A lot could be saved in the reconfiguration reuse of the production equipment or indeed dynamic changes in the product.

(Santos et al., 2017) listed the main benefits of Industry 4.0 in four principal objectives, developing green and sustainable industrial processes and supply chains, creating new strategic advantage in the market, reducing costs using autonomous machines, and ensuring faster product development.

(Rojko, 2017) mentioned that Industry 4.0 could result in decrease by 10 to 30% of production and logistics costs, and 10 to 20% of quality management costs. Furthermore, many advantages are acquired:

- A shorter time-to-market for the new products.
- An improved customer responsiveness.

- Enabling a custom mass production without significantly increasing overall production costs.
- More flexible and friendlier working environment.
- More efficient use of natural resources and energy.

3.3 Industry 4.0 Tools

Based on the concept of Industry 4.0 and its full pack approach, this fourth industrial revolution has unique design principles. Regarding our field of research and the aim of proposing clear integration strategy and models, it is necessary to well define Industry 4.0 technologies and design principles and functionalities. The successful integration does not rely only on the implementation of advanced technologies but on the real improvement of the production process and the company performance. Industry 4.0 is a complex combination of innovative functionalities such as Intelligence, Prediction, Interoperability, and Modularity, assured and well implemented to the manufacturing systems through the integration of a bunch of different new technologies and techniques offered by the 4.0 as CPS, Advanced Robotics, IoT, and AI, in order to enhance the production performance, assure the security means of workers and machines, improve product quality, and develop smart products (El Zant et al., 2021).

3.3.1 Industry 4.0 Innovative Technologies

The review identifies various Industry 4.0 technologies that are used to assist sustainable manufacturing decisions. The survey identifies big data technologies that include virtual reality, robotic systems, cloud computing, internet of things, simulation and prototyping, and 3D printing as the emerging technologies of Industry4.0. Advanced industrial technologies aim to connect machines, tools, devices, components, products and logistics ensuing real-time communications between themselves in such a way the system develops the potential to generate and feed information, adding value to the manufacturing process.

3.3.1.1 3D printing

The 3D printing is a novel manufacturing concept. It differs from the conventional subtractive manufacturing using machining techniques such as cutting, drilling or grinding based on the removal method (Kamble et al., 2018). 3D printing or Additive Manufacturing technology makes it possible to turn 3D modelled designs into custom solid objects. It is achieved using an additive process, where successive layers of material are laid down, avoiding the need for parts and components assembly. Generated model from any Computer-Aided Design CAD software can be used to the launch the 3D printing process. The individual customer can now get exactly what he wants at a low price. Initially used only in industries, this new technique is now available to a large number of people, and it will soon change the global economy. We will not need to transport goods all over the world because they will be printed anywhere at any time. According to (Horst et al., 2018), Freedom of design, mass

customization, waste minimization and the ability to fabricate complex structures are the main benefits of additive manufacturing.

3.3.1.2 Augmented Reality AR and Virtual Reality VR

Augmented Reality AR and Virtual Reality VR are advanced vision technologies that differ in their level of immersion. The first of these, AR, allows reality to be augmented through the addition of virtual information to the real physical vision. The second, VR, creates a new appearance of reality giving the user the sensation of actually being present within it. Within AR and VR, there are different categories depending on the segmentation criterion used. For example, by type of hardware-software components, type of device or electronic support. The most frequently used in the manufacturing systems is the AR technology, and it is considered as one of the 9 pillars technologies of industry 4.0, from the point of view of direct application to the industrial environment.

Augmented Reality AR technology is a human-computer interaction that integrates the natural visual perception of a human with computer-generated information (3D models, simulations annotation, and text). A communication, design and training enabling technology, and an immersive environment allows non domain experts to provide valuable input. It drives as well to the simplification of maintenance tasks and assembly procedures aiming to reduce the operating time and training costs. Another function of AR is the visualization of real time data and information along with registered links for documentation, and quality control (Ghobakhloo, 2018). The integration of AR in the manufacturing processes where needed is an added value, which enhances the manufacturing processes as well as the product, reducing the production cost and time and improving quality.

(Mekni and Lemieux, 2014) mentioned the on growing interest of educational researchers in AR. AR is supposed to play an important role in the educational field, where it can potentially explain complicated processes and parts, providing a simple and an interacting way to teach and present things. It enriches the practical educational part as well with wide creative openings.

AR implementation is a true challenge, many aspects should be taken into consideration to ensure the implementation success and the usability of the system. Technology context and organizational fit are key success factors for the AR implementation.

3.3.1.3 Cyber security and Blockchain

The need for security in the industrial field is growing extremely due to the increased connectivity of all the value chain components. Standard communication protocols are susceptible for cyber-attacks and security breaches. Lately, cyber-attack stories are becoming countless, especially in stealing and exploiting personal data, health records and financial privacies. Unfortunately, cyber criminals are not running after data and intellectual property only, they simply can have negative intention in affecting business and disrupt operations. Industry 4.0 is a networked environment where machines, robots,

sensors and actuators are connected through the internet or amongst each other (Ghobakhloo, 2018). Therefore, it has an attractive ground for cyber issues.

The security issues of the IoT based CPS in the manufacturing systems in form of cyber-attacks, viruses or malicious software, and data thefts have the potential to span from machine to another crossing the communication systems. As (Kamble et al., 2018) highly sensitive industrial data could be affected causing modifications or damages to the manufacturing processes and leading to quality defects or even a complete shutdown. According to (Yu et al., 2017) CPSs are liable for cyber-attacks. Where production files and process parameters could be affected, the damage may reach the operational safety and the product quality.

The need for better security has led the development of advanced solutions that can help protecting businesses, processes, and data. (Yu et al., 2017) used object-oriented Petri nets OPNs to create a formal model of Cyber Physical Manufacturing System CPMS more secured against cyber issues and malicious software. The blockchain is one of the solutions. Blockchain is a Distributed Ledger Technology (DLT) mainly used and associated to the cryptocurrency transactions like Bitcoins. Blockchain technology is very useful in modern cyber-defense systems. It can be used in industrial applications and any type of digitized transfer of information and not limited to the financial field (Ghobakhloo, 2018). It was built with the prevention of fraudulent activities in mind. It takes advantage of intelligent consensus mechanisms that instantly detect data tampering and drop such attempts. The integration of blockchain to the manufacturing system will enhance the trust and the security through the whole supply chain, enabling autonomous and secure operations between CPSs, machine and any supply chain partner of the smart factory.

Since information about products, business strategies, and companies are highly critical, Cyber Security is considered as an essential pillar of industry 4.0. Cybersecurity and Blockchain must be taken into consideration and placed on the top of the digital transformation process, since they can lead to a safer environment for all type of data and information exchange.

3.3.1.4 Cloud computing

Thanks to the advancements in hardware, virtualization techniques, distributed computing, and the wide services offered by the internet, cloud computing is henceforth reachable. Cloud computing or Cloud Manufacturing CM is one of the most valuable and interesting technologies promised by industry 4.0. The integration of Cloud Computing to the manufacturing process enhances the interconnectivity and the interoperability between physical things, data, services, and people, main function of the smart factory (Kamble et al., 2018). The cloud computing applied in the manufacturing field refers to use computing services over the internet including data storage and processing. Several options could be offered by the cloud computing technology, such as web-based management,

software application, data mining and processing applications, and distributed manufacturing resources (Ghobakhloo, 2018).

Cloud Manufacturing is a research trend nowadays, focusing on three main directions: data sharing architecture and platform design, resource allocation and management, and the creation of new business models and CM applications (Esmailian et al., 2016). Five main characteristics are recommended by the National Institute of Standards and Technology NIST in order to build an ideal cloud: on-demand self-service, broad network access, resource pooling, rapid elasticity, and measured service. The cloud model is delivered to the customers in three service dimensions, software, platform and infrastructure (Zhong et al., 2017).

In the context of industry 4.0, the cloud technologies are strongly useful for enhancing the advanced manufacturing systems. CM has many benefits, starting from increasing the system performance and flexibility by increasing the data sharing across the company boundaries (Kamble et al., 2018). In fact, a cloud computing system can execute all the applications performed with a normal computer and more efficiently. Everything from word processing software to customized business programs designed and developed for an organization can potentially perform on a cloud system (Zhou et al., 2015). Furthermore, the use of CM is significant in reducing costs through bringing online systems. Companies are no longer obliged to invest in licensing new software, building new infrastructure and training personnel (Zhou et al., 2015), which increases the small enterprises potential to invest in other development directions. Besides, with the Cloud Manufacturing enabled there is no need for adapting data storage optimization, since storage spaces issues will be resolved. From another side, it is worth to mention that the cloud computing has many challenges to overcome, especially the privacy and security subjects, migration to cloud and compatibility, data management and resource allocation.

To sum up, Cloud computing has a great value in the realization of the smart factory, enabling greater flexibility, cost reduction, and optimal resource availability.

3.3.1.5 Robotic systems

Robotic systems are playing an interesting role in enabling Industry 4.0 implementation. Modern robots are characterized as systems offering autonomy, flexibility, cooperation, and reconfigurability. Robots nowadays are working safely in the production environment, interacting with one another and with human workers and even learning from them (Kamble et al., 2018). The integration of these new robotic systems into the manufacturing processes offers an increased flexibility and reconfigurability, especially when doing multi-tasks and interchanging with machines and parts and using integrated camera systems with advanced image processing facilities. The use of robotics helps protecting humans from handling dangerous tasks or areas, along with complex missions. In Industry 4.0 era, the integration of robots in a smart network has the great added value. First, advanced robotic systems are able now to communicate directly to SCADA systems bypassing the Programmable Logic Controllers

systems PLCs which enhances the flexibility of the production process and therefore the mass customization aspect. Adding to this, another layer of flexibility and intelligence is offered through the integration of machine learning techniques to the image processing stage, and the interconnection between robots and machines which extend the decentralization aspect. It is worth to mention the significant advancement and evolution of the robotics simulation software, especially that it can be used to create digital twins of the robots by collecting the real time data from robots and predicting possible collisions in a complex environment. From another side, industrial robotics and automation promise numerous benefits such as reduced part cycle time, lower defect rate, higher quality and reliability, reduced waste and better floor space utilization, making it indispensable to world-class manufacturers (Ghobakhloo, 2018).

3.3.1.6 Simulations and prototype

Simulations and prototyping techniques are key factors in creating real-time data to mirror the physical world in a virtual model, including machines, products, and humans. This allows operators to test and optimize the machine settings for the next product in line in the virtual world before the physical changeover, thereby driving down machine setup times and increasing quality. Simulation and modelling not only enable manufacturers to prevent errors at an early stage that might otherwise result in substantial costs for plant operators, but they can be used to optimize a manufacturing plant during ongoing daily operation (Ghobakhloo, 2018).

The simulation technique was used to study cyberattacks using the bifurcation control method with an objective of generating the expected dynamic behaviours and guaranteeing the trustworthiness of cyber-physical manufacturing systems at run time. Simulation studies were also used for observing the behaviour of machines: movements, machining operations, connectivity with robotic arms, real-time tracking of manufacturing cost, energy efficiency of wireless sensor networks, deadlock prevention, and the use of virtual engineering objects for industrial design and manufacturing. Use of digital twins (prototypes) to simulate the process behaviour of the actual machines interactively is a potential growing area. Digital twins are based on the Ethernet/IP communication protocol and provide information like movements, machining operations, and connectivity with robotic arms (Kamble et al., 2018).

3.3.1.7 The Internet of Things IoT

The IoT is the pervasive access to entities on the Internet for the extension of the physical world using a variety of sensing, detection, identification, location tracking, and monitoring equipment. In general, IoT is able to offer advanced connectivity of physical objects, systems, and services, enabling object-to-object communication and data sharing. The IoT is now envisioned as a larger convergence of cutting-edge technologies such as ubiquitous wireless standards, data analytics, and machine learning. RFID technology provides one such example. It has been reported that nearly 20.8 billion devices will

be connected and making full use of RFID by 2020 (Zhong et al., 2017).

(Ghobakhloo, 2018) discussed the lack of a universal application protocol of Industrial Internet of Things IIoT, which prevents the integration of machinery from various manufacturers, and therefore proposed Semantic Technologies. The use of semantic technologies facilitates the information exchange between different actor of Industry 4.0 in the large scale, providing a common standard communication through semantic Web of Things WoT and enhancing the communication between heterogenous partner of Industry 4.0 in the large scale.

3.3.1.8 Horizontal and vertical transformation

The defined goal of Industry 4.0 is the implementation and utilization of individual interdependency matrix fitted to every single business process. In this respect, horizontal and vertical integration of IT-systems are required. The horizontal integration covers the product life cycle from supplier until it reaches the customer. It involves the design and development of product, production planning, production rump-up and management, logistics, sales and distributions (de Man and Strandhagen, 2017). On the other side, vertical integration is concerned with all hierarchy levels in the enterprise. This dimension comprises the enterprise planning (regarding production planning), enterprise management (regarding detailed planning, production data acquisition, and quality management), process management (regarding monitoring and management of production), and operation (regarding the interface to production process using sensors and actors) (Bodrow, 2017).

Industry 4.0 concept will be in most companies realized by using already available equipment and technologies. Only when a new production system is planned, there is an opportunity to design the production system already from the beginning as Industry system. Therefore, one of the challenges is how already available standards will be integrated into the new concept (Rojko, 2017). The concept of Horizontal and vertical integration is proposed by the German Plattform Industrie 4.0 which introduced the Reference Architecture Model for Industry 4.0 RAMI4.0 as a reference framework for digitalization **Figure 4** This is a meta-model so it describes the aspects that play an important role in the Industry 4.0 production system. It is based on the internationally accepted Smart Grids architecture model introduced in year 2014, however with two additional bottom layers to address specific aspects of Industry 4.0. The three-dimensional RAMI4.0 should enable:

- Identification of the existing standards
- Identification and closure of gaps and loopholes in the existing standards
- Identification of overlaps in the existing standards

The first dimension of the RAMI4.0 addresses two elements, type and instance. As long as an idea, a

concept, or a product is still a plan and is not available/realized yet, it is called type. The second dimension of the model deals with location, functional hierarchy from the product to the connected world (as the last stage of Industry 4.0 development with all enterprises, customers and suppliers connected). The third dimension of the RAMI4.0 model is organized in functional layers as follows:

- An assets layer includes physical components such as robots, conveyer belts, PLCs, documents, archives, but also non-physical objects such as software and ideas.
- An integration layer provides information for assets in a form that can be digitally processed. It includes elements connected to IT such as sensors, integration to HMI and computer-aided control of technical processes.
- A function of the communication layer is standardization of communication using uniform data format and predefined protocols. It also provides services for the integration layer.
- An information layer is processing and integrating available data into useful information.
- A functional layer includes formal descriptions of functions. Also, ERP functions belong to this layer.
- A business layer includes mapping of the business model and links between different business processes.

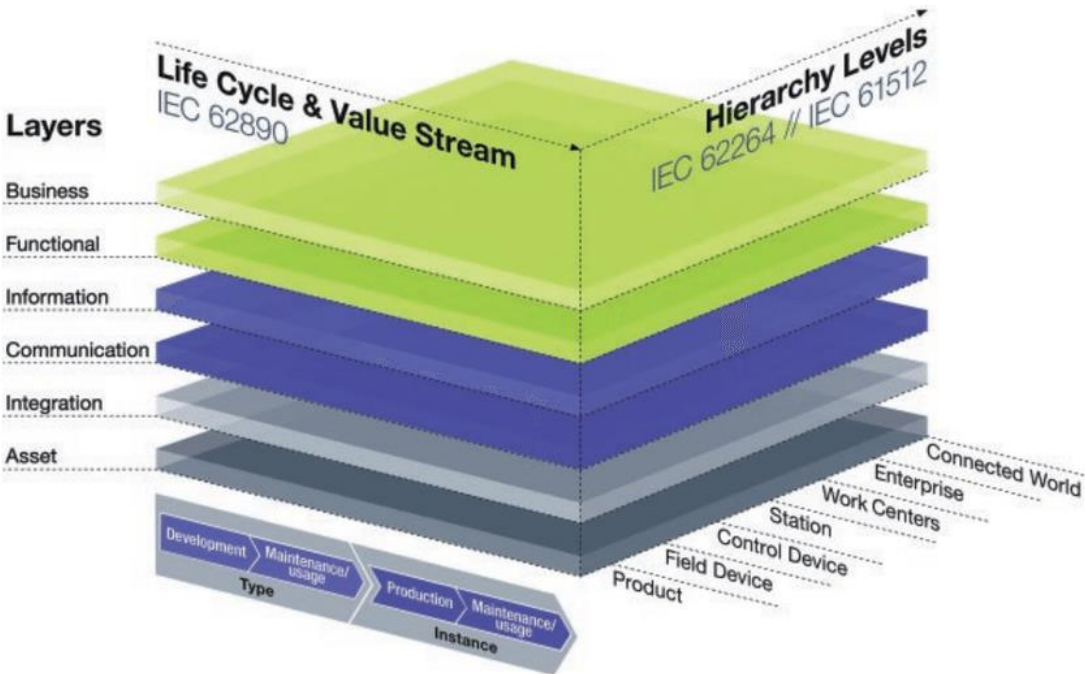


Figure 4 Reference Architecture Model for Industry 4.0

3.3.1.9 Big Data

The advances in the internet technology, internet of things, cloud computing, big data, and artificial intelligence have profoundly impacted manufacturing. The volume of data collected in manufacturing is growing. Big data offers a tremendous opportunity in the transformation of today's manufacturing paradigm to smart manufacturing. Big data empowers companies to adopt data-driven strategies to become more competitive.

In the modern manufacturing industry, data generated by manufacturing systems is experiencing explosive growth, which has reached more than 1000 EB annually. The systematic computational analysis of manufacturing data will lead to more informed decisions, which will in turn enhance the effectiveness of smart manufacturing. In other words, data-driven manufacturing can be regarded as a necessary condition for smart manufacturing. Therefore, data is becoming a key enabler for enhancing manufacturing competitiveness, and manufacturers are beginning to recognize the strategic importance of data. The value of big data does not hinge solely on the sheer volume of data under consideration, but rather on the information and knowledge that lies hidden in it.

3.3.2 Design Principles and Functionalities

Research and studies about Industry 4.0 design principles are numerous, which makes this area rich while the findings are pretty similar. The main design principles of Industry 4.0 as identified in the state of the art and agreed by researchers are: Interoperability, Decentralization, Virtualization, Modularity, and Service orientation (Carvalho et al., 2018; Ghobakhloo, 2018; Hermann et al., 2016; Kamble et al., 2018; Xu et al., 2018a).

3.3.2.1 Interoperability

The interoperability is one of the offered functionalities of Industry 4.0. It is the consequence of digitizing and enabling the interconnection between different actors of the company. The concept of interoperability is based on the ability of all participants such as human, resources, and machines to communicate and interact through the horizontal and the vertical integration required for Industry 4.0 (Ghobakhloo, 2018; Xu et al., 2018a). This network authorizes the operational, managerial, and technical interoperability, based on the system flexibility and strength of analysing data and its exploitation, improving consequently the collaboration between departments and different value chain actors, and offering a great flexibility in a wide meaning.

3.3.2.2 Decentralization

Decentralization is a whole new concept of Industry 4.0, based on the decentralized control network. Instead of depending on the centralized computing system of decision-making body, the decentralization offers the ability of companies, operations staff, and even the machines to make decisions (Carvalho et al., 2018; Kamble et al., 2018). It enables different actor of the smart factory to

work independently and make decisions autonomously, thanks to the Self-regulating systems and intelligent control mechanisms such as CPS, and IoT.

The basic principle of Industry 4.0 is that by connecting machines, workflows, and systems, businesses implement intelligent networks along the entire value chain to control one another autonomously (Sung, 2018). Decentralization helps to achieve quick decision making and offers more flexibility decentralization thanks to the simplified planning and coordination of different processes. Decentralization acts as well as a perfect organizational setup to handle the growing needs of highly customized products (Carvalho et al., 2018; Kamble et al., 2018). An example of the decentralization is the Autonomous Guided Vehicles AGV in the smart warehouses and their efficiency of synchronization which significantly reduce the complexity of central planning by providing the freedom of decision making. Another example is the predictive maintenance, when a machine can predict failure and trigger maintenance processes autonomously or self-organized logistics that react to unexpected or unusual changes in operation. This example would show the rationalization of the driving force behind the Internet of Things.

3.3.2.3 Virtualization

Virtualization means creating a virtual copy of the physical world. Virtualization enables the development of a “digital twin” of the entire value chain (smart warehouse, smart factory, all related equipment and machinery, and even smart products) by merging sensor data acquired from the physical world into virtual or simulation-based models. The virtual twin of the smart factory would enable process engineers and designers to enhance existing processes and optimize the efficiency of production lines in complete isolation, without disrupting the physical processes in the smart factory they have virtualized. Alternatively, the digital twin of a smart product would enable manufacturers to have a complete digital footprint of their existing or new products all throughout their lifecycle, from design and development to the end of the product. This not only would enable a better understanding of the performance of the product at the consumption stage, but also allows companies to virtually evaluate the system that builds the product. Virtualization is heavily dependent upon the real-time capability. In general, Industry 4.0 is centred on cumulative, real-time, real-world data across an array of dimensions such as smart warehouse, smart factory, smart product and smart business partners, meaning that real-time capability is deeply supported by internet of everything. Real-time capability is not just about collecting data, as it involves real-time data analysis, real-time decision making according to the new findings, and even real-time cyber-security attack detection (Ghobakhloo, 2018).

3.3.2.4 Modularity

Modularity is another design principle of Industry 4.0, referring to the modular production systems that can be adapted by replacing and expanding the individual modules in a much more comfortable way. Modularity is concerned with shifting from linear manufacturing and planning, rigid systems and

inflexible production models toward an agile system that can adapt to an ever-changing circumstances and requirements. Modularity involves the entire production and manufacturing levels, and builds on agile supply chain, flexible material flow systems, modular decision-making procedures and flexible processes. Modularity is complemented by product personalization, which is another design principle of Industry 4.0. Product personalization is indeed a more customer-oriented implication of mass customization. The introduction of modern technology trends such as responsive CPS, IoT, open product architecture, automation and additive manufacturing has enabled product reconfiguration based on the continually changing customer preferences, mostly identified via assessment and prediction of consumers' behaviour. This means manufacturers not only should meet customers' existing demands and preferences, but also benefit from Internet of People IoP simulation and big data analytics to forecast upcoming market trends and customers' needs (Ghobakhloo, 2018).

3.3.2.5 Service orientation

Service orientation in the context of Industry 4.0 mostly refers to the concepts of Manufacturing as a Service MaaS and Production as a Service PaaS. MaaS business model refers to the collective use of a networked manufacturing infrastructure to produce goods. Interconnectivity between manufacturers and the widespread of IoT and cloud computing has offered new manufacturing ecosystems by allowing companies to communicate their manufacturing needs and capacities automatically. In this environment, complex manufacturing tasks can be accomplished collaboratively by several manufacturing services from different companies. This means, instead of the physical product, the production capacity of manufacturers can be regarded as the primary good. In the PaaS business model, products are delivered as a service or virtualized experience, and instead of a single upfront payment, customers subscribe to the product and pay a recurring fee on a perpetual per-outcome basis. This business model is particularly enabled by Internet of Service IoS technologies that can be built into products to monitor when and how they are used (Ghobakhloo, 2018).

The process integration brings in the sense of service orientations all the entities in the production system are interconnected facilitating the creation of the product-service system. The flexibility and agility achieved as an outcome of the service orientation enable the organizations to respond to market changes more quickly. This allows the various stakeholders of the organizations to come together and partner to co-create value for the consumers (Kamble et al., 2018).

3.4 Industry 4.0 Axes of Research

In the realm of manufacturing, the advances of science and technology continuously support the development of industrialization all around the world. In recent years, the Internet of Things IoT and Cyber-Physical Systems CPS have received an increased attention from researcher, governments and industries, acting seriously to benefit from what this new industrial revolution could provide (Liao et al., 2017).

(Yang et al., 2018) identified in their review the international research trends related to the smart factory: IoT or ICT, technology innovation and environmental conservation, operations management, and manufacturing and logistics research. This review listed the main research topics related to smart factory, relying between developing smart factory frameworks using IoT, developing methods to measure the smart factory performance and energy usage, maximizing productivity and efficiency in smart factories, studying current additive manufacturing systems, minimizing the operational and resource cost, and improving equipment efficiency, reliability, and product quality of manufacturing systems.

(Zhong et al., 2017) reviewed 165 recent papers and posted the future research trends related to different key technology in industry 4.0, starting from IoT, to CPS, cloud computing, big data analytics, and Information and Communication Technologies ICT. From a conceptual perspective, the main areas of research will focus on the generic framework for intelligent manufacturing, data-driven intelligent manufacturing models, human-machine collaboration, and the intelligent manufacturing applications.

In (Xu et al., 2018a), a systematic research perspective is presented based on a deep review. Several research trends were proposed: the integration of CPS including designing interfaces, and integrating heterogeneous components, and tools, verification and testing CPS developing uniform standards and specifications, Blockchain technology implementing blockchain into industry 4.0 manufacturing process, Smart devices creating smart objects using artificial intelligence and IoT, resilient smart factory developing a resilient industrial ecosystem with high reliability, Enterprise Resource Planning ERP evolution due to the rise of CPS and IoT in industry 4.0, future ERP systems must evolve to address needs and new challenges, and industry 4.0 career impacts.

(Ghobakhloo, 2018) focused on identifying industry 4.0 design principles and technology trends. A sum of 14 technology were found in this review along with 9 design principles:

Technology trends - IoT, Internet of Services IoS, Internet of People IoP, Internet of Data IoD, Cloud computing, Big data, Blockchain, Augmented reality AR, industrial robotics, Cybersecurity, Additive manufacturing, Simulation and modelling techniques, CPS, and Semantic technologies.

Design principles - Service orientation, Smart product, Smart factory, Interoperability, Modularity, Decentralization, Virtualization, System integration, and Corporate social responsibility.

A growing interest about industry 4.0 is pointed out by (Kamble et al., 2018) through the number of papers published in relation to the topic between 2012 and 2017. A significant increasing in the published research papers is observed in the year 2016 to 2017. Based on the type of research, the main research direction is still conceptual discussing the concept of industry 4.0 and its topics, followed by case studies papers, while other research direction such as simulation, experimentation,

survey and prototypes are minorities (Kamble et al., 2018). From another side, the corresponding research categories were identified as following: high rated interest in industry 4.0 technologies, shop floor equipment interactions, human-machine interfacing, and sustainability.

(Liao et al., 2017) recognized three essential integration aspects necessary for the transition toward industry 4.0, along with eight priority areas of actions. First, the horizontal integration which covers the integration of the IT systems to communicate various manufacturing and business planning processes including logistics, production, marketing . . . and between several companies. the vertical integration enables the integration of needed IT systems at the different hierarchical level such as actuator, and sensor level, manufacturing and execution level, production management level, and corporate planning levels) delivering an end-to-end solution. The End-to-End digital integration addresses the engineering process so that the digital and real worlds are integrated across a product's entire value chain and across different companies, whilst also incorporating customer requirements. This integration process requires several technical, managerial and organizational actions, such as Standardization and Reference Architecture, delivering a Comprehensive Broadband Infrastructure, Safety and Security, Work Organization and Design, Training and Continuing Professional Development, Regulatory Framework, and Resource Productivity and Efficiency.

Though, according to (Liao et al., 2017), the realization of industry 4.0 requires more research efforts especially in the direction of proposing the detailed roadmap to guide this transformation, a Regulatory Framework, and End-to-End Digital Integration. Beside this, it is worth to mention that Industry 4.0 experiments done in laboratories are far from the industrial applications, in terms of implementation. Moreover, and along with the existing research efforts related to the data analytics, some other area of actions needs to be involved, such as the upgrade of existing technologies, like Programmable Logic Controllers, Production Machinery, and Industrial Robots, to meet the needs of Industry 4.0. However, many research efforts are undergoing in the context of Industry 4.0, such as Standardization and Reference Architecture, Resource Productivity and Efficiency, Vertical and Horizontal Integration, strategic management, decision-making, location tracking, reconfigurability and sustainability.

4. Scientific Context & Research Problematic

The objective of this chapter is to identify the research problematic in the perimeter of the digital transition of manufacturing systems in the context of Industry 4.0, based on an analysis of the literature review. The identification of aspects of Industry 4.0 is classified according to the different phases of the life cycle of the product in order to well define this research positioning and orientation and therefore specify our research problematic concerning the digitization of the manufacturing systems.

This chapter starts from discussing the business model evolution in the context of Industry 4.0 integration in section 4.1. Section 4.2 analyses the aspects of the evolution of manufacturing companies towards the digitalization of industrial processes. Section 4.3 identifies the scope of the integration of Industry 4.0 principles in the manufacturing companies. In section 4.4, a projection of the concepts of Industry 4.0 to the product life cycle is introduced to clearly define the positioning of our problematic. Section 4.5 presents the positioning of our research problematic and the research question of this PhD thesis.

4.1 Business Model Evolution in The Context of Industry 4.0

In the industrial context, the main industrial problematic occurs at the business and strategic level. In the competitive and the ever-changing market, companies are driven by the need for digitalization and flexibility. The aim of this chapter is to clarify the connection between the digitalization of the manufacturing systems and the evolution of the business model of companies especially when considering flexible and connected manufacturing systems. According to (Dalenogare et al., 2018), this new industrial stage is affecting competition rules, the structure of industry and customers' demands. It is changing competition rules because companies business models are being reframed by the adoption of IoT concepts and digitization of factories. From the market point of view, digital technologies allow companies to offer new digital solutions for customers, such as internet-based services embedded in products. From the operational perspective, digital technologies, such as CPS, are proposed to reduce set-up times, labour and material costs and processing times, resulting in higher productivity of production processes. With the service orientation of Industry 4.0 and horizontal integration, new business models can be developed, with new ways to deliver and capture value from customers.

Three proposal are identified by (Ibarra et al., 2018) implicating Industry 4.0 in the business models' components enabling the identification of different ways to transform business models. In the context of Industry 4.0, service-oriented approach, network-oriented approach, and user-driven approach contribute to the improvement of traditional Business Model due to an incremental innovation of both, value creation and value delivery.

Based on this classification, (Ibarra et al., 2018) proposed a new Business Model typology based on the smartization of products and services in order to study the implications of Industry 4.0 in Business Model Innovation. Four ways to conduct the digital transformation in manufacturing companies has been identified according to the innovation degree applied that goes from modifying such a few elements of the business model through an incremental innovation, to the transformation of all the elements of the business models due to a radical innovation:

- **Internal and External Process Optimization**
- **Customer Interface Improvement**
- **New Ecosystems and Value Networks**
- **New Business Models: Smart products and services**

A Business Model describes "the rationale of how an organization creates, delivers, and captures value". Each proposal is described thereby, showing the changes in the value creation (that takes into account the key activities, resources and partnerships), the value delivery (which encompasses the product and services offered, the distribution, communication and sales channels, the customer segments and the established relationships) and the value capture (that describes the costs and revenues gained by the firm).

Within the framework of our PhD thesis, we are interested by the internal and external process optimization dimension proposed by (Ibarra et al., 2018) which concerns mainly the digital integration into the manufacturing systems. This transformation represents an incremental innovation that optimizes the actual business without involving big changes. New enabling technologies such as Big Data, Cloud Computing, Collaborative Robots, Additive Manufacturing, Artificial Vision or Augmented Reality are introduced just to optimize the value creation architecture (key resources and activities) due to increasing efficiency and improving performance (reducing costs, time and failures, employee training, etc.). **This could be the first step for traditional manufacturing companies to embrace the Industry 4.0 without addressing high risks.** The **Table 1** below describes the impacts on each component of the Business Model.

Table. 1. Changes in Business Model components to achieve the internal and external processes optimization (Ibarra et al., 2018)

VALUE CREATION	VALUE DELIVERY
<ul style="list-style-type: none"> • Product and resources traceability: More efficient production, logistics, quality control, inventory management and better maintenance. • Machine to machine: Connect internal processes/Connect Internal processes with suppliers processes. • Employee training: Work from any place at any time, greater and faster communication, knowledge exchange. • More transparent management: Data-driven decision making. 	<ul style="list-style-type: none"> • More flexible offers: Individualized mass production, customization, etc.
	VALUE CAPTURE
	<ul style="list-style-type: none"> • Cost optimization due to more efficient processes and use of resources

To sum up, the digitalisation of the manufacturing systems and the flexibility of the production processes affect companies from several aspects:

The flexibility of the manufacturing systems enables the product diversity aspect through the implemented flexibility into the production processes and assure the product customization functionality regarding the clients demands. Moreover, the digitalisation and the flexibility integrated allow for an advanced and continuous optimization aspect of production systems through the data deployment and the ability to enhance manufacturing processes based on data mining. The third aspect concerns the business level and the strong connection between the flexibility and the digitalisation of the manufacturing systems with the evolution of the economic model of companies. The solid optimisation ability aspect is crucial for companies willing to evolve their economic model, it strengthens the evolution steps first and it guaranties their market stability against the evolution risks. Second, the product diversity aspect is a part of the economical evolution itself when the company could enlarge the variety of products but also this aspect is another key success of the economic model evolution since the integrated flexibility assure important time and effort savings of the industrialization stage. The last dimension affecting the economic model evolution indirectly is precisely the flexible production system itself since it a prerequisite for companies aiming to evolve their economic model toward connected products and service-oriented manufacturing, customer integration purposes and new ecosystems and value networks. To conclude, the digitalized and flexible manufacturing system is the starting point of the economic model evolution in the context of Industry 4.0.

4.2 Analyzing Aspects of Industry 4.0 Integration in the Manufacturing Companies

Based on the above-presented literature review, and referring to the changes and benefits study as well as the axes of research and the business model evolution identified previously, three main aspects could be associated to the integration of Industry 4.0 into the companies as shown in **Table. 2** below:

Table. 2 Aspects of Industry 4.0 Integration into the companies (Bodrow, 2017)

Three main aspects are needed to achieve Industry 4.0 Integration and to apply potentially its promised functionalities into manufacturing companies	
The application of Cyber-Physical Systems CPS and industrial Internet of Things IoT, by implementing CPS blocks with decentralized control via an advanced network	Changes in production
Adapting MES and Enterprise Resource Planning ERP manufacturing execution systems to integrate manufacturing and business processes by adding greater levels of flexibility in terms of control and connectivity .	Changes in logistic
Processing big data collected from processes, machines and products.	Influence of big data and cloud

According to (Bodrow, 2017), changes in production is the application of Cyber-Physical Systems CPS and industrial Internet of Things IoT, by implementing CPS blocks with decentralized control via an advanced network. Changes in logistic is considered by Adapting MES and Enterprise Resource Planning ERP manufacturing execution systems to integrate manufacturing and business processes by adding greater levels of flexibility in terms of control and connectivity. Finally, the influence of big data and cloud is processing and deploying big data collected from processes, machines and products using edge computing and cloud computing.

The classification of these aspects proposed by (Bodrow, 2017) is supported by (Dalenogare et al., 2018), considering three main advantages that characterize Industry from a technological integration point of view: vertical integration, horizontal integration and end-to-end engineering. The vertical integration refers to the integration of ICT systems in different hierarchical levels of an organization, representing the integration between the production and the management levels in a factory, matching and contributing to changes in production. On the other hand, the horizontal integration consists in the collaboration between enterprises inside a supply chain, with resource and real time information exchange, corresponding to changes in logistics. End-to-end engineering is the integration of engineering in the whole value chain of a product, from its development until after-sales. The last dimension End-to-End engineering is assured mainly by processing and deploying data and the influence fact of big data and cloud integration into the manufacturing systems.

4.3 Perimeter of Industry 4.0 Integration into Manufacturing Companies

(Frank et al., 2019) claimed that the concept of Industry 4.0 represents a new industrial stage of the manufacturing systems by integrating a set of emerging and convergent technologies that add value to the whole product lifecycle. Referring to (Frank et al., 2019), Industry 4.0 technologies can be separated into two different layers according to their main objective:

‘Front-end technologies’ of Industry 4.0 considers the transformation of the manufacturing activities based on emerging technologies (Smart Manufacturing) and the way product are offered (Smart Products). It also considers the way raw materials and product are delivered (Smart Supply Chain) and the new ways workers perform their activities based on the support of emerging technologies (Smart Working). We call ‘front-end technologies’ this technology layer because the four ‘smart’ dimensions are concerned with operational and market needs. Therefore, they have an end-application purpose for the companies’ value chain, as shown in the schematic arrow represented in **Figure 5**. It is worth noticing that the central dimension of the front-end technology layer is the Smart Manufacturing, while the other dimensions are interconnected to this one.

'Base technologies' which comprises technologies that provide connectivity and intelligence for front-end technologies. This last layer is the one which enables the Industry 4.0 concept, differentiating this concept from previous industrial stages. This is because base-technologies allow front-end technologies to be connected in a complete integrated manufacturing system.

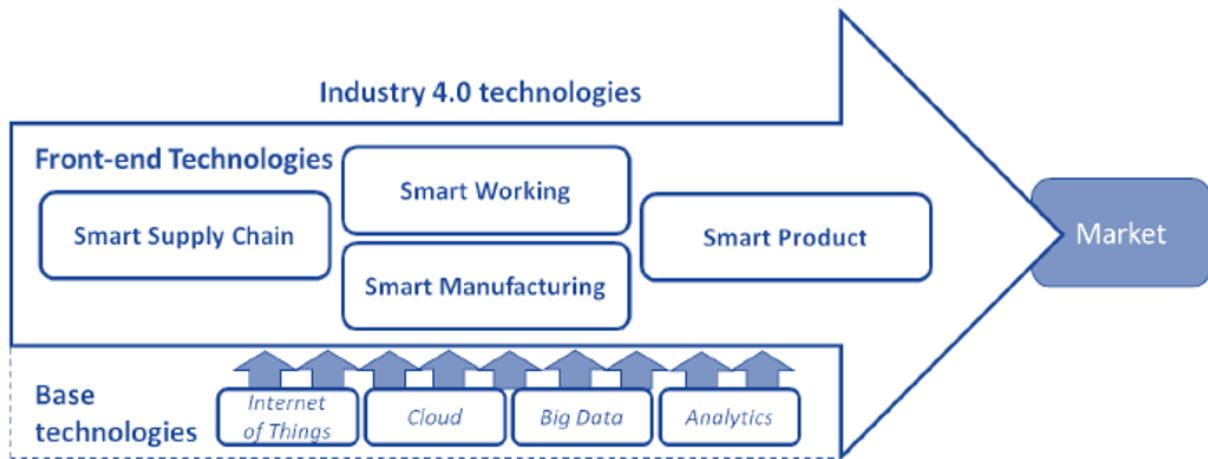


Fig. 5. Theoretical framework of Industry 4.0 technologies (Frank et al., 2019)

This new industrial stage demands a socio-technical evolution of the human role in production systems, in which all working activities of the value chain will be performed with smart approaches (Smart Working) and grounded in information and communication technologies (ICTs).

Industry 4.0 is rooted in the advanced manufacturing or also called Smart Manufacturing concept, which means an adaptable system where flexible lines adjust automatically production processes for multiple types of products and changing conditions. This allows to increase quality, productivity and flexibility and can help to achieve customized products at a large scale and in a sustainable way with better resource consumption.

Industry 4.0 also considers the exchange of information and integration of the supply chain (called Smart Supply Chain), synchronizing production with suppliers to reduce delivery times and information distortions that produce bullwhip effects. This integration also enables companies to combine resources in collaborative manufacturing, allowing them to focus on their core competences and share capabilities for product innovation in industry platforms, a joint effort to develop products and complementary assets and services, with more value-added.

The technologies embedded in the final products (Smart Products) are also part of the broader Industry 4.0 concept. Smart products can provide data feedback for new product development as well as they can provide new services and solutions to the customer. Thus, some scholars consider the smart products as

the second main objective of Industry 4.0, since they allow new business models such as the product-service systems, which create new opportunities for manufacturers and service providers.

At the heart of the Industry 4.0 concept, smart manufacturing technologies form the central pillar of internal operational activities, while smart products take into account the external added value of products, when customer information and data is integrated into the production system. Smart manufacturing considers technologies for manufacturing products (production system), while smart products consider technologies related to product offering.

Therefore, we assume that smart manufacturing is the starting point and primary goal of Industry 4.0, while smart product is its extension. This vision follows the recent chronological evolution of the Industry 4.0 concept, which finds its roots first in advanced manufacturing systems and its connections to other business processes. Regarding the Smart Manufacturing dimension, the main associated technologies include six main objectives: vertical integration, virtualization, automation, traceability, flexibility and energy management, and will be discussed the state-of-the-art chapter.

To sum up, Smart supply chain focuses on the connection of the manufacturing system with the supply chain and therefore it is concerned by the horizontal integration toward the value chain, while Smart working provides support for different needs of the Industry 4.0 production system and focused on integrating the worker with the manufacturing system. Smart working environment has two dimensions. First dimension considers supporting the working power toward the integration of new technologies and helping them through maintenance and operation tasks. Seemingly, the second dimension of smart working environment is strongly related to the smart manufacturing integration considering the industrialization phase of new products and supporting engineers with operating the new manufacturing system.

4.4 Attributing Industry 4.0 Integration to Product Life Cycle, Research Positioning Identification

Based on the categorization proposed by (Frank et al., 2019), each dimension could be associated to a lifecycle phase of the product from an engineering point of view. As presented in **Figure 6**, the integration of Industry 4.0 aspects into the manufacturing companies are associated to the different lifecycle phases of the product. The aim of this figure is to highlight our interest in the **Manufacturing dimension** and therefore clarifying our research positioning focusing on **the digitization of manufacturing systems in the context of Industry 4**. The Smart Product aspect concerns mainly the design phase by adapting the Production-service-system PSS as design pattern and embedding sensors and software to the product in order to integrate the concept of service orientation to the connected products. The Smart Working Environment concerns basically the industrialization phase of the product lifecycle, by integrating innovative support tools to the operators and assisting the production engineers

in the production and the process planning tasks. The Smart Production Systems aspect considers directly the manufacturing phase, and is the main objective of this research which will be discussed in the next section. The Smart Production System or the Flexible Manufacturing System is mainly concerned with flexibility and vertical integration. Lastly, the Smart Supply Chain is associated to the services related to the product across the whole value chain concerned mainly by the horizontal integration.

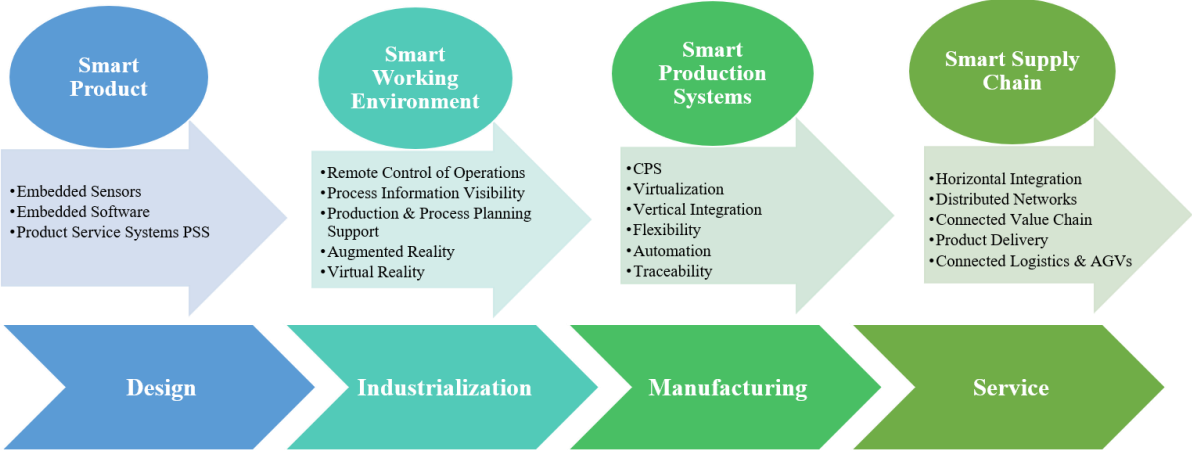


Fig. 6 Projection of Industry 4.0 integration into manufacturing companies

In summary, our research focuses on the integration of 4.0 concepts and technologies into manufacturing systems. Therefore, the main objective of our research is to develop a model as a decision-making support tool to help companies aiming to drive toward the digital integration of manufacturing systems and processes based on a scientific approach. The purpose with developing such model is to improve the flexibility and performance of production systems and processes through digitization and 4.0 technologies implementation, and to enable the manufacturing of product diversity along with enhancing the product quality.

4.5 Positioning & Problematic

Manufacturing companies can focus on different needs they may have when prioritizing the implementation of the aforementioned “smart manufacturing” technologies. However, recent literature has shown that the industry varies in terms of the expected benefits of these technologies and should systematically consider implementing smart manufacturing functionalities through the deployment of these technologies to achieve a level of maturity compatible with Industry 4.0 concepts.

This means that smart manufacturing technologies can be interdependent and create an active synergy for Industry 4.0. The synergistic “Smart Manufacturing” integration supported by technological integration as tools of 'digitization' potentially fits into the configuration and functional evolution of

'production processes', which has a direct effect on the evolution of the manufacturing system architecture. New manufacturing systems are able to adjust their production capabilities and use advanced features to meet customer demands on time. The flexibility of manufacturing systems applies not only to a factory's hardware components such as robots and machines, but also to its information and communication technology (ICT) infrastructure including networks, data transfer, storage and processing.

The IoT results in CPS cyber-physical systems which integrate physical objects of the factory with the virtual dimension of the factory, including integrated data, artificial intelligence, and simulation. Therefore, manufacturing companies aiming for a higher maturity level of Industry 4.0 should consistently adopt most smart manufacturing technologies, as these technologies are interdependent. The adoption of this advanced technology in turn results in data generation, helping to improve and optimize production processes once that data is processed and exploited.

This analysis leads us to define the positioning of our research problem '**which model for a successful digital transition of 4.0 manufacturing systems?**' This problematic lies between the three axes defined by **Figure 7**, 'digitization', 'manufacturing system', and 'production processes'.

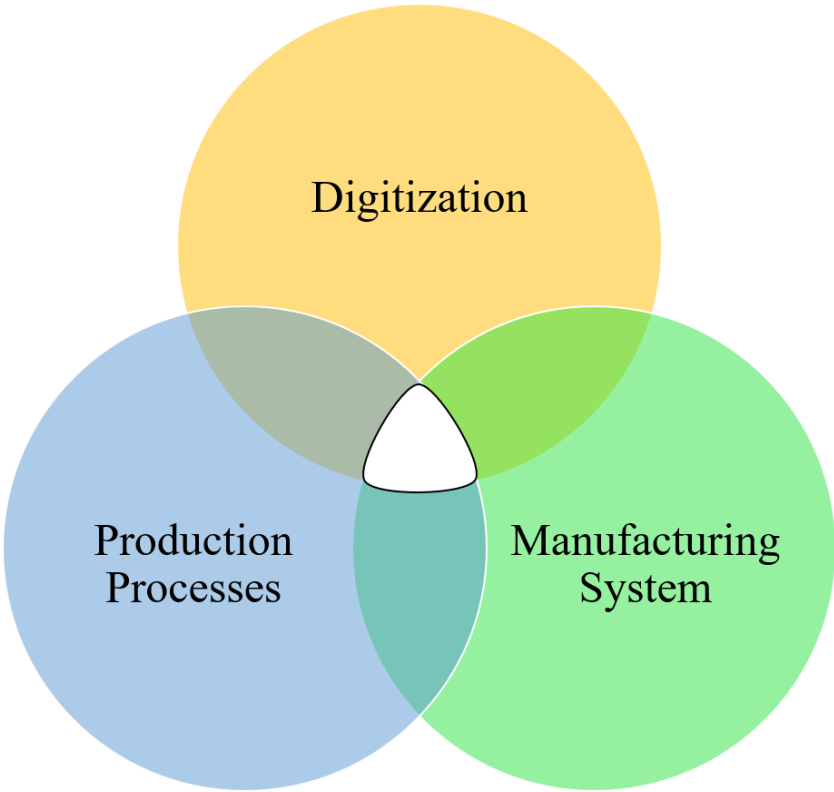


Fig. 7 Positioning of the research topic

The evolution of the manufacturing system in the context of Industry 4.0 is considered the starting point to answer the research question identified. This development must first take into consideration the

current state of the manufacturing system to subsequently establish its digital transition by providing it with advanced functionalities. Digitization is one of the technological tools offered by Industry 4.0 to apply the targeted functionalities on the production system. The functionalities and advanced technologies integrated into the production system seem to overlap with the evolution and digitization of the various production processes with the aim of improving their performance.

The definition of these three dimensions helps us adapting our research direction in order to respond to the identified problematic. At this stage, our approach consists in exploring a broad state of the art study in order to identify the fundamental concepts necessary for the construction of a 4.0 production system model with the objective of guiding companies in the digital transition of their production systems. These concepts of different but complementary natures should overlap, interface and interconnect in order to create a coherent production system and detailed enough for pragmatic deployment. The proposed model will be followed by a Framework for the digital transition of production systems as a support tool aiming to guide the 4.0 digital integration into existing production systems.

5. Digitization of Manufacturing Systems in The Context of Industry 4.0 – State of the Art

Talking about successful integration models of Industry 4.0 holds doubts in the implementation process and the use of new technologies. While the recent industrial revolution came with the discovery of a novel technology or a new source of power, Industry 4.0 holds several aspects and a combination of technologies to be implemented into the whole value chain of an enterprise. Industry 4.0 is not offering a mechanized steam machine to be added to the production line or a functionality aiming to optimize the production time, it is a full transformation proposal, interconnected industry, a smart factory, and whole new approach to enhance production processes performance.

In this chapter, we aim to clarify the main challenges following the implementation of Industry 4.0 from the literature point of view and from our perspective regarding the direction of our research. Section 5.1 analyses general challenges regarding manufacturing systems evolution. The following section 5.2 is devoted to the classification of issues related to the integration of technology 4.0 in manufacturing systems that fit into the dimension of "vertical integration". This classification takes into consideration the three areas identified in the previous chapter "Production System", "Digitization" and "Production Processes" in order to respond to our research problematic. The main concepts identified in section 5.2 specifically the flexibility, the modularity, information and communication technologies (ICT), and the vertical integration are presented respectively in the following sections. Then, a state-of-the-art analysis of recent architectures and models proposed in the literature will be carried out in section 5.5. Finally, section 5.6 provides a summary of positioning toward the state of the art.

5.1 General Challenges Regarding Manufacturing Systems Evolution

Challenges regarding the concept of the fourth industrial revolution could be identified in two main themes referring to (Erol and Schumacher, 2016), strategic and technical challenges. Respectively, companies aiming to apply this transformation are in great need for support and guidance in finding a proper strategy towards coping with the challenges imposed by Industry 4.0 due to its complexity and the lack of existing roadmaps. (Erol and Schumacher, 2016) addressed the fact that Industry 4.0 is a methodology more than being just a technology. As mentioned by the National Academy of Science and Engineering in Germany (Kagermann et al., 2013), Industry 4.0 is a paradigm shift in business operations, rather than a technology-based improvement of production capabilities. While companies are trying to implement some technological innovations in order to attain short-term market advantages, the methodological integration of Industry 4.0 into the whole value chain has a greater impact on the company's future business. Industry 4.0 applies substantial changes in businesses affecting small, medium, and big-sized enterprises, specifically in three areas: changes in production, logistics, and data deployment. (Bodrow, 2017) referred the issue of applying these changes to the information system and

the software tools when the classical automation structure does not present the best solution for industry 4.0 as it is not flexible enough for adapting to the dynamic changes in the order flow and at the shop floor as at the business layer.

(Santos et al., 2017) negotiated the challenges of Industry 4.0 implementation by proposing different political strategy and integration scenario, taking into consideration the market aspects. Based on cost-benefit analysis, Successful implementation and absorption of Industry 4.0 is highly dependent on the market width and depth of the company. The company has to decide whether it implements Industry 4.0 technologies internally (develop in house) by simply buying and installing them or engaging with technologies providers and integrators. This decision has to be taken precisely regarding the overall benefits of the company since outsourcing Industry 4.0 capabilities has a great impact on the internal strategy, meanwhile it may decrease significantly the implementation costs. Industry 4.0 will increase the enterprise performance if it is coupled with the new product development strategy. The challenge of Industry 4.0 implementation is not only about the capital of investments. the transformation toward Industry 4.0 affects many areas of interest of the companies. The engagement with the digital transformation requires consequently developing strategies for exploring and exploiting new markets, responding the mass production and customization. Otherwise, the production costs may increase dramatically with the risks of underutilization of production systems.

From the technical implementation perspective, industries are still holding doubts about implementing new technologies, because of unclear possible benefits, lack of clear implementation details, and the seemingly large investments required (Theorin et al., 2017a). Several studies indicated that high investments, the complexity and required know-how, as well as the unsuitability of existing IT-Infrastructure and technologies which disturb the vertical and horizontal integration, are the main restraints for realizing Industry 4.0. According to (Zhou et al., 2015), the implementation of Industry 4.0 faces many challenges in the way, from various areas such as scientific, technological, and economic challenges. The main relative challenges are the development of smart factories, the construction of the network environment, CPS modelling, and the integration of CPS which is an enormous challenge for SME's (Goerzig and Bauernhansl, 2018).

Well, the development of smart factory requires the implementation of smart devices into different production stages, while the latter necessitate a long and deep work of development followed by the testing process, beside its costs. The construction of the network environment in Industry 4.0 is another challenged task. It requires the implementation and the integration of the CPS platform. To do so, first, the cooperation between physical and computing systems is to be considered, in order to ensure the real time communication and process control. Second, regarding the CPS modeling, the behavior between the physical and computing processes needs to be well studied. The physical environment,

software and hardware platforms, and network models as well as any further scheduling software required, network delays, power consumption and other functional and non-functional factors are to be taken into consideration. At the end, the integration of CPS is to be examined carefully regarding its complexity, along with developing a flexible interface which supports this heterogeneous combination of components. The big data analysis and processing is another layer of complexity and development, which constitutes a serious challenge. Managing the large amount of data introduces the information protection and privacy issues, as well as the real time integration and analysis. Finally, the digital manufacturing involves all the value chain of an enterprise increasing the need for cyber security (Zhou et al., 2015).

(Dalenogare et al., 2018) addressed the adoption of emerging technologies of Industry 4.0 from a socio-technical perspective. They identified three socio-technical dimensions considering the digitization process towards the Industry 4.0 implementation. First dimension considers the organization of work since the implementation of new technologies requires a to rethink how the organization will operate. The second dimension considers the human factors and the fact that new technologies require new competences and skills from the workers. Thirdly, external environment is considered since the adoption of new technologies are dependent of the maturity where they are implemented.

(Sung, 2018) identified the main challenges of Industry 4.0 based on the economic effects of the digital transformation, including, IT security issues, Reliability and stability needed for critical machine-to-machine communication M2M including very short and stable latency, Need to maintain the integrity of production processes, Need to avoid any IT snags as those would cause expensive production outages, Need to protect industrial knowhow (contained also in the control files for industrial automation gear), Lack of adequate skill-sets to expedite the march toward the fourth industrial revolution, Threat of redundancy of the corporate IT department, General reluctance to change by stakeholders, Loss of many jobs to automatic processes and IT-controlled processes, especially for lower educated parts of society.

(Xu et al., 2018b) considered four main challenges facing Industry 4.0 integration. Technical challenges include the need to develop the existing Information and Communication Technology ICT infrastructures, the scalability resulting from the network growth and the large volume of data, data science and analytics, and IoT technical integration and connection. In addition to the technical issues, (Xu et al., 2018b) addressed the need for standardization regarding the rapid growth of IoT, and finally the information security and privacy protection.

The required extension of products by digital components to the point of cyber-physical systems and their integration into service systems leads enterprises in mechanical engineering into a fundamental change process – the digital transformation. Besides mechanics and electronics, they now need to

develop digital capabilities and implement them into fast-changing, cross-company processes and structures. Especially for small and medium-sized enterprises SMEs this is an enormous challenge (Goerzig and Bauernhansl, 2018).

To sum up, the challenges facing the successful integration of Industry 4.0 into the manufacturing systems can be classified into two main dimensions, the business dimension, and the manufacturing integration dimension. The first-dimension concerns company's strategy and perspective for evolution regarding its core business activities and its aim of evolution. Industry 4.0 and digitization are dramatically driving companies to adapt to the saturated and globalized market, where producing in quantity 'Mass Production' is no longer suitable to respond to the increasingly individualized demand 'Mass Customization'. Faced with this problem, the responsiveness and adaptability of production systems are major assets to adapt to fluctuations in demand (Erol and Schumacher, 2016). Therefore, the evolution of the manufactured systems becomes necessary and imperative in order to scope with the business challenges. Hence, technical challenges arise, several studies indicated that high investments, the complexity and required know-how, as well as the unsuitability of existing IT-Infrastructure and technologies which disturb the vertical and horizontal integration, are the main restraints for realizing Industry 4.0. These challenges drive us far to negotiate the ability of the existing manufacturing systems to be adapted into digitization when dealing with its architecture and IT infrastructure. The next section is dedicated to classify the challenges regarding the integration of Industry 4.0 into the manufacturing systems in order to conclude the main problematic of the research.

5.2 Vertical Integration in The Context of Industry 4.0

The detailed state-of-the-art findings regarding strategic and technical challenges led us to identify the main concepts of the evolution of manufacturing systems in the context of Industry 4.0. These concepts are about a superposition of principles and technological blocks related to different areas affected by the digitization of production systems as shown in **Figure 8**.

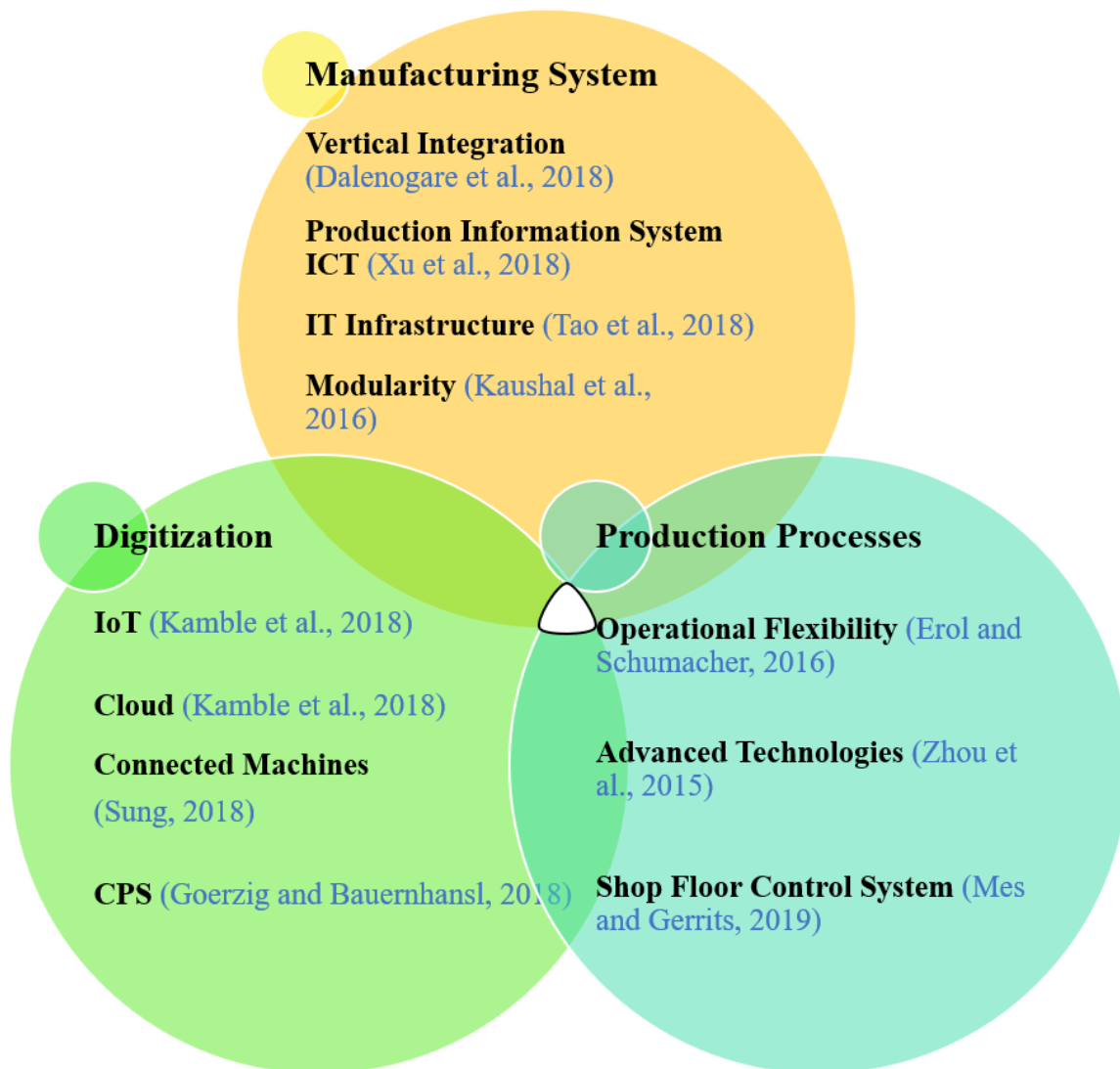


Fig. 8. Main concepts of the digitization of production systems

Actually, the diversity of challenges and integration issues identified above, drive us to summarize these overlaid challenges. **Figure. 9** classified these overlaid challenges and assigned them to a central topic, by considering the dimension of vertical integration as the main issue. First of all, ICT and the production information system is an essential dimension identified in the literature, which considers mainly the limitations of the existing ICT infrastructure and the required changes needed to fit the new configuration of the digital manufacturing system (Xu et al., 2018b). Alongside, the information system design is another challenge especially when coping with advanced technologies, implementing specific services into the manufacturing system (Bodrow, 2017) and adapting cloud computing to enhance data analysis (Kamble et al., 2018). Second, the modularity of the manufacturing systems is another key challenge as identified by (Kaushal et al., 2016). The modularity concept includes several dimensions such the CPS development and integration into the manufacturing system (Goerzig and Bauernhansl, 2018), and deploying modularity into the Shop Floor Control System SFCS (Mes and Gerrits, 2019).

Third, the Flexible Manufacturing System in the context of Industry 4.0 is a main challenge (Theorin et al., 2017a), which comprises the advanced technologies implementation issue (Zhou et al., 2015), flexible operations deployment at the shop floor (Erol and Schumacher, 2016), and connected machines configuration matters. Lastly, these diverse key challenges could be all considered under the vertical integration challenge (Dalenogare et al., 2018), which concerns in addition the IT infrastructure dimension (Rojko, 2017), the IoT implementation (Kamble et al., 2018), and data Integration issues (Rüßmann et al., 2015a).

Following this analysis of the concepts and challenges of the digitization of production systems, we propose a state of the art dedicated to the flexibility and modularity concepts. In section 4 we review the shop floor control system and the ICT structure, along with discussing the vertical integration in favor of 4.0 functionalities, and analyses recent 4.0 architectures. The Data dimension is introduced in section 5.

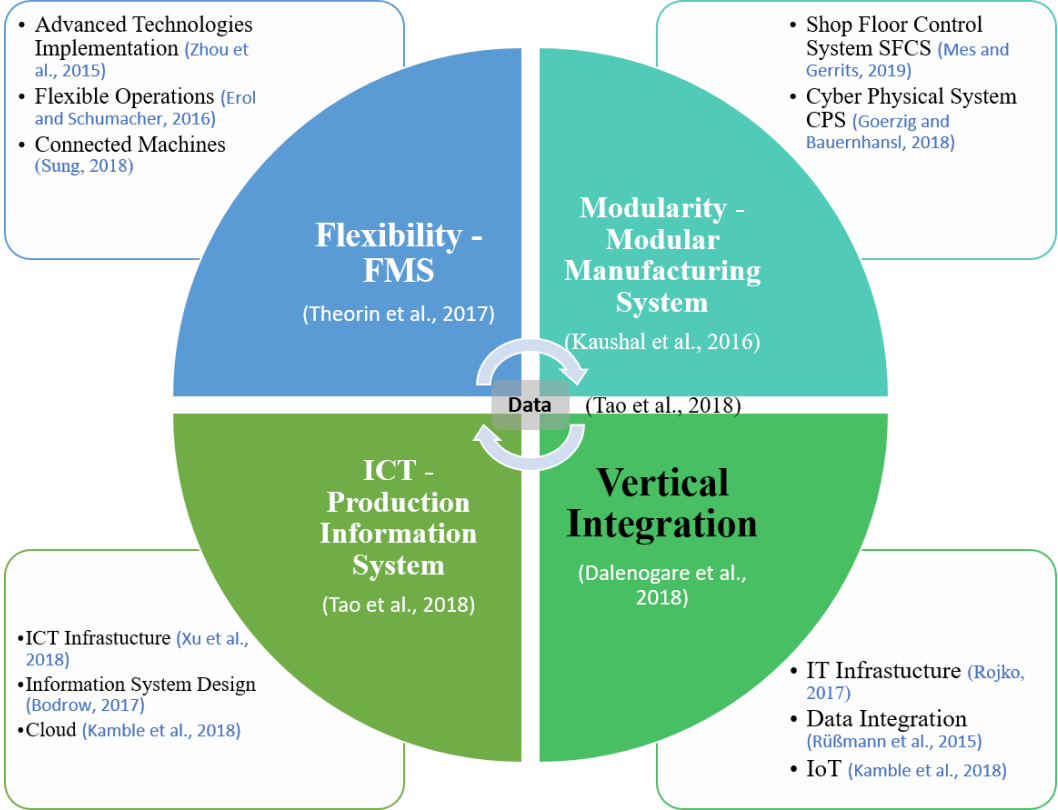


Fig. 9. Framework of Industry 4.0 Integration Challenges into The Manufacturing Systems

5.3 REVIEWING FLEXIBILITY AND MODULARITY IN THE CONTEXT OF INDUSTRY 4.0

In a saturated and globalized market, producing in quantity ‘Mass Production’ is no longer an adequate response. It becomes necessary to adapt the manufactured products to the increasingly individualized

demand 'Mass Customization'. Faced with this problem, the responsiveness and adaptability of production systems is a major asset to respond to fluctuations in demand (Erol and Schumacher, 2016).

Several studies were conducted in the literature in the context of product customization focusing on incorporating the configuration principle into process planning aiming to promote the process plan generation. (Schierholt, 2001) identified the process configuration concept which is meant to simplify the process planning generation for new product variant using principles known from the product configuration concept. Two main concepts for process configuration systems were presented by (Schierholt, 2001): interactive process configuration and automation-based process configuration. (Zheng et al., 2008) proposed a systematic knowledge model for multiple variants of products and applied a process configuration method for rapid process planning by applying configuration rules. A tree unification approach is proposed by (Zhang and Rodrigues, 2009) to develop generic processes from existing production data of product families helping companies to fulfil a diversity of customized products and therefore reducing cost and lead time.

While, in the context of Industry 4.0, an enhanced process configuration can be enabled through the flexibility and adaptability of the production systems. Traditional industries are currently undergoing a digital transformation and industrial processes are increasingly merging with modern information technologies. This new industrial revolution is mainly characterized on the one hand by connected and interoperable production machines which are driven intelligent. And on the other hand, by new functionalities such as flexibility, prediction, modularity, and mass product customization. In other words, industry 4.0 contributes to enhance the process configuration in order to produce increasingly individualized products with a short lead-time to market and conform to the required quality. A lot could be saved in the reconfiguration reuse of the production equipment or indeed dynamic changes in the product at the top end of high agility (Schlapfer et al., 2015).

Although, several research and studies are undergoing in the industrial firm aiming to introduce fast, effective and cost-effective solutions in order to enhance the flexible manufacturing concepts in the existing production lines. Based on the promised facilities of industry 4.0 technologies and its ability to integrate the business processes and activities, including Big Data and Analytics, Autonomous Robotic Systems, Cloud Computing, Industrial Internet of Things, Simulation and Prototyping, Additive Manufacturing, Augmented Reality, Horizontal and Vertical Integration, and Cybersecurity (Rüßmann et al., 2015a), the manufacturing system can increase the flexibility of the manufacturing processes (Kamble et al., 2018).

From another side, (Mes and Gerrits, 2019) addressed the fact that hierarchical control systems are not perfect for the need for a more diverse product mix. Therefore, more flexible and reconfigurable manufacturing concepts have been introduced consisting of autonomous and intelligent controller

modules. These modules dynamically interact with each other to achieve local and global objectives. Some of the industrials such as ABB (Bloch et al., 2018b) started developing what is called the Modular Type Package MTP, an initiative to change the control process infrastructure in the shop floor, driving the way of a small automation concept as defined by (Strategy&, 2015). According to (Mourtzis et al., 2016), Computer-Aided Process Planning CAPP must consider highly customized product variants in a dynamic manufacturing environment, rather than operating in isolation from shop floor production data and suffering from the lack in interfacing with the IT systems. Therefore, they proposed an Internet-based service-oriented system for adaptive process planning based on machine availability monitoring assuring the real-time collaboration between process planning and execution.

In this context, the flexibility of production systems appears as a necessity to maintain the competitiveness of industrial enterprises. This evolution is part of the transition to industry 4.0. The purpose of this research is to present a new control architecture that runs in a modular mode to define and reconfigure the production plan in a short time compared with the traditional approach. This novel modular approach is meant to overcome limitations without changing the whole existing control process but by moving the decision-making process to the Manufacturing Execution System (MES) layer to enhance flexible production operations.

According to PwC Stratgy& Global Digital Operations Study (Geissbauer et al., 2018), four digital ecosystem layers are the foundations of an industry 4.0 system, **Fig. 10**:

- Customer Solutions Ecosystem: in our case, the capacity to capture the demand, its variability and the needs for customization will feed the modular production system.
- Operations Ecosystem: in our case, the heart of the system is a Flexible Manufacturing System with a modular approach.
- Technology Ecosystem: in our case, MES, API, machines and sensors with connectivity are the key technological elements.
- People Ecosystem: in our case, we take into account the ordinary skills of production people to manage production avoiding complex programming of API.

The flexibility of the production machines and the modularity of the manufacturing operations are two indissociable concepts to achieving new functionalities in terms of flexible production. This means that machines will operate independently or in coordination with humans to manufacture customer-oriented product (Sung, 2018). In order to achieve these goals in the industry, special attention should be paid to several level of manufacturing, particularly machines (shop floor tools & equipment), control, and manufacturing execution systems. Therefore, we present in the next section the concept of FMS and modular process. The FMS is a requirement prior to the implementation of a modular process of manufacturing operations.

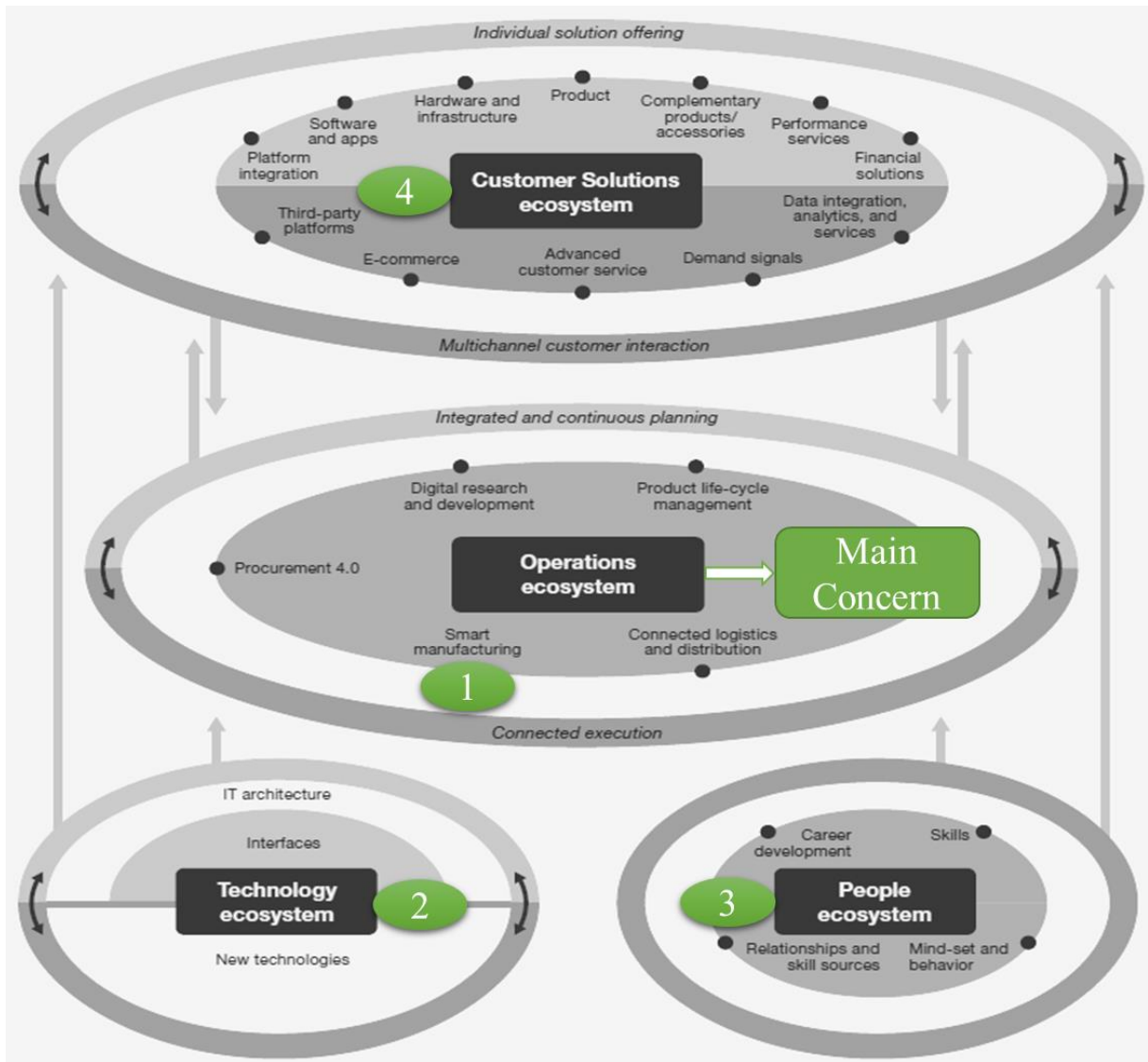


Fig. 10 The four digital ecosystem layers (Geissbauer et al., 2018)

5.3.1 Flexible Manufacturing Systems FMS in the context of Industry 4.0

Industry 4.0 is a complex combination of innovative functionalities and technologies, integrated to enhance the production performance (El Zant et al., 2021). The realization of a flexible manufacturing system is highly dependent and driven by the ability of companies to invest in new flexible manufacturing machines (ElMaraghy, 2005) and robots, especially when reinforced by advanced technologies introduced by the 4.0, without which no modular process of production operations can be developed. As example, the Robotics Process Automation RPA or the robotics' integration are key elements to increase productivity and shorter lead times, and to increase customer experience and scaling of automation (Mourtzis et al., 2016).

A Flexible Manufacturing System FMS is differentiated from a traditional production system by its ability to perform multiple operations from a limited number of resources. The FMS thus becomes an

interesting concept to adapt the production to a constantly changing environment, since it makes it possible to avoid long periods of downtime related to the reorganization of the processes. According to (Kaschel C. and Y Bernal, 2006), Flexibility refers to the ability of a manufacturing system to respond cost-effectively and rapidly to changing production needs and requirements. This capability is an essential key to the design and operation of manufacturing systems to overcome the unpredictable market movement. The scheduling flexibility has to be integrated, offering a reliable decision-making responding to the clients' order and the market evolution. By reducing the number of operations necessary for its reconfiguration, an FMS improves performance in terms of costs and deadlines, the FMS allows quality benefits. (Fragapane et al., 2020) claims that manufacturing flexibility enhances productivity with a fast adaptation to the ever-changing client demands, thus, reducing costs and resources. (Fragapane et al., 2020) investigated the decentralization of material flow which can provide more flexibility for production systems using Autonomous Mobile Robots AMR in the Process Industries PI for high mix production and addressed that new planning and control models are needed for production networks and decision-support systems in order to control material flows in the era of Industry 4.0.

According to (Qin et al., 2016), The reconfigurable manufacturing system is the closest to a smart factory system, followed by the flexible manufacturing system. (Mabkhot et al., 2018) identified the suggested requirements in terms of design principles of the smart factory, mentioning the 'modular machine tools' referring to the flexibility of machines and workstations to be reconfigured in terms of changing the shop floor layout and adjusting the process function, and 'modular material handling' equipment refers to the possibility of reconfiguring material handling equipment (i.e., conveyors, Automated Guided Vehicles AGVs) on the shop floor or changing equipment capability to transfer the required product. (Mourtzis et al., 2012) studied the flexibility regarding product and volume changes in the design phase, considering alternative solutions such as conventional press, CNC and laser machines for a system's punching department producing commercial refrigerators. Based on investment cost and return performance, (Mourtzis et al., 2012) proposed a methodology using Penalty of Change POC method to evaluate the implementation of critical capital investment decisions in the manufacturing technology. (Mourtzis et al., 2020) presented the design and development of a flexible manufacturing cell as learning factory in the goal of minimizing the human intervention in the production processes using a robotic arm mounted with an HD camera to perform the quality control task. (Mazars and OpinionWay, 2018) summarized the advantages and disadvantages that arise from the operation of an FMS. On the benefits side, we mention the rapid adaptation to market evolution both in quantity and customization, reduction of stocks, better control of production by providing real-time information, better use of equipment, reduction of direct labour (contribution of automation), and reduction of the general expenses (less expectations, losses, ...). On the disadvantages side, it is relevant to take into consideration the high cost of realization, the complexity / sophistication of the implementation, the

heavy incidence of uncertainties in certain cases (grouping of operations on the same means), and the need for qualified personnel and specific skills in modern technologies.

5.3.2 Modularity in the context of Industry 4.0

Modularity is a principle of Industry 4.0 and one of its essential functionalities. Answering the client demands, the modular production systems give the possibility to adapt and adjust modules of the production process in a more comfortable and useful way depending on the production and the product evolution. Modularity is concerned with shifting from linear manufacturing and planning, toward an agile system that can adapt to ever-changing circumstances and requirements, without the need for a huge and sophisticated redevelopment and reprogramming work. In other words, the modularity is a potential solution enabling what is called product customization (Kumar, 2007), the key principle of Industry 4.0. Modularity involves the entire production and manufacturing levels, and builds on agile supply chain, flexible material flow systems, modular decision-making procedures, and flexible processes (Ghobakhloo, 2018). According to (Weyer et al., 2015), the high product variability with shortened product-life cycles for new products demands requisites an agile and flexible production structure. They addressed Cyber Physical Systems CPS and IoT to be implemented along with the need of coordinated standardization between technologies and automation for interoperability purposes in order to assure modular factory structures and enable dynamic re-engineering processes.

In terms of investment decisions, modularity in FMS moves the trade-off between the other traditional production systems (Kaushal et al., 2016). By switching easily in a high range of volumes or variety, modular production systems can replace shop floors with stand-alone machines or dedicated lines and improve the capacity of the production system for dealing with uncertainty, **Fig. 11**. More specifically, A production system can be defined as a set of modules connected by flows, with the function of transforming raw materials into a product. The overall flexibility of the production system stems logically from the flexibility of the modules and flows that compose it.

Modularity is not only being able to change the layout of the shop floor simply but also have a flexible structure that allows the extension of the module to increase production capacity or integrate new functionalities (Mabkhot et al., 2018). A module is loosely coupled and can be moved, added, or removed from the system in a plug-and-play manner. (Gorecky et al., 2016) described a module as a puzzle block that can work alone or in combination with other modules to form a production system.

The planning phase of production operations has a crucial technical aspect which requires on the one hand defining the production capacity of the machines, this parameter is classic and not much variable. On the other hand, to know the way in which the production operations are structured, this parameter is recent and has been introduced recently by various works published in 2017 for the automation of modular process plants. (Bloch et al., 2017) introduced the concept of modularity of production operations within the framework of a joint project between TDU and the ABB research centre on the theme 'Information Models and Architecture for Modular Concepts in the Process Industries'.

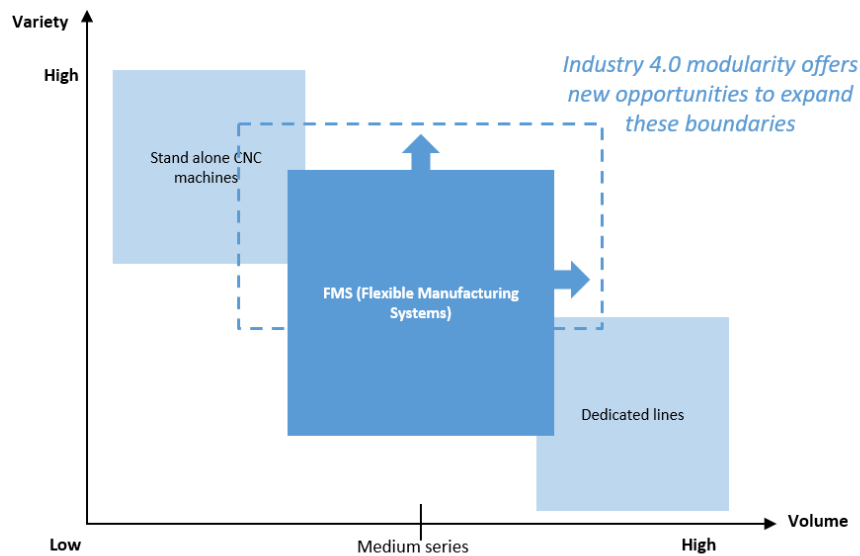


Fig. 11 Application characteristics of FMS, adapted from (Kaushal et al., 2016)

Several research and development contributions has been published in the context of modular production systems. (Weyer et al., 2015) presented the SmartFactoryKL, a modular production system and a novel project for cross-vendor solutions, addressing standardization as the crucial challenge for highly modular, multi-vendor production systems. (Bloch et al., 2018a) of the IAT institute published works in 2018 where he considers the problematic of modular operations as an approach that meets the increasing demands for flexibility in the manufacturing industry. He also addresses the problem of conventional control systems that do not properly support flexible production systems. According to (Perzylo et al., 2019), instead of producing high quantities of similar products over a long period of time, companies have to satisfy the market demand for customized or even individualized products. As a result, their production lines may have a multitude of different variants, which may only be produced in small lot sizes. (Bloch et al., 2018b) suggested the modularization of the process control system, using different process modules. These process modules will provide encapsulated process functions as services to the superior control system SCS. Within the SCS, services are orchestrated by the plant operator to achieve the desired production process. (Fan et al., 2020) proposed Function Block FB based Closed-Loop Adaptive Machining CLAM for adaptive process planning and execution. IEC 61499 FBs enabled High-

Level Controller HLC are designed to plan and execute the finishing process planning referring to initial process planning and instantiation. Low-Level Controller LLC are implemented to manage low-level tasks, such as, motion control, and data acquisition.

5.4 Reviewing Traditional & Proposed 4.0 Architectures

This section discusses the challenges facing the evolution of manufacturing systems in terms of ICT infrastructure, starting from the limitations of the traditional manufacturing IT system structure, addressing technical and control issues, and thereafter presenting several proposed 4.0 architectures from the literature, followed by a brief discussion.

5.4.1 Traditional Hierarchical ICT Structure

Information and communications technology ICT is an extensional term for information technology IT that stresses the role of unified communications and the integration of telecommunications (telephone lines and wireless signals) and computers, as well as necessary enterprise software, middleware, storage, and audio-visual systems, that enable users to access, store, transmit, and manipulate information (“Information and communications technology,” 2021).

Figure 12 shows the ICT roadmap proposed by many researchers (Chen, 2017; Kaynak, 2007; Wilamowski, 2005), as well as its evolution through different industrial revolution stages reaching the industrial information integration for the emerging era of IoT and CPS (Xu et al., 2018a).

The advances in manufacturing technologies in the middle of twentieth century were behind the rise of the ICT, especially after introducing automation and microelectronic technology into manufacturing. In the Third Industrial Revolution, the advancement of ICT was at the core of every major shift of the manufacturing paradigm. The widespread adoption of computer numerical control CNC and industrial robots made flexible manufacturing systems FMS possible; the technologies for computer-aided design CAD, computer-aided manufacturing CAM and computer-aided processing planning CAPP made computer integrated manufacturing CIM possible (Feng et al., 2001).

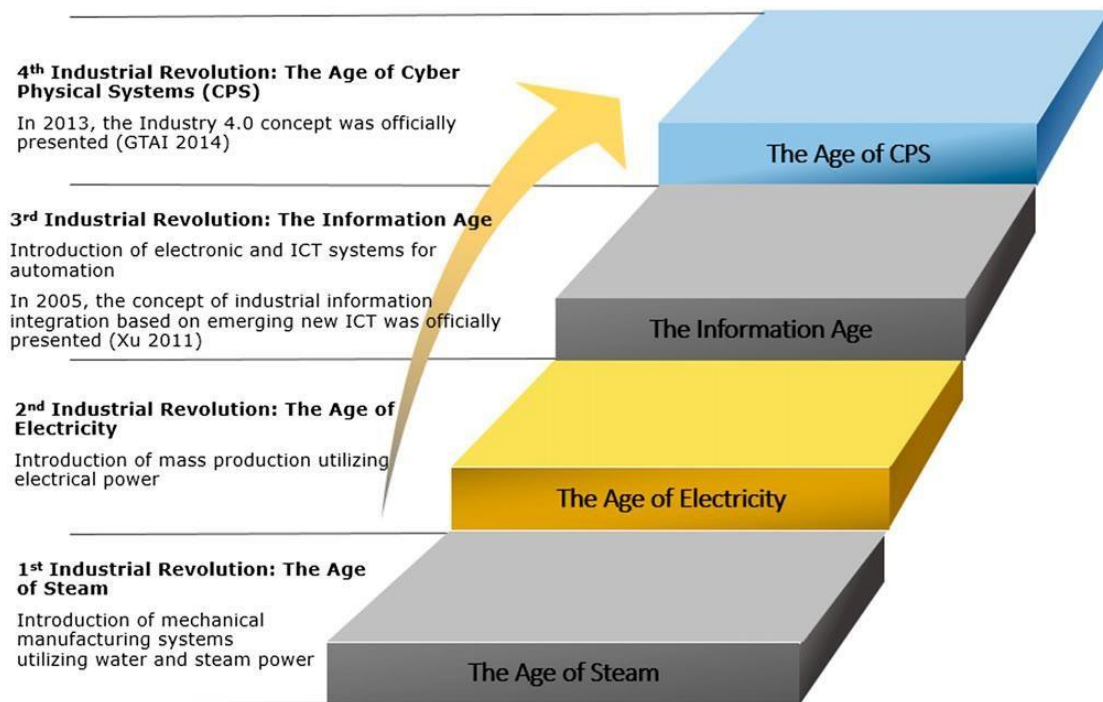


Fig. 12 The ICT evolution from Industry 1.0 to Industry 4.0 (Xu et al., 2018a)

Industry 4.0 is mainly represented by CPS, IoT and cloud computing (Henning et al., 2013; Hermann et al., 2016; Jasperneite, 2012; Lasi et al., 2014; Moeuf, 2018). IoT is the key enabler of the advanced manufacturing systems such as the cloud manufacturing similar to cloud computing, and a main support to the smart factories development. Cloud-based manufacturing can contribute significantly to the realization of Industry (Thames and Schaefer, 2016). CPS is the core foundation of Industry 4.0. CPS enables a higher level of integration and coordination between physical and computational elements (Gürdür et al., 2016). Research indicates that with the introduction of CPS, machines will be able to communicate with each other with decentralized control systems and therefore optimize the production. Industry 4.0 generally comprises many complex components, and has broad applications in numerous industrial sectors (Xu et al., 2018a).

Traditional ICT structure in conventional production systems is presented by the Computer Integrated Manufacturing CIM pyramid **Fig. 13**. At the enterprise management level, orders are treated along with resources and long-term planning in the Enterprise Resource Planning ERP system, supporting business planning, supply chain management, sales and distribution, accounting, and human resource management. In traditional ERP tools, the decision process is centralized on the highest level of the automation pyramid. Most of the available ERP solutions do not support fast adaptation in production planning due to unplanned events (Rojko, 2017).

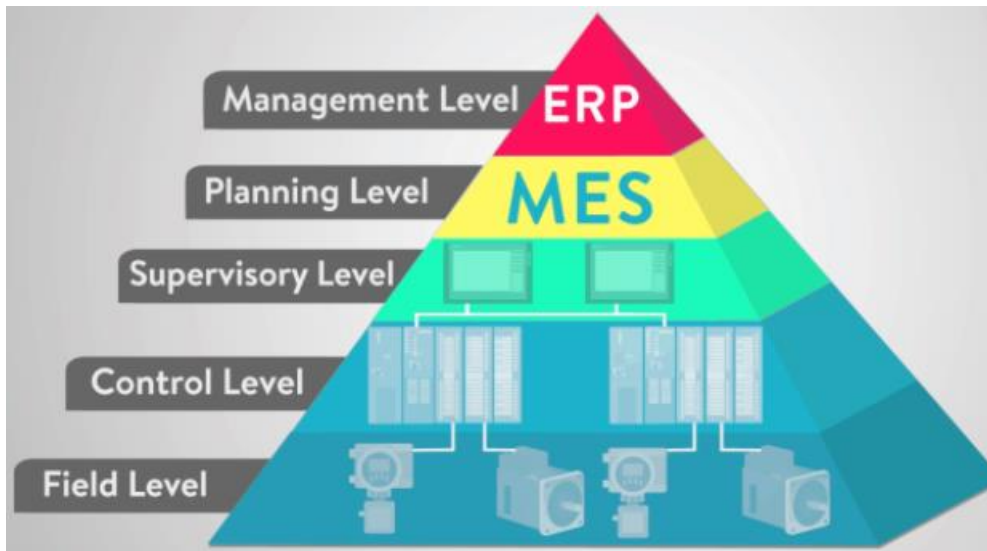


Fig. 13 CIM Pyramid

At the second level of the traditional automation pyramid, the Manufacturing Execution System receives the orders as the executive manager and in his turn forwards the commands to the API / Controllers layer to run the respective production program of a certain product thus operating production lines and machines. MES has several functionalities including production reporting, scheduling, dispatching, product tracking, historization, maintenance operations, performance analysis, and it covers aspects such as management of the shop floor and communication with the enterprise (business) systems (Santos et al., 2017). This traditional hierarchical ICT structure suffers from many limitations when it comes to the flexibility, changing production environment, dynamics of customers' order flow and mass-customization purpose of Industry 4.0, since many existing MES solutions are not distributed to the shop floor elements and have a centralized architecture (Rojko, 2017).

The next operative level of the CIM pyramid is process level control, including Supervisory Control and Data Acquisition SCADA control system architecture and controllers such as Programmable Logic Controllers PLCs, robot controllers and micro-controllers. As a matter of fact, in the case of fully automated production, the flexibility is one of the biggest challenges at controller level. Indeed, once the process is frozen in the Application Programming Interface API layer, only reprogramming the controllers allows the workshop to be used for another task than the active / configured one. For each new product, it will be necessary to create and redevelop a new program, allowing to produce another product rather than the old one. This situation represents the conventional industrial architecture type 3.0. (Karnouskos et al., 2010) claimed that communication and networking for data exchange between devices and services including sensors, devices, PLC controllers, MES, and ERP need to be adapted for a dynamic production within Industry 4.0. According to (Theorin, 2012), manufacturing companies must reconfigure production plants in a short time frame, and therefore flexible and adaptable automation devices - able to be easy to integrate, configure, extend, and reuse - are required. Where control tasks are becoming more complex, control systems suffer from the lack of the well-defined

information flow between process planning and implementation due to the low implementation level and vendor-specific programming methods (Ollinger et al., 2014) and thus necessitate hard commissioning and reengineering of control programs (Theorin, 2012). Therefore, (Lin et al., 2019) addressed the importance of improving manufacturing control systems since the latter face external unpredictable events and internal complexity, and also stated the limitations of the traditional hierarchical control system being centralized, rigid, and unable to act quickly responding to changes and failures.

The last level of the automation pyramid is the machine/device level. On the contrary to the top two layers, this level has a naturally independent control level (Rojko, 2017). From another side and responding to customization and flexible production initiatives, machines must operate independently or in coordination with humans to produce customer-oriented manufacturing that constantly works to maintain itself. Thereby, the machine's configuration needs to be adapted in order to become an independent entity that can collect data, analyse it, and interpret it. (Sung, 2018) proposed self-optimization, self-cognition, and self-customization as configuration aspects capable of enhancing machines and enabling manufacturers to communicate with computers rather than just operating machines.

Continuing on, Industry 4.0 is mainly represented by CPS, IoT and cloud computing (Henning et al., 2013; Hermann et al., 2016; Jasperneite, 2012; Lasi et al., 2014; Moeuf, 2018). The IoT is the main catalyst for advanced manufacturing systems such as cloud computing, likewise it is a main medium for the development of smart factories (Thames and Schaefer, 2016). CPS enables a higher level of integration and coordination between physical and IT elements (Gürdür et al., 2016). Research indicates that with the introduction of CPS, machines will be able to communicate with each other using decentralized control systems and therefore help optimize production. Industry 4.0 generally comprises many complex components and has wide applications in many industrial sectors (Xu et al., 2018b).

5.4.2 Vertical Integration and Smart Manufacturing Purposes

(Frank et al., 2019) subdivided the related technologies to the Smart Manufacturing dimension into six main purposes: vertical integration, virtualization, automation, traceability, flexibility and energy management.

Factory's vertical integration comprises advanced ICT systems that integrate all hierarchical levels of the company – from shop floor to middle and top-management levels – helping decision-making actions to be less dependent of human intervention. To reach vertical integration, the first step at shop floor is the digitalization of all physical objects and parameters with sensors, actuators and Programmable Logic Controllers PLC. The data is then gathered with Supervisory Control and Data Acquisition SCADA, for

production control and diagnosis at the shop floor. At the managerial information layers, Manufacturing Execution Systems MES obtain data from SCADA, providing production status to the Enterprise Resource Planning ERP system. When all systems are properly integrated, the information of production orders also flows in the inverse way (downstream), from ERP to MES and then to SCADA, helping to deploy the enterprise resources into manufacturing orders. Therefore, vertical integration provides more transparency and control of the production process and helps to improve the shop floor decision-making process. To enhance adaptability for different types of products, Smart Manufacturing comprises networked machines at shop floor, through machine-to-machine communication M2M. M2M consists in a communication system with interoperability, which makes machines capable to understand each other, facilitating their adaptation in manufacture lines.

This capability is supported by virtual commissioning, which emulates the different PLC-codes of machines and validates virtually setup procedures, avoiding extended downtime due to the long setup of equipment. This simulation is more advanced with digital manufacturing, which besides PLC-codes also considers data from all virtualized objects of the shop floor and then simulates operations' processes, considering several parameters that can affect production.

Smart manufacturing also promotes an enhanced automation. Robots can perform tasks with more precision than in the past, increasing productivity while being much less prone to fatigue. In our work, we differentiate robots and automation from collaborative robots. The former is designed to automatize operational processes and, therefore, we included it as a part of the Smart Manufacturing dimension, while the latter is designed to work with humans, supporting tasks that help to enhance human's flexibility and productivity. Therefore, were included collaborative robots as a technology of the Smart Working dimension, as we explain after.

Moreover, artificial intelligence gives support for Smart Manufacturing in many ways. In machines, advanced analytical tools can analyse data gathered from sensors to monitor and forecast machinery failures, overloads or any other problems. This enables predictive maintenance which helps to avoid downtimes due to unexpected failures during the production process. Machines with artificial intelligence can also automatically identify product nonconformities in earlier stages of the production process, increasing quality control and reducing production costs. Furthermore, artificial intelligence also complements systems like ERP, predicting long-term production demands and transforming them into daily production orders, considering last-minute orders and operations' restrictions.

For internal traceability, sensors are applied in raw materials and finished products in the factory's warehouse. This optimized inventory control gives support for recall actions, through identification of specific components in batches of finished products. Internal traceability can also give support to adaptable systems with flexible lines, in which machines read products requirements in the sensors

embedded in them, and perform the necessary actions to manufacture them. Flexible lines can also comprise modular machines that are easily plugged into a manufacturing line with minimum setup. This enables the production of different types of products at small batches, with minimum loss of productivity. In addition, to customize products, additive manufacturing is a promising technology of the Industry 4.0 concept. Additive manufacturing uses 3D printing of digital models that can be altered for customization, using the same resources to manufacture different goods. Additive manufacturing also promotes a sustainable production, as it only requires one process that generates less waste than traditional manufacturing. However, for large-scale productions, the use of additive manufacturing is still limited due to its low throughput speed. Lastly, to enhance factory's efficiency, Smart manufacturing also comprises energy management (monitoring and improving energy efficiency). Efficiency monitoring relies on data collection of energy consumption in electrical power grids, while its improvement is achieved through intelligent systems for energy management that schedule intensive stages of production in times with favourable electricity rates.

To sum up, (Lin et al., 2019) discussed the importance of improving manufacturing systems to deal with unpredictable external events and internal complexity, especially when the traditional hierarchical control system is centralized, rigid and unable to act quickly in responding to changes and failures. Four key elements are identified by (Lin et al., 2019) for manufacturing systems evolution as represented in **Fig. 14**: Agility for the management of unexpected events, Adaptability for product diversity, Efficiency for process optimization and Reorganization to create new features.



Fig. 14 Key elements for manufacturing systems evolution (Lin et al., 2019)

5.4.3 Existing 4.0 Architectures

In the bibliographic analysis of this chapter, we evoke some innovative architectures from the literature. The objective of the analysis of existing 4.0 architectures is to define an original positioning in relation to the state of the art which leads us consequently to identify our research hypothesis.

In this context, several innovative architectures were proposed in the literature in order to surpass these limitations and to meet industry 4.0 expectations. (Lin et al., 2019) Proposed an architecture for Cyber-Physical Manufacturing Control System **Fig. 15**, reviewing the weaknesses of the traditional CIM Pyramid in terms of limitations and complexity when it comes to the reconfiguration of the production line through the MES, and the lack of real time update between the ERP system and the MES regarding the production status. Therefore, another architecture was proposed based on transforming machines to CPS entities with embedded sensors, connected with each other and communicating directly to a cloud / fog computing platform playing the role of operation management. Industrial Micro Controller Units MCU were used to control machines and interact in between with the cloud platform. This system has the ability to self-aware, self-predict, and self-diagnose data being treated based on machine learning techniques through the cloud.

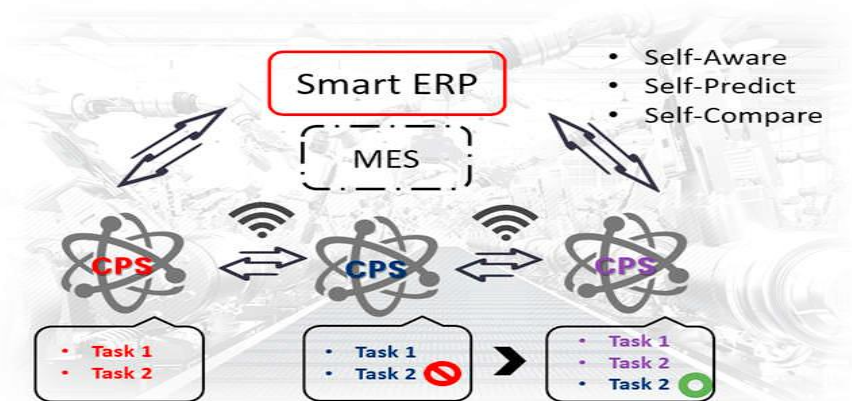


Fig. 15 Architecture for cyber-physical systems in manufacturing (Lin et al., 2019)

Similar to the cloud platform of the abovementioned model, (Bonnard et al., 2019) proposed a big data/analytics platform for Industry 4.0 implementation in SMEs **Fig. 16**. Whereas this platform requires a 'flexible system', it consists of a Representational State Transfer REST and Application Programming Interface API collecting data from connected objects, PLC's, SCADA, MES, and ERP designed in a service-oriented architecture, published via a web interface or a mobile application and connected to a MySQL database. The platform supports several protocols allowing communication with different entities from the shop floor such as OPC-UA, Modbus or Profibus, wireless communication, or Ethernet. Collected data will be stored on a local machine in order to be sent then via API REST to the cloud server. The platform provides data processing by the analytics AI and Genetic which allows decision-making support and recommendations where action planning can be developed.

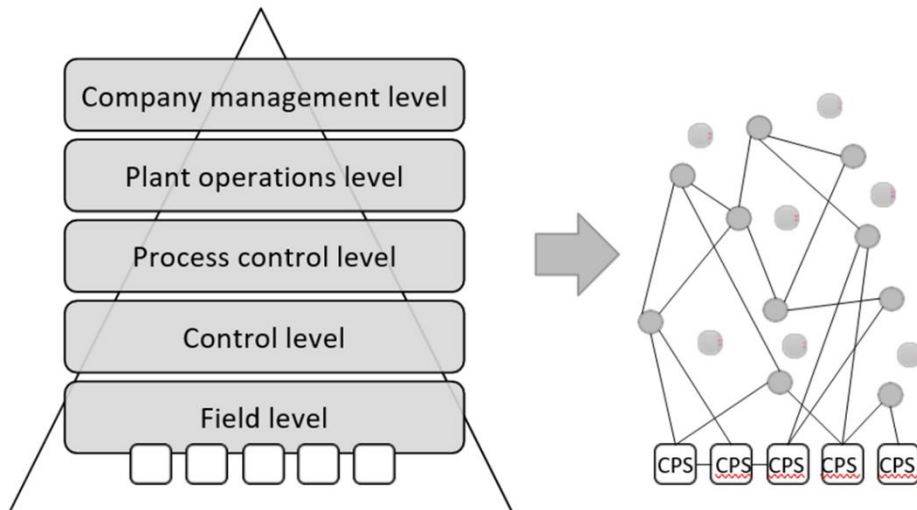


Fig. 16 Platform for Big Data Analytics (Bonnard et al., 2019)

A domain framework for implementation of IoT ecosystem and expanded on production planning and scheduling in shop floor is proposed by (Zdravković et al., 2018). (Zdravković et al., 2018) addressed mainly the system dynamics and the environment dynamics by using smart automation where production resources are able to make decisions in order to optimize the process execution. Hence, the shop floor IoT system could provide higher agile, and reconfiguration means to the production system when machines and entities communicate with each other improving the decision-making process based on utility-based-agents as work centres in a holonic multi-agent system.

(Block et al., 2018) introduced a production planning and control PPC approach **Fig. 17**, based on the concept of using CPSs connected to machines, collecting data when no central database is required, sharing information with other CPSs and containing a model of the considered physical object. Core Manufacturing Simulation Data CMSD is used for data exchange and linked to AutomationML in order to ensure communication with higher-level processes and MES. The decentralized CPSs are considered as edge computing level since all data are processed and simulated on the CPS machine. Finally, an event-driven PPC is deployed in a central station to encapsulate units in a Service Oriented Architecture SOA.

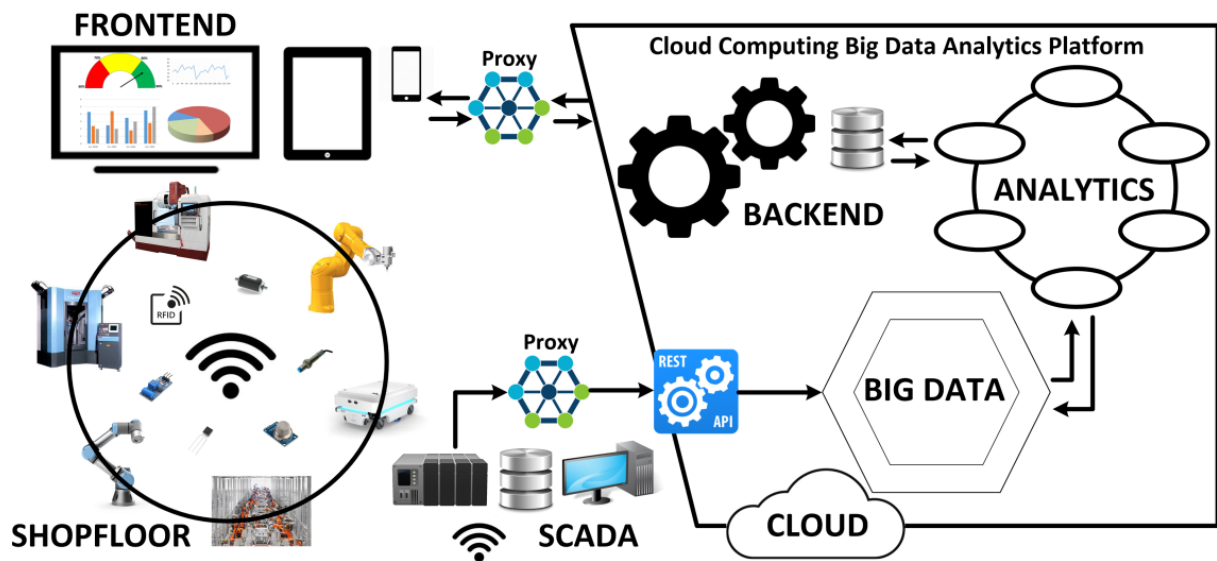


Fig. 17 Decentralization of the automation pyramid (Block et al., 2018)

(Theorin et al., 2017a) suggested the Line Information System Architecture LISA, an event-driven manufacturing information system based on SOA **Fig. 18**, which offers flexibility and scalability both for control of low-level applications and aggregation of higher-level information, such as KPIs. LISA is introduced as an Event-Driven Architecture EDA based on flexible message structure mainly the message bus using Enterprise Service Bus ESB, a special simple message JSON format and service endpoints characterized as loose coupling applications. This system enables firstly the integration of new services in an easy way, and secondly the optimization of the production processes due to its deployment in the shop floor layer. Regarding control services, LISA supports the interaction between production machines, coordination software, and field devices.

An application has been occurred to demonstrate the control service using LISA consisting of a PLC connected to a CNC machine, and using JGrachart programming language which supports service orchestration with Devices Profile for Web Services technology DPWS and OPC UA.

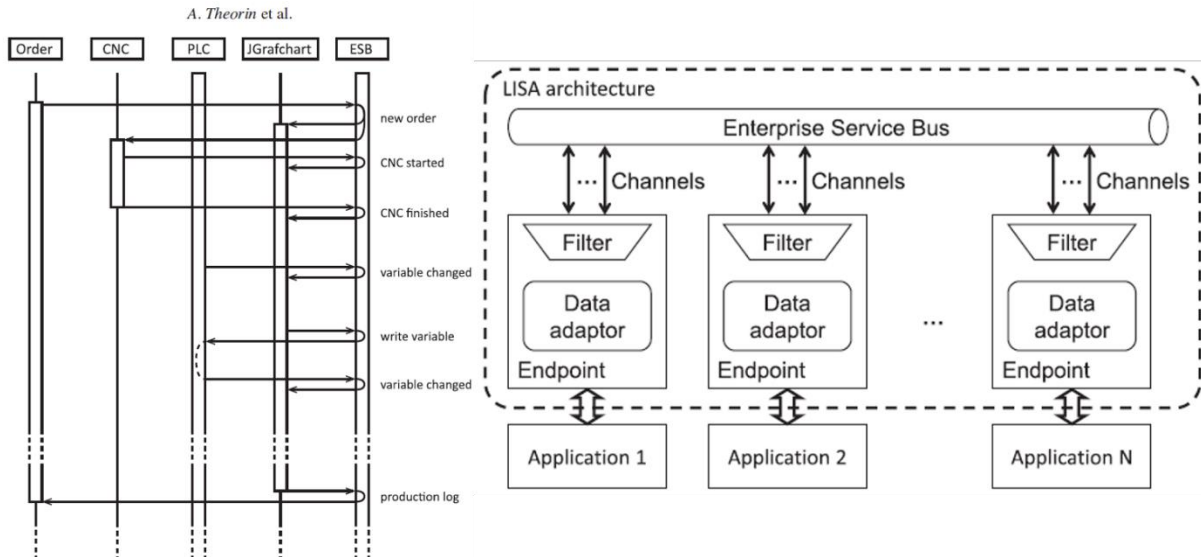


Fig. 18 Overview of the LISA communication architecture (Theorin et al., 2017a)

In the context of modularity, (Kim et al., 2020) have developed a modular factory testbed for the rapid reconfiguration of manufacturing systems **Fig. 19**. The testbed is designed in a multi-agent architecture for distributed shop-floor control, consisting of three main layers:

- Coordinator, responsible for factory configuration and production planning, developed using C#.
- Workstation agent, assure the communication with other agents using wireless networks, responsible for controlling and monitoring the assembly operations in the workstation from scheduling to internal operation management, developed using ANSI C. The workstation agents are considered as clients in the system reporting to the coordinator (server).
- Workstation executor, an embedded control software developed using LabView, responsible for controlling field devices in a workstation and managing internal communications using PC-based control systems instead of PLCs for rapid reconfiguration. A message-based parametric reprogramming has been defined as a command format to ease the reconfiguration of production tasks and reduce its required time.

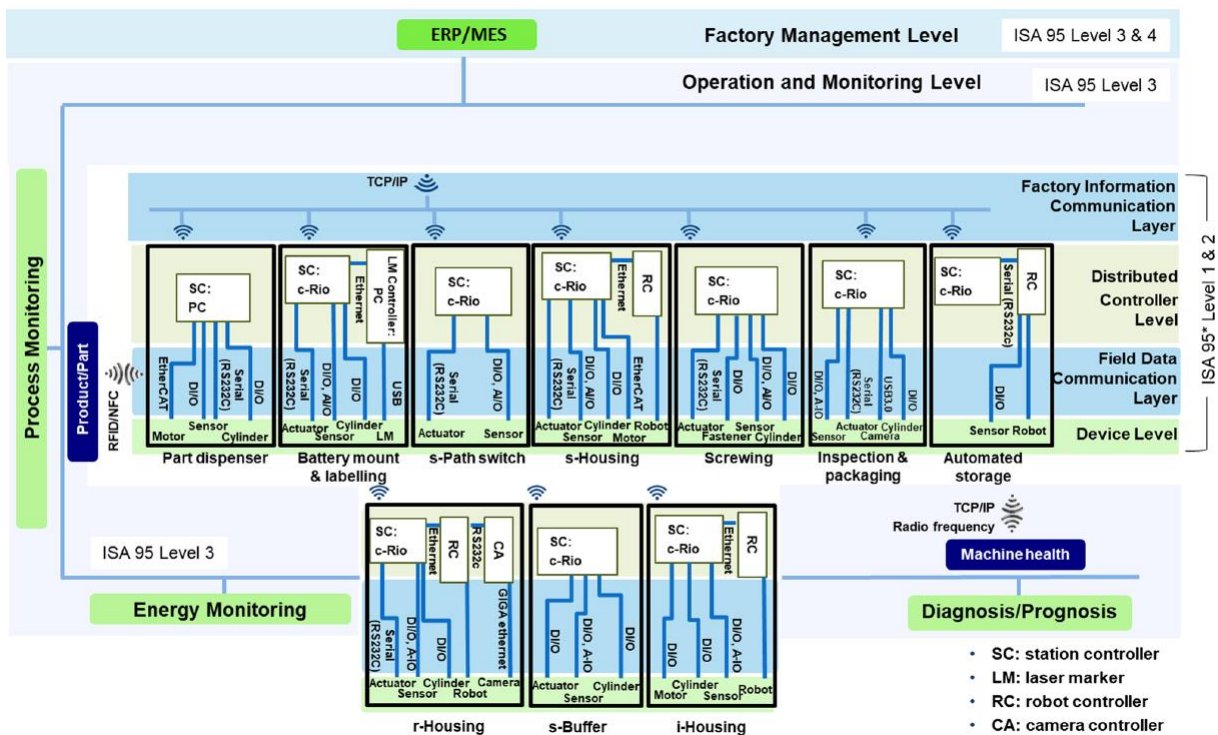


Fig. 19 Communication and control structure of the testbed (Kim et al., 2020)

A modular manufacturing system is presented by (Gorecky et al., 2016) **Fig. 20**, consisting on five conceptual components and applied on an industry 4.0 pilot plant:

- *Product.* The product layer considers a dynamic production environment where products should be tracked. RFID tags were used to assure identification of each part and the respective digital information specifications.
- *Production layer.* the production layer is built from several production modules to achieve different production processes such as handling, machining, storing, ... and equipped with a modular transport system (revolving conveyor belts). the digital product memory provides the machine / module with the production parameters, and the latter status gets updated when processing is done. Each module has a standardized operating concept which gives information about operating states and behaviour states of the respective module.
- *Supply layer.* This layer describes operational supply infrastructure of the modules such as current supply, pressured air, security concept and communication.
- *Integration layer.* The integration layer has the function of connecting the production modules and the IT system, by collecting and aggregating data from the production modules in order to feed the IT system layer which follows a service-oriented architecture.

- IT system layer. at the top, the IT system layer represents the dynamic control, process planning and simulation of the production plant, from ERP, to MES, PLM and data processing.

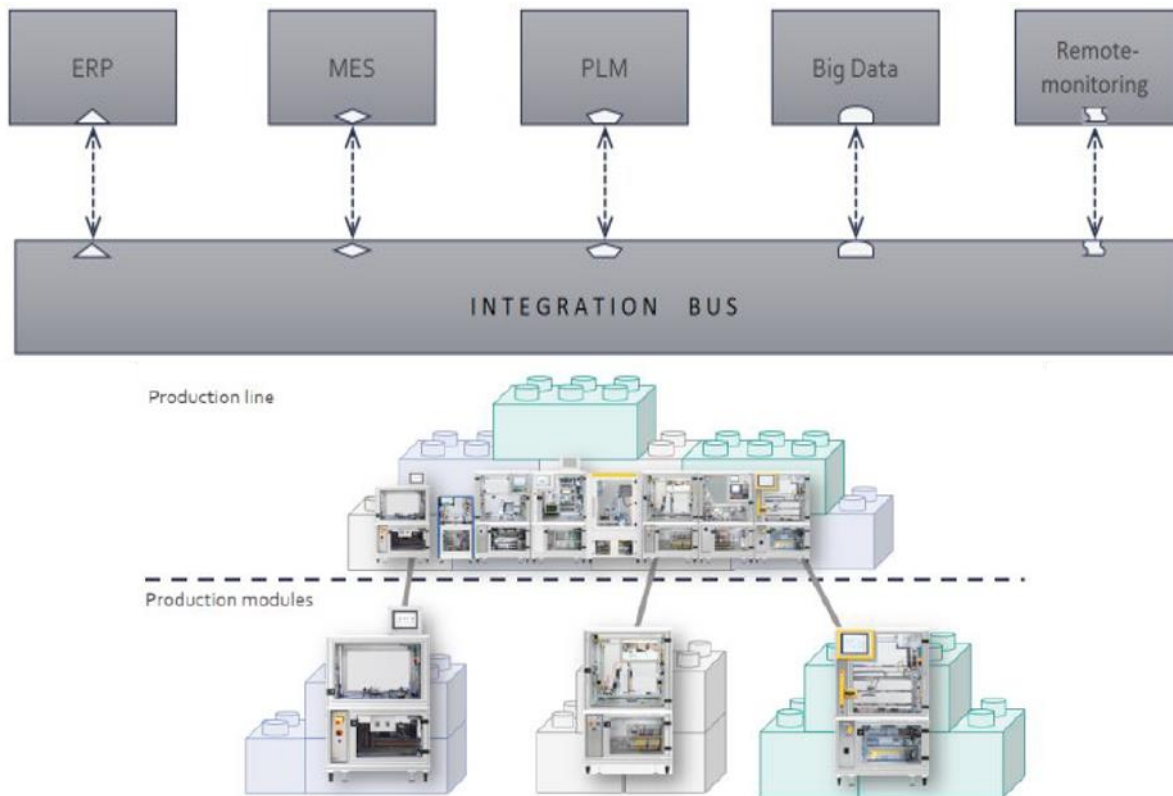


Fig. 20 Overview of the modular architecture (Gorecky et al., 2016)

5.5 Positioning Toward the State of the Art

The study conducted in the abovementioned discussed basics and presented architectures, focus mainly on developing models to resolve limitations in traditional manufacturing systems and find solutions to make better values from data collection and reconfiguration use of production lines for full deployment. It has been clarified that vertical and horizontal integration of Industry 4.0 relies on the evolution of manufacturing systems assuring flexibility, modularity, reconfiguration, interoperability, and intelligence. The architecture of advanced and complex manufacturing systems is heterogeneous, unbounded, dynamic and undefined. Modelling and designing these systems need to focus on services over components, interoperability and cross-platform functionality, flexibility and distribution, and abstraction to deal with complexity. Manufacturing models and architecture are designed to enhance one or more functionalities proposed by the 4.0, taking into consideration the flexibility and the modularity attended. For instance, the Service Oriented Architecture SOA focus on the service orientation principle, the IoT Architecture reinforces real-time capabilities and interoperability, and CPS and Modular Architecture augment modularity and decentralization. An advanced manufacturing system can be based on a combination of more than one architecture. Some are considered as modelling approaches such as SOA and Manufacturing as a Service MaaS, and others are an architecture design

like Industrial Internet of Things IIoT and CPS. Modelling approaches and architecture can be combined since the modelling paradigm is chosen for the control system depending on the type and objectives of the production application, and then the manufacturing system shall be designed through a dedicated architecture (Borangiu et al., 2019). The dynamic issue of the traditional vertical structure of the automation pyramid is our main concern. Based on what has been discussed, the evolution of the production systems towards Industry 4.0 is strongly dependent on vertical integration. Two key factors are to be considered in order to achieve the transition goal:

- The first is the flexibility factor identified by (Lin et al., 2019). A production system capable of adapting to new orders/products (under the factory capacity) and able to respond quickly to fluctuations in demand and workflow assuring the mass customization aspect.
- The second factor identified by (Sung, 2018) concerns data management. A production system capable of exploiting data collected from machines, sensors, failures, and historic data, in order to learn and self-optimize its production processes.

Concerning the data dimension in the context of Industry 4.0, manufacturing systems are updated to an intelligent level. Intelligent or smart manufacturing aims to convert data acquired across the product lifecycle into manufacturing intelligence in order to yield positive impacts on all aspects of manufacturing (Tao et al., 2018). It enables all physical processes and information flows to be available when and where they are needed across holistic manufacturing supply chains, multiple industries, Small and Medium-sized Enterprises SMEs, and large companies. Intelligent manufacturing requires certain underpinning technologies in order to enable devices or machines to vary their behaviours in response to different situations and requirements based on past experiences and learning capacities. These technologies enable direct communication with manufacturing systems, thereby allowing problems to be solved and adaptive decisions to be made in a timely fashion. Some technologies also have artificial intelligence AI, which allows manufacturing systems to learn from experiences in order to ultimately realize a connected, intelligent, and ubiquitous industrial practice (Zhong et al., 2017). According to (Lee et al., 2018), AI is a cognitive science with rich research activities in the areas of image processing, natural language processing, robotics, and machine learning. For example, Robotic systems are playing an interesting role in enabling Industry 4.0 implementation. Modern robots are characterized as systems offering autonomy, flexibility, cooperation, and reconfigurability (Kamble et al., 2018). A layer of flexibility and intelligence is offered through the integration of machine learning techniques to the image processing stage, and the interconnection between robots and machines which extend the decentralization aspect, and assure several benefits such as lower defect rate, higher quality and reliability (Ghobakhloo, 2018; Gupta, 2018), and improved security.

In order to enhance the production performance, assure the security means of workers and machines, improve product quality, and develop smart products, industrials must deal first with a big amount of

data generated through the product lifecycle including visual inspection images and quality control processing (Bajic et al., 2018). Secondly, Manufacturing systems must be able to integrate such flexible and AI-Enabled modules in as less as possible intrusive way.

6. PhD Hypothesis

After this deep study covering the aspects and the principles of Industry 4.0 and the detailed bibliographic research, we propose one hypothesis, based on the variety of main challenges and problematics facing the production system evolution toward the digital transformation. Having declined the principles of Industry 4.0 supported by a detailed literature study, we propose in this chapter a hypothesis which considers that the transition to the digitization of production systems depends on major principles which must be contextualized according to the objectives targeted by companies.

Before proposing the hypothesis, a bibliographic analysis of presented recent architectures and models proposed in the literature are discussed in section 6.1. Section 6.2 introduces our hypothesis. Finally, section 6.3 presents the structure followed to validate the proposed hypothesis.

6.1 Analysis of Recent 4.0 Architectures

We notice in the literature that the subject addressed by this doctoral thesis represents an originality and importance in terms of topic, which explains the scarcity of approaches that focus on the evolution of existing production systems towards the digital transition especially when considering the entire production system including different levels. The architectures presented in the context of the integration of Industry 4.0 into production systems are innovative but on the other hand are mainly based on the development of new data transfer initiatives that are not recognized until today in companies and which require radical changes in existing architectures which can cause potential disruptions in production sites. In addition, a second critical aspect to mention during this analysis concerns the limitation of such architecture proposals like the one developed by (Block et al., 2018) considering specifically the application in “process manufacturing” which mark a big difference with the field of industrial manufacturing.

In addition, several research studies consider the management dimension of generic digital transition roadmaps in companies. We cite (Kamble et al., 2018) who proposed a sustainable framework of Industry 4.0 built with three components, the technologies of Industry 4.0, the integration of processes and the sustainable results of this integration. Based on an in-depth review, this framework was proposed given the promised facilities of Industry 4.0 technologies and its ability to integrate business processes and activities, making the manufacturing system more flexible, economical and environmentally friendly of the environment.

A three-step model for the transformation of Industry 4.0 “Envision, Enable, Enact” is proposed by (Erol and Schumacher, 2016). The main objective of the model is to guide companies in the development of their specific Industry 4.0 objectives as well as a set of measures to achieve their company-specific vision and roadmap. (Ghobakhloo, 2018) proposes a strategic roadmap for Industry 4.0 transition, taking

into account the entire supply and value chain of the company, in the form of recommendations aimed at facilitating the transition to Industry 4.0.

However, our approach, which will be contextualized through the proposed hypothesis, takes into account the current state of the production system operating in 3.0 mode and tries to achieve an innovative approach which appears in the proposal of a model followed by a framework of the digital transition of manufacturing systems while respecting the existing architecture of the production system.

6.2 Hypothesis Proposal

The analysis carried out above leads us to take up and justify the positioning of our research problem defended in Chapter 4, Which model for a successful digital transition of 4.0 manufacturing systems? which lies between the three defined axes, ‘digitization’, ‘manufacturing system’, and ‘production processes’.

The agility offered by Industry 4.0 allows plants to handle a more diverse product range with shorten lead time, and quickly customize products to specific requirements, assuring higher responsiveness to customers’ needs. While Industry 4.0 offers enormous, new opportunities for businesses; the scale of its impact also brings new challenges.

A detailed state of the art has been provided to define the principles and concepts of the digitization of manufacturing systems, and to identify the respective main challenges to this digital integration. The digitization of production systems requires a specific approach that considers the entire production system with its different layers as well as its current architecture. This approach aims to evolve the production system while ensuring the functionalities expected by companies.

The dynamic issue of the traditional vertical structure of the production is to be investigated, since production systems need to be capable of adapting to new products and responding quickly to fluctuations in demand first. Second, production systems must allow deploying data collected from machines, and sensors in order to learn and self-optimize its processes. The main challenges and issues defined according to our research direction and interest are the implementation of Flexible and Modular Manufacturing System in the context of Vertical Integration which requires critical changes considering the different level of company’s structure.

Consequently, and following this oriented bibliographic study, we propose the following hypothesis which comes to answer our research problem identified as following:

Evolving production systems towards digitization in the context of Industry 4.0 requires acting on three main axes Production System including Shop Floor Control System SFCS, Machines & Advanced Techs, and Data Processing & Deployment.

Fig. 21 presents the different axes of interest / dimensions identified by the hypothesis. The first dimension Production System & SFCS concerns mainly the production information system, its ability and requirements to adapt to the flexibility and modularity expected. The production information system includes the agility of the IT network as well as the digital production platforms such as MES, ERP and other software. This dimension is concerned also by the Shop Floor Control System and its configuration which must respond to fluctuations in demand and allow for flexible production processing and control.

The second dimension Data Processing and deployment is about enabling data flows in both descendant and ascendent direction. After the implementation of sensors and IoT, data should be collected from machines and feeded back to it with mined data, enhanced decision making and optimized processes.

The third dimension Machines and Advanced Technologies considers mainly the implementation of connected machines, the integration of Cyber Physical Systems CPS and advanced technologies introduced by Industry 4.0. This dimension takes into consideration the machines configuration and requirements in the context of flexible manufacturing and modular production processes.

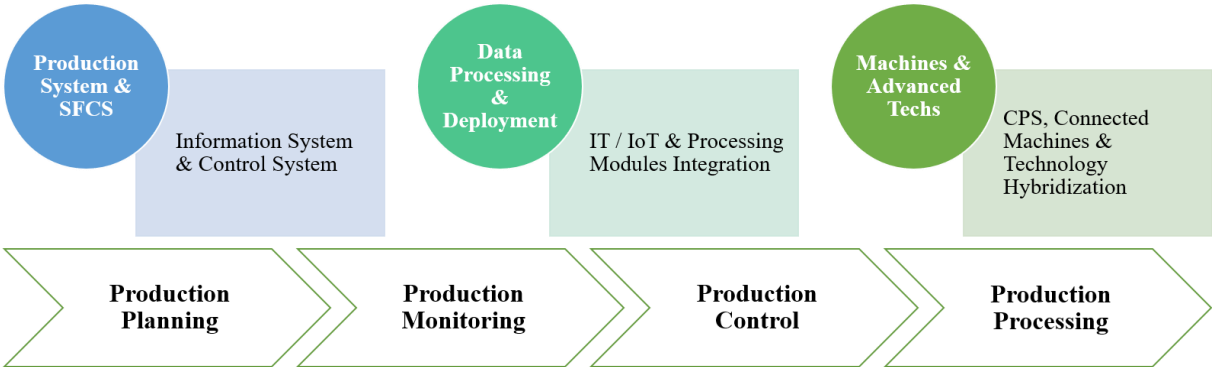


Fig. 21 Axes of interest identified by the hypothesis

The objective of this proposal is to develop a scientific approach of progressive transition to the digitization of production, thus offering new functionalities that are absent in existing production models. This is a generic approach intended to be adapted to the trajectory that the company sets itself under constraints of the desired performance, the expected technological adoption and its aim of evolution. Taking into account these three axes identified by the hypothesis, we consider that the model that responds to the desired digital transition followed by the integration framework will have a tangible effect on the evolution and adaptation of planning and management of production, as well as the control and processing of production **Fig. 21**.

6.2 Scientific approach to the resolution of the proposed hypothesis

From new functionalities identified and targeted by the company, in terms of operational flexibility, integrated quality, decision autonomy, predictive maintenance, optimization of energy consumption and the desired level of portability, our approach presented in **Fig. 22** consists in proposing a new conceptual

model which defines and integrates a distributed system architecture, cyber-physical systems CPS, connected 4.0 technologies, an integrated system for storing and processing data. Obviously, the technological aspect is not the only factor of success, other factors such as the project management, and required competencies contribute to the outcome of such a project which marks a break in industrial practices. However, only the technological aspect will be discussed in this thesis.

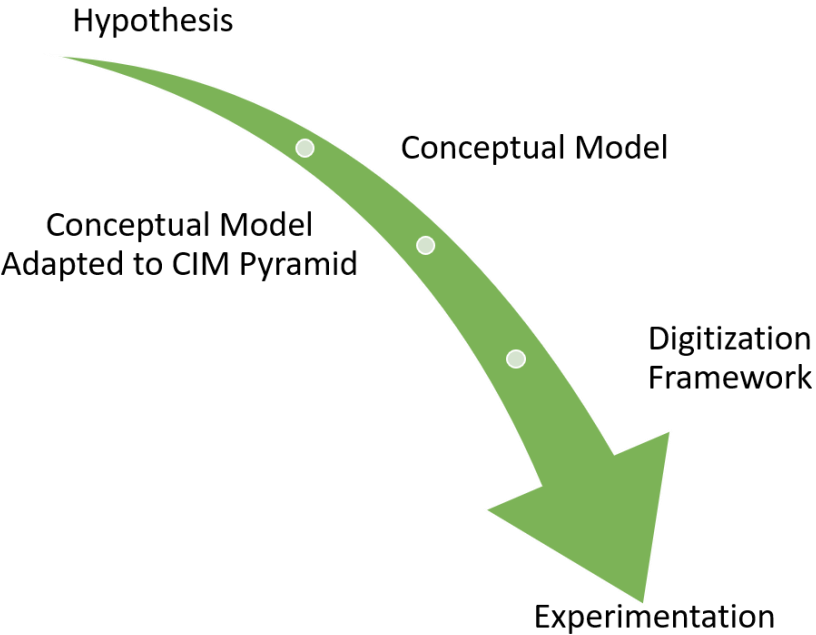


Fig. 22 Scientific approach to the resolution of the proposed hypothesis

Subsequently, and in order to apply the developed conceptual model, we propose an innovative framework for the digital transition of manufacturing systems that takes into consideration the different conceptual dimensions of our model and transforms them into a detailed support structure to deploy the digital transition into existing production systems.

Finally, the digital transition framework will be applied to the industrial platform 4.0 introduced in section 2.3.2. The experimental integration work will be well detailed in chapter 9. From the deployment of the new system architecture, we subsequently propose a design methodology for the configuration of modular processes followed by the application of this modular approach in the manufacturing program. A quantitative application will finally be carried out on the flexibility of the system deployed in order to justify our scientific approach.

In summary, the objective of the model and the proposed framework is therefore to develop a new modular process to deploy the following functionalities of the production system:

- Manufacturing flexibility
- The modularity of the computer system
- Decentralization of the decision-making level
- Personalization
- Portability

The aim of the proposed model is therefore developing a new modular process to enhance manufacturing systems. Our modular approach is to transform a rigid production system into an agile production system by applying 4.0 functionalities on the different levels / layers of a production system, enhancing the production planning and monitoring performance and evolving the production control and processing flexibility in the context of Industry 4.0.

In the remainder of this thesis, chapter 7 presents the model. chapter 8 discusses the integration framework proposed assuring mainly the vertical integration and allowing the horizontal one into the company's structure. In chapter 9, a novel integration architecture toward the digital manufacturing transition is developed and explained based on the literature review findings in order to help companies toward the digital transformation. chapter 10 will discuss results and findings, and chapter 11 concludes the PhD thesis.

7. Modelling of 4.0 production systems

The production system is a complex system that transforms materials, energy and knowledge into added value products and services. Manufacturing has evolved from artisanal production to mass production and even mass customization. With the introduction of technologies, manufacturing systems have evolved into flexible, reconfigurable and intelligent production systems (Zhang et al., 2017).

Based on the concepts defined and cited above, (Benfriha, 2020) proposed an initiative to model the concept of 4.0 production systems. First of all, the model is presented in its originality adapted to a general modelling of a 4.0 production system. Consequently, the three axes of the proposed hypothesis are being associated to the different concepts evoked by the model. Second, the model will be adapted to the situation of an existing production system that needs to be upgraded to a 4.0 production system.

7.1 Modelling of 4.0 production systems: Case of a new production system

The goal here is to exploit the concepts developed in the literature and to build a new model of 4.0 production system. We have identified three representative concepts of production systems that could be encountered in industry, addressed by (Bonnard et al., 2019), by (Lina et al., 2019), and (Gorecky et al., 2016). In general, all the concepts are concurrent, however their specificity originates in the context of use. Before embarking on a process of implementing Industry 4.0 concepts in a company, several experts recommended an optimized organization of production as a prerequisite, in particular through the use of methods such as lean manufacturing. It is worth to mention at this stage that any implementation of a 4.0 production system must consider the Reference Architecture Model for Industry 4.0 RAMI4.0 as a digitalization reference framework for standardization.

From an analysis of the concepts defined in the literature within the perimeter of the three axes well defined by the proposed hypothesis, we present here a convergence initiative which consists in proposing a new simplified general concept that reorganizes different technologies and architectures involved in a complete and coherent vision of a future 4.0 production system model. This general conceptual model considers different technological bricks and essential basic concepts, represented by the 5 axes identified by (Benfriha, 2020), see **Figure 23**, which constitutes the basic principles of the modelling a digital production system 4.0. The three axes identified by the hypothesis “Production System & SFCS”, “Data processing and deployment”, “Advanced Machines and Technologies” with the objective of effecting the digital transition of production systems rely, as shown in **Fig. 23**, on the 5 essential conceptual axes of the modelling process proposed by (Benfriha, 2020): applications, data, CPMS systems, IIoT systems, and IT systems.

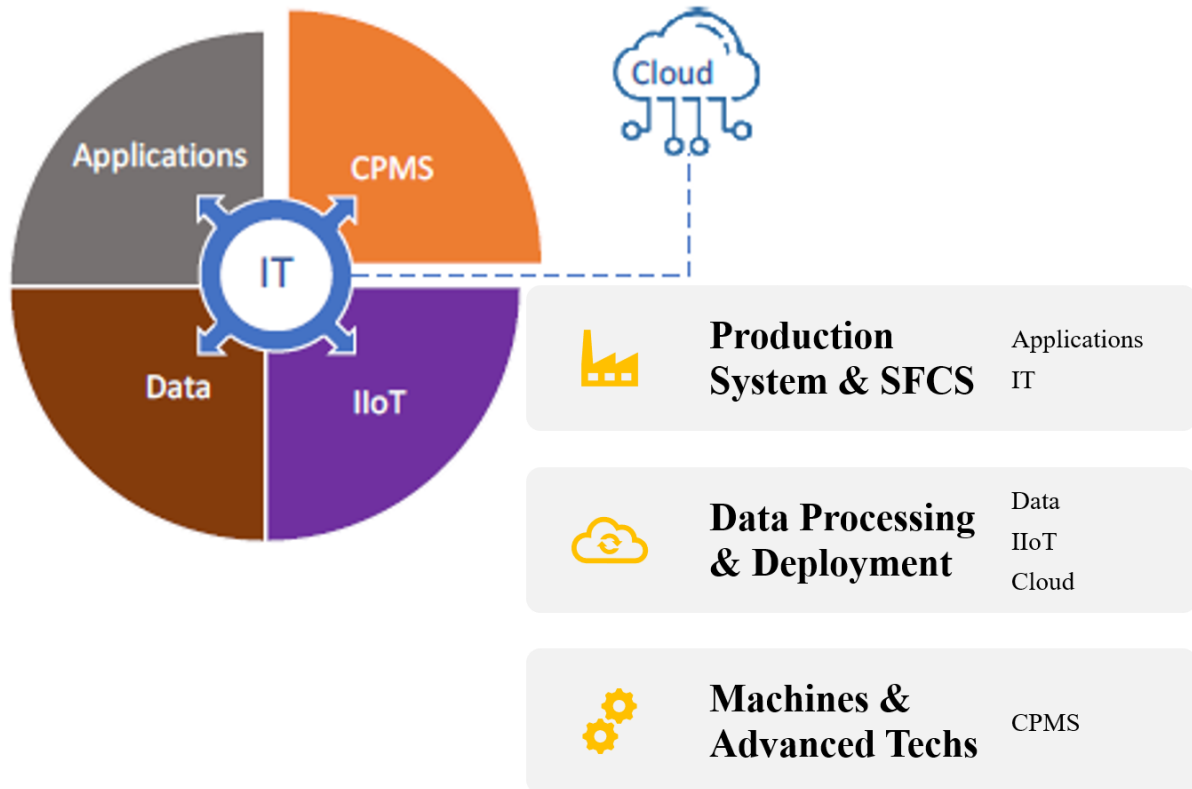


Fig. 23 General modelling concept (Benfriha, 2020)

The **1st axis** concerns the dimension of advanced machines and technologies introduced by Industry 4.0 and considers that the manufacturing system must be configurable in Cyber Physical Manufacturing Systems CPMS. This axis assumes that machines available natively integrate the capacity to work in a connected environment or to make them evolve to be compatible with a 4.0 production system. This allows a feedback of data that reflects their operating state and at the same time can execute generated data for monitoring via the local network. Added to this, the possibility of embedding intelligent applications (MAS) on certain machines allowing them to analyse their own data and activate interactions with their nearby environment.

The goal of CPS is to build an engineering system that is controllable, reliable, scalable and capable of interacting in real time. CPS are based on the latest developments in computing, information and communication technologies, and manufacturing science and technology with the perspective of increasing production performance through intelligent control systems based on the data collected and transformed (Joost et al., 2012). To meet new market demands, new technological paradigms must be applied to manufacturing systems with the aim of improving agility, responsiveness and ensuring product quality. CPS can meet the challenges of future manufacturing systems as they bridge the gap between physical elements and remote-control systems. The combination of several interconnected CPS and enhanced by cloud technologies has led to increase the processes of new 4.0 functionalities.

There is an abundance of definitions of cyber-physical systems in recent literature. The concept of cyber-physical systems is to integrate computational processes with physical processes through networks, which are emerging as a new generation of intelligent engineering systems. Computing processes supervise physical processes via information networks, conversely, physical processes affect computing processes. A CPS interacts with its environment in which it retrieves data, processes it and through a feedback loop controls or influences the process with which it is associated. An intelligent production line can include many reconfigurable cyber-physical systems capable of interacting and exchanging data in real time with other remote systems. The heterogeneity and complexity of CPS applications represent a real challenge in their development where aspects of reliability, security and certification are prioritized.

The **2nd axis** concerns the IIoT devices which superimpose the CPMS systems by an extended coverage of a variety of sensors and cameras, considering the dimension "Data processing and deployment". The IIoT layer paves the way for virtual modelling applications of manufacturing processes (DTS and DDT) and allows data processing via Cloud computing or Edge computing. The Internet of Things IoT is one of the advanced disruptive technologies and considered by McKinsey Global Institute as a technological advancement that "will transform life, business and the global economy."

IIoT system goes much more beyond collecting data from sensors, it is considered as a holistic system that deals with data from collecting to analysing a large amount of data that can be used to improve the overall performance of industrial systems. The Industrial Internet of Things framework includes infrastructure, technologies and applications that bridge the gap between the real industrial world and the virtual world (Islam and Kim, 2019). (Khan et al., 2020) give the most adequate definition of IIoT system as "the network of intelligent and highly connected industrial components that are deployed to achieve high production rate with reduced operational costs through real-time monitoring, efficient management and controlling of industrial processes, assets and operational time".

The relevance of IIoT systems is also considered for the dynamic production planning and scheduling in the shop floor. IoT system can integrate the shop-floor system, location sensor data are used to make the most optimal internal logistics decisions; accelerometers can be deployed for the purpose of predictive maintenance (vibration monitoring); ultrasonic sensors can be used to look for cavities in castings in a production line, etc. IoT system considers reliability of critical services, such as those related to work safety regulations (by prioritising data traffic from air quality sensors and smoke indicators) and ensuring safest internal logistics routes (proximity sensors).

The **3rd axis** is an essential matter considered by the "Production System & SFCS" dimension. This axis addresses the software applications necessary for the execution and control of a production system with a specific care on the software interfacing issue. Indeed, various applications are involved in

different phases of manufacturing on an ad hoc or continuous basis. The problem of software architecture and interfacing is a crucial point in the success of an integrated and autonomous manufacturing process.

The traditional approach of process planning in various small and medium enterprises is done based on knowledge and experience of the personnel involved in the manufacturing activities. The design and development phase of a smart product must consider including the data of the following three stages: process planning, operation scheduling and operation sequencing. The major aim must be to collect as much data as possible so that digitalized and virtual network of manufacturing machines and the product can be established directly. The configuration of the process planning, and operation sequencing tools must provide an enhanced efficiency for process optimisation and an assured capability for mass customization of products.

According to (Kumar et al., 2019), there are three important criteria associated with product planning software: process planning, operation sequencing and finally machine selection. The software for product planning collects information from different parts of the supply chain linked to the important manufacturing activities. Mass of the product, its material, shape, surface finish, geometrical features and the quality forms the sub-criteria for the process planning criteria. The second criteria under product planning software is operation sequencing. The product planning software must consider aspects which influence the manufacturing processes, such as finishing operation, number of operations required, the fixation method and the priority of operation. The third major criteria for product planning software is machine selection and scheduling criteria. Related important sub-criteria include time of operation, tools required, quality required, cost of machine, availability of machine and number of products ordered. Selection of machine forms an important part of the product planning software, which is done through the information on the available machines in the manufacturing system. Taking into consideration these criteria enable the manufacturing system to perform the operation with the overall objective of cost minimization and time of manufacturing.

The **4th axis** raises the question of the data generated or imported from several point of view, storage, security, processing, filtering, sharing, and visualization. It is certain that Industry 4.0 will generate more data, and more than enough to know how to collect, analyse and use in order to derive added value. The analysis of the data makes it possible to generate information which can increase the performance of the production system.

This axis is undoubtedly at the heart of this industrial revolution and represents a major issue in terms of management, optimization and cybersecurity. Companies need to be able to identify and locate data in its original formats at a data lake. The challenges of controlling data are significant. Indeed, according to the Data Literacy Index (Jung, 2002), companies that succeed in improving their ability to use data

could increase their value by 3% to 5%. In addition, it appears to have a strong correspondence between improving the ability of the staff to use data for decision-making on the one hand and business performance measures, such as gross production margin, return on assets, return on equity and profitability on sales. A data lake designates a global storage space that absorbs the flow of data present within a 4.0 production system. It involves doing so with enough flexibility to interact with the data in their original format, whether raw, structured, and unstructured data. Above the storage, one of the challenges of the data lake is to be able to easily process and transform data in order to extract useful information to enhance the production processes performance but also to enrich the design phase of the product. The choice of processing data locally EdC or in a cloud CdC will depend on the purpose of use.

The **5th axis** is undoubtedly the most complex one concerned with the vertical integration and the communication between different layers of the production system.

Indeed, it includes choices in terms of distributed, object-oriented services or event-driven information systems (EDA, SOA) adapted to the requirements of internal and external entities which intervene, according to different protocols, in real or deferred time. An adapted information system architecture is required to deploy the flexibility and adaptability of production process and enhance a decentralized decision-making management across the distributed network.

Indeed, the traditional pyramidal organization stiff restrictions on communication, where all layers can only change information with adjacent neighbours. This restriction should be surpassed in industry 4.0, as basically, all data should be easily shared through the distributed system, regardless of its physical places. To prevent this, industry 4.0 technology and paradigms must be conceived to provide adequate support to transport and process a large amount of information at the end. In advanced automation, production lines and production processes are more compact and modular, but they can also establish direct connections effectively (either physical or logical) to share information. And since the market increases the demand for modular and flexible systems, the availability of powerful built-in infrastructure and production on the basis of advanced communication architecture is increasingly important.

According to (Zunino et al., 2020), smart factories based on cyber physical production systems CPPSs require a resilient network supported by: the availability of large communication bandwidth to support the exchange of huge amounts of data in real-time, the security of communications and protection against attacks and malicious behaviour, the augmented resilience of networks to grant normal operation with constant levels of quality of service QoS, the scalability of future networks to accommodate the exponential growth of connections and dynamically changing demand for QoS, the predictability of links and connections to enable easy adaptation to quickly changing needs and working situations, and

finally the real-time communication support to enable a strong enterprise control systems integration, where factory control and supervisions are tailored to small production batches.

(Theorin et al., 2017b) addressed the relevance of integrating SOA into the manufacturing operations management level and the control level. Most SOA tools are tailored for business processes, which do not have strict timing or resource requirements, while devices which execute at the monitoring and control level often have strictly limited memory and computational power. SOA is a distributed software architecture where self-contained applications expose themselves as services, which other applications can connect to and use. To reach its full potential, SOA applications should be self-describing, discoverable, and platform- and language -independent. This leads to loose-coupling and high flexibility. The adoption of SOA in a company typically starts as an IT initiative to improve infrastructure efficiency and can then mature into optimised use for business purposes.

In conclusion, the concepts of adapted networks, connectivity, agents, interoperability, intelligence, processing, flexibility and finally digital continuity are often cited in the recent literature in an approach of modelling. The differences observed between the models studied lie in the contextualization of each model. In each case, the authors have formalized a model adapted to a specific context of use, which marks a difference with the concept that we propose, which is intended to be generic and adaptable to different situations. The proposed conceptual model will be deployed to an existing conventional production system in order to identify the evolutions required and to define consequently the transition framework regarding the actions needed to be taken for the digital integration goal.

7.2 Modelling of production systems 4.0: Existing Production System Case

In the case of an existing production, the proposed model must take into account machines and networks already installed. The approach we are proposing consists of analysing what already exists in order to enhance it with a technological layer adapted to the desired functionalities and to the potential of the company to make investments in the production lines in respond to the desired business objectives.

Before starting the transition process, we consider that the company wishing to evolve towards a 4.0 production system already benefits from an existing CIM architecture **Figure 24** which operates on a model close to 3.0 and its manufacturing process is already subject to continuous improvement, in particular using lean manufacturing. This starting point is crucial for the successful transition to evolved systems.

Based on the conceptual model introduced above and the axes identified by our hypothesis, the transformation of the workshop involves 5 aspects. The material aspect considering the acquisition of equipment for transfers between machines, integrated quality control or additive manufacturing machines. Added to this, the reconfiguration of existing machines in terms of controls in order to make

them compatible with a connected production system. The second aspect concerns overlaying an IoT layer such as sensors, cameras with dedicated networks interoperable with the existing network.

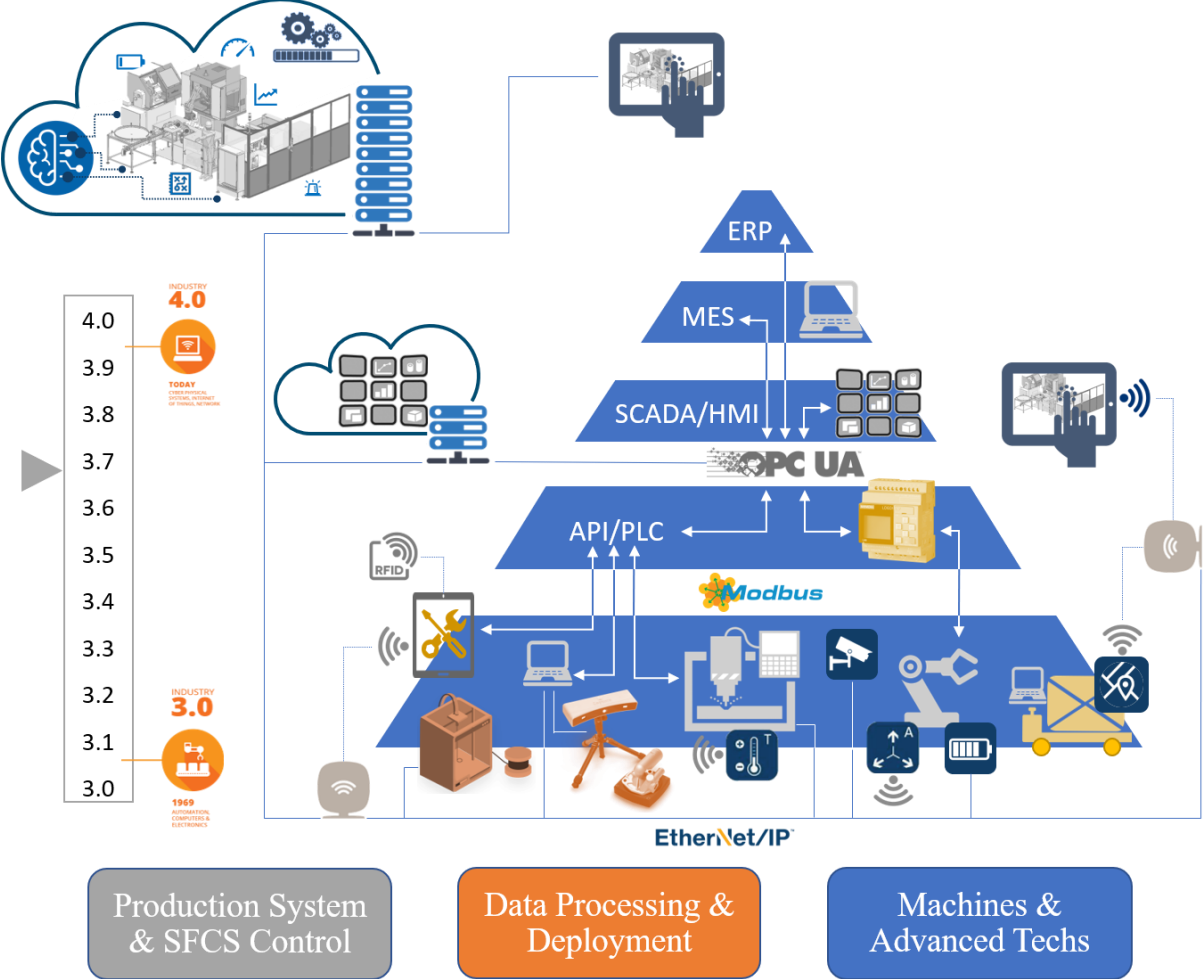


Fig. 24 General modelling concept adapted to CIM

The third aspect concerns the acquisition of software, in particular to manage the workshop. In addition, the development of a specific digital management and industrialization environment is required, to which the control functions will be transferred, without forgetting the software interfacing issues called upon to dialogue during the execution of a production plan. The 4th aspect concerns the computational capacities, deported or local, necessary to support a 4.0 production system equipped with advanced functionalities, in particular when using cameras with expectations of real-time responsiveness.

The last aspect concerns programming of machines. Indeed, in 3.0, machine programs are designed to have a configuration dedicated to mass production. Machines become a single entity that ensures the smooth flow of a well-organized production plan. On the other hand, in 4.0 each machine is a separate entity and can be considered as a CPS, or included in a CPS, connected, intelligent and autonomous. This modularity at the workshop level leads us to design specific manufacturing programs for a modular, autonomous, adaptable and reconfigurable production plan.

In conclusion, the modelling of 4.0 production systems explores different concepts combined and deployed to build an integrated and intelligent system. The concepts interfere with different fields and expertise and their interoperability constitutes a major technical challenge. A large majority of the articles consulted evoke a multi-scale complexity, including but not limited to interfacing, security and competencies. The industrial strategies for evolution face as well consultancy issues delivered by the vendors of digital platform solutions and manufacturers of 4.0 technology systems. This competition, under a well-developed marketing envelope, often leads to difficulties in our choice of solutions and in their implementation. Therefore, a transition framework toward industry 4.0 production systems is proposed in the next chapter in order to apply the proposed model concretely and guide companies aiming to evolve their production systems.

8. Proposed transition framework toward industry 4.0 production systems

The conceptual model developed above is followed by a novel proposed framework in order to exploit it and generate a supporting structure aiming to guide the integration of 4.0 in the existing production system. As identified in the last section, the project management of this integration is an essential key to be considered. Since we are focusing in this thesis on the technical and development dimension, existing industry 4.0 frameworks from a project management point of view are identified based on the literature in the next section. Following, a design principles framework assuring mainly the vertical integration and allows the horizontal one into the company's structure is introduced and explained.

8.1 Existing Integration Frameworks

(Kamble et al., 2018) proposed a sustainable industry 4.0 framework model built with three components, industry 4.0 technologies, process integration and sustainable outcomes **Figure 25**. This deep review proposed this framework based on the promised facilities of industry 4.0 technologies and its ability to integrate the business processes and activities, making the manufacturing system more flexible, economical, and environmentally friendly.

The first layer of this framework includes big data technologies, virtual reality, robotic systems, cloud computing, internet of things, simulation and prototyping, and 3D printing as the emerging technologies of Industry 4.0 which have a great added value to the manufacturing process. This layer has the main role in supporting the second layer, process integration, both maintained by the cyber security as a critical aspect to well improve the system accessibility and protection. The successful deployment of industry 4.0 technologies boosts the creation of smart products and processes. The process integration has to ensure the implementation of Industry 4.0 principles as in (Kamble et al., 2018), interoperability, decentralization, virtualization, modularity, and service orientation. The last layer of this innovative framework, Sustainable outcome, has three dimensions. Starting first by the 'Environmental protection' - Industry 4.0 technologies have the potential to make the existing manufacturing processes environmentally sustainable, since it allows for efficient resource allocation based on production processes and other stakeholder's real-time data resulting in sustainable green practices (de Sousa Jabbour et al., 2018; Stock and Seliger, 2016). The 2nd layer is Process automation and safety – an optimized management of the operations emerging from the stabilized manufacturing processes shall improve the working conditions and environment, thereby many safety-related tasks could be performed at the organizational level to prevent safety hazards and operational risks. Economic sustainability is the last dimension – due to the digital transformation of the supply chain, companies are expecting many economic benefits, reducing manufacturing costs and time by improving predictive maintenance, reducing losses, improving purchasing decisions, and lean

manufacturing.

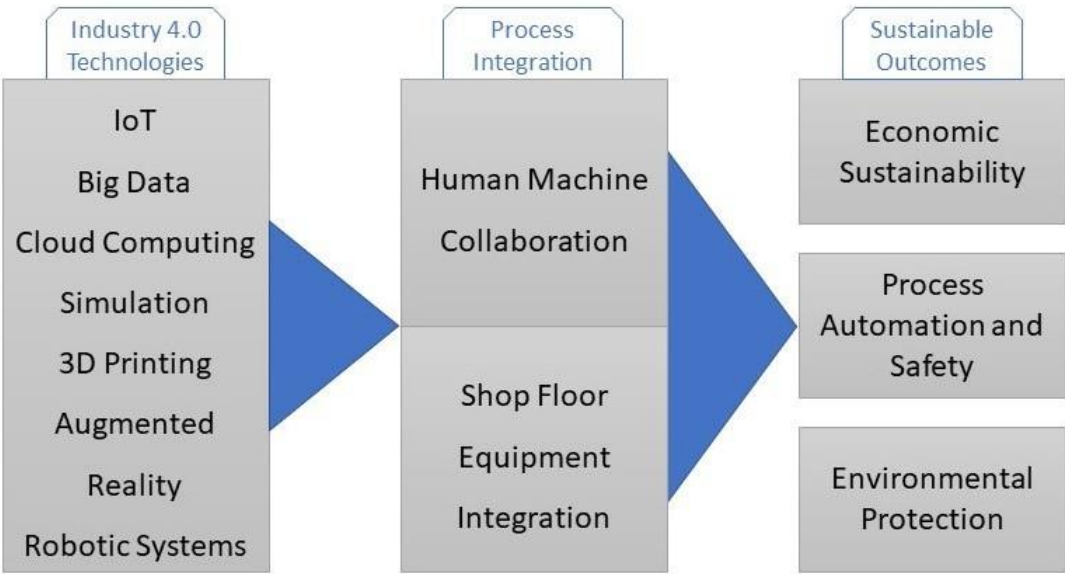


Figure 25 Sustainable Industry 4.0 Framework (Kamble et al., 2018)

A three-stage model for Industry 4.0 transformation Envision, Enable, Enact, is proposed by (Erol and Schumacher, 2016). The main goal of the model is to guide companies in developing their specific Industry 4.0 objectives along with a set of measures to reach their company-specific vision and roadmap. The Envision stage consists of developing an industry 4.0 vision taking into account the company particularities. Different management levels are involved in the configuration of this vision, along with different stakeholders and main customers and business partners. External experts are invited to the Envision stage, in order to shed the light on different Industry 4.0 technologies and theories. Followed up by concluding a vision in a form of strategic roadmap for the long-term future of the company. The “Enable” stage is dedicated to transform the long-term vision into a concrete business model. The aim of this phase is to identify the short, mid and long-term transforming level considering different production or manufacturing processes, mainly, the network, the process, the production and the market. Third stage is Enact, where the strategies are well separated into managerial, technical, and organizational projects to be implemented. This approach ensures the well planning of the business model transformation in a collaborative way through the development of the company vision and strategy **Figure 26**.

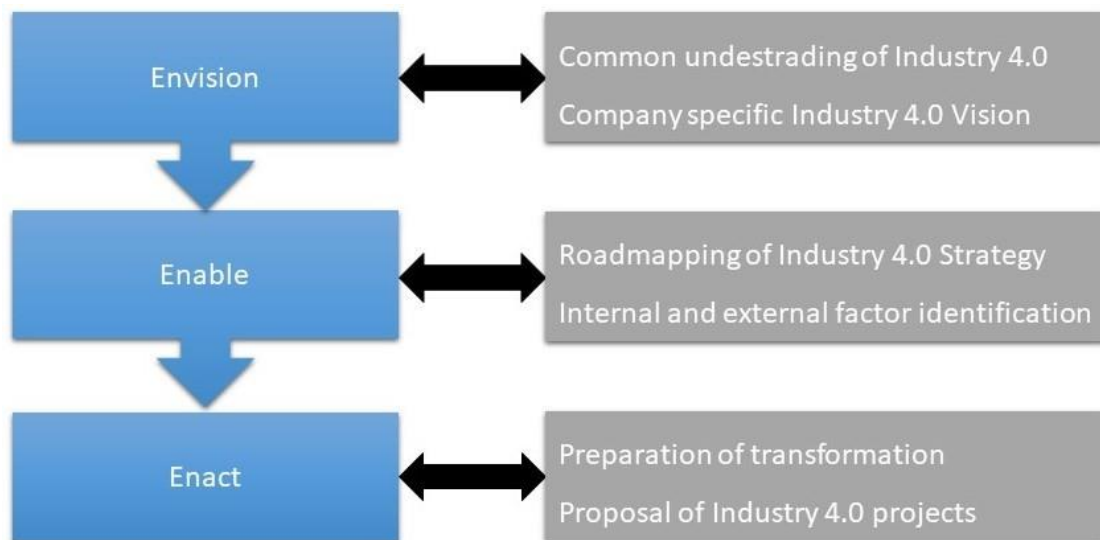


Figure 26 Three-stage model for Industry 4.0 transformation (Erol and Schumacher, 2016)

Introducing the digital transition as an enabler for Industry 4.0, this transition requires changes in the company physical infrastructure, manufacturing operations and technologies, human resources, and organizational models. (Ghobakhloo, 2018) suggests a strategic roadmap for Industry 4.0 transition, taking into consideration the whole company supply and value chain, in the form of recommendations aiming to facilitate the transition toward Industry 4.0. At first a strategic management should be defined, and time-based plans and strategies are to be framed. At this point the goal is to define functional needs and to plan technological implementation required by Industry 4.0 transition, provide the cost-benefit analysis, and facilitate the internal collaboration and changes across the company. Through the data driven marketing and the establishment of market sensing and learning strategy, the marketing strategy is to enable the execution of smart products as services business model. The Human resources strategy is to provide the company with the most important success factor in implementing digitization. The assessment of human resources competencies is essential for the digital transition strategy. The IT maturity strategy is a key potential to make different process integration possible. IT efforts are required to propose new IT infrastructure architecture. Thereby, in order to provide the required connectivity for data collection and interoperability an IT strategy is to be followed to implement the new network. Integrated simulation, digital twin model, and Intelligent ERP are to be developed through a smart manufacturing strategy, allowing better connectivity, transparency, agility, flexible manufacturing and self-adaptation. Many steps are recommended by the roadmap such as production process supervision via distributed control system, manufacturing execution system and intelligent ERP system implementation. Last point focused on the smart supply chain management strategy. As the mass customization is at the top of Industry 4.0 functionality, it is critical to achieve real-time communication across the supply chain, and interoperability and security across different platforms within the entire supply chain along with protecting each partner property.

8.2 Advanced Manufacturing System, A Design principles Framework

Industry 4.0 is a dynamic and integrated system for employing control over the entire value chain of the products lifecycle. Vertical and horizontal integration and fusion of the physical and the virtual components are critical for Industry 4.0, and technology trends implementation such as Cyber Physical Systems and Internet of Things. In other words, the core concept of Industry 4.0 is to build an intelligent and self-optimized manufacturing system based on the processed data and rely on the data mining gathered and supervised in real time. Well, this data mining process should be well implemented in the manufacturing system and capable of optimizing the configuration of the ongoing production process (flexible manufacturing system) along with enriching the business level of the company based on the exploited data. This implementation imposes consequently a list of requirements and radical changes all over the production system, targeting each layer of the manufacturing system.

As the smart and connected manufacturing processes introduced by Industry 4.0 are increasingly attracting companies trying hard to adapt to customer demands, a design principles framework is designed and applied with a novel architecture that promotes the digital manufacturing transition. Taking into consideration the negotiated requirements of the digital manufacturing, the proposed framework as shown in **Fig. 27** is based on design principles and functionalities of Industry 4.0 especially the modularity dimension, which is composed of five layers explained in the following sections, assuring mainly the vertical integration, and allowing the horizontal one into the company's structure. The vertical integration involves flexibility at the shop floor level but followed by flexibility at the shop floor control level. The operational flexibility assured by the first two dimensions should be reinforced by the fact of taking into consideration the data management dimension since the overall objective of the digital transition is improving the operational performance through data mining. The full deployment of this integration is assured by the modular service integration dimension at the production information system level. Lastly, the openness for business-level communication and distributed industries dimension is to guarantee the ability of the production system to enable horizontal integration across the industrial value chain.



Fig. 27 Design Principles Framework

8.2.1 Flexible Shop Floor

At the machines/devices level, technical aspects of the transition towards a 4.0 production system are addressed by the application of the genetic concepts of Cyber-Physical Systems CPS, Industrial Internet of Things IoT, and the integration of new functionalities to the industrial machines. The understanding of industry 4.0 is the deployment of the internet of things to the industrial processes, extending it by information and communication technology (ICT) as a key factor, alongside the development of CPSs as the core elements of this digitization strategy (Bloch et al., 2018b). Consequently, the resulting smart and connected objects drive to build a system that allows for more flexible, efficient, and transparent planning control, and execution of production and logistics (Santos et al., 2017).

In the manufacturing environment, Cyber-physical Production Systems enable software-enhanced machines to leverage the wide range of data from sensors and actuators / IoT, and therefore have a great impact on machines control level as well as data processing level. Consequently, machines will have a decision-making level enhancing the decentralization of the system and providing a new age of operation benefits such as autonomy, robustness, self-organization, interoperability and operational modular configuration (Bonnard et al., 2019).

More concretely, technically addressing the flexible shop floor concept, several aspects regarding the machines should be considered. First of all, a Flexible Manufacturing System FMS in the context of Industry 4.0 is required. An FMS is differentiated from a traditional production system by its ability to perform multiple operations from a limited number of resources. It is based on flexible machines such

as robots or Robotic Process Automation RPA. Machines flexibility requires at least solving issues such as interoperability, remote access to machines, and enabling flexible configuration of the machining process. In addition to the abovementioned requirements, integrating machines with a decision-making level would effectively help in turning this machine into a CPS module, ideally when it is capable of performing algorithms and communicate data to other modules within the network. Second, the modularity of the manufacturing system is another aspect to be considered. Modularity in FMS is an optimal trade-off between other traditional production systems (Kaushal et al., 2016). By switching easily in a high range of volumes or variety, modular production systems can replace shop floors with stand-alone machines or dedicated lines and improve the capacity of the production system for dealing with uncertainty.

More specifically, A production system can be defined as a set of modules connected by flows, with the function of transforming raw materials into a product. The overall flexibility of the production system stems logically from the flexibility of the modules and flows that compose it. The modularity in this context relies strongly on the flexible shop floor control system and is basically dependent on its configuration.

8.2.2 Flexible Shop Floor Control System SFCS

To the end of implementing I4.0 and exploiting its innovative functionalities, it is hence necessary to assure the flexibility of manufacturing control systems and production processes. As discussed in the 1st section, the flexibility of the machines at the shop floor level once configured, needs to be supported by the control system in order to be deployed to the production system. Flexible machines and modular CPS mean flexible operations and processes, where their execution and sequencing require a flexible shop floor control system. Therefore, a different configuration of our production systems is required to allow first dynamic workflow and process planning, and second the real-time autonomous optimization of the production processes, which is not supported by the conventional control systems due to its inflexible configuration. In what follows several studies and solutions are proposed to develop and deploy flexible SFCS.

(Bloch et al., 2018b) of the IAT institute considers the problematic of modular operations as an approach that meets the increasing demands for flexibility and customization in the manufacturing industry, and the need for a more diverse product mix. According to (Perzylo et al., 2019), instead of producing high quantities of similar products over a long period of time, companies have to satisfy the market demand for customized or even individualized products. As a result, production lines may have a multitude of different variants, which may only be produced in small lot sizes. (Bloch et al., 2018a) suggested the modularization of the process control system, using different process modules. These process modules

will provide encapsulated process functions as services to the Superior Control System SCS. Within the SCS, services are orchestrated by the plant operator to achieve the desired production process.

(Karnouskos et al., 2010) addressed the gaps in the existing Supervisory Data Acquisition and Control SCADA, and Distributed Control Systems DCS by the incompatibilities among the systems, hard code data, different view on how systems should be configured, co-existence of very old technologies, and the use of reactive process automation systems instead of proactive configuration. They considered that control systems should be based on process control algorithms, and configured in scalable and modular architectures and platforms (plug and play). Therefore, they proposed the ArchitecturE for Service-Oriented Process-Monitoring and Control AESOP based on service-oriented process control algorithms, scalable and modular SOA-based SCADA and DCS platforms.

(Theorin, 2012) considered as well, the integration of service-oriented architectures within automation SOA-AT aiming to link the planning phase to the control system, using service-oriented process control by decomposing processes steps as functions and assigning them to encapsulated services. Grafchart is used as the process modelling and service orchestration language and Devices Profile for Web Services DPWS as the service technology, which allows consequently a hardware-independent development of the process logic and a simpler programming and reuse of control programs. The encapsulation of low-level functions to services enables a higher degree of abstraction for the implementation of the control logic (Theorin, 2012).

SOA used at the business process ERP and planning MES domains must be realized on the control level by enhancing the functionality of the PLC and improving the software engineering for manufacturing control (Ollinger et al., 2014). According to (Ollinger et al., 2014), the concept of a SOA-PLC overcomes the current limitations of existing PLC systems, for a flexible, reusable, and dynamic manufacturing environment. Encapsulating function blocks into web services field device make functions accessible outside the PLC on higher level of the automation pyramid. In addition, the SOA-PLC enables a dynamic orchestration of services realized by any DPWS on any conventional PC rather than an inflexible sequential code. (Beckhoff Automation GmbH & Co KG, 2021) introduced the call up method which ensured performance and data consistency between the PLC and the upper layers. The call up method using an SOA-PLC shortened the communication roundtrip between PLC and MES via OPC UA making the Remote Procedure Call (RPC) available right into the programmed PLC function block, leading to higher production throughput, and reducing engineering costs for the data link between shop floor and top floor quite dramatically.

8.2.3 Integrated Data Management

The wide implementation of Internet of Things, cloud computing, big data analysis and Artificial Intelligence in the industrial firm is enhancing the effectiveness of smart manufacturing and helping

companies to be more competitive by adapting data-driven strategies. Big data refers to large amounts of multi-source, heterogeneous data generated through-out the product lifecycle, which is characterized by high volume, variety (the data itself comes in different forms and is generated by diver resources), velocity, veracity, and value. Generally speaking, big data generated by manufacturing processes can be classified according to the following categories as identified by (Tao et al., 2018):

- Management data collected from manufacturing information systems including a variety of data such historical data and alarms, data related to product planning, order dispatch, material management, production planning, maintenance, sales and marketing, distribution, customer service.
- Equipment data collected from smart factories by Industrial IoT technologies, concerning mainly data related to real-time performance and operating conditions.
- User data collected from internet sources such as ecommerce platforms and social networking platforms which may enhance the integration of customer needs and recommendations into the production preferences.
- Public data collected from governments through open databases which can be used to guarantee the manufacturing processes and products.

In conventional production system, the data flows are not perfectly conducted in all directions. In other words, the data flows from the production system control as order signals and commands, another flow of data is coming back from machines and sensors and collected by the production system. These data should be processed in real time in order to optimise the ongoing manufacturing processes and adapt the production system itself depending on the customised production planning first and the mined data base for optimisation and enhanced performance concerns.

The integrated data management must consider first the local data processing for low level information including machines, devices and CPS's especially security measures, machines availability, and the overall shop floor management. Local and low-level data must be supported by processing modules and edge computing units if needed. Secondly, the aggregation of higher-level information such as production planning information and historical data, trends and KPI's is essential to enhance processes. Additionally, the wide use of sensors and digitalization by data acquisition provide the analysts and the decision-making process with information. Using the predictive applications, management can investigate the expectable events and optimize the business decisions and processes based on it. Therefore, the integrated data management should allow the storage of this data in the cloud which will enable its accessibility and processing anytime with low cost and effectiveness.

To sum up, the data management dimension is critical to Industry 4.0 integration. Data must be classified and well aggregated, transferred and stored, in order to enhance the performance of the modular and flexible manufacturing systems. And so IT architecture's evolution must consider the data flows and

storage (data lake) assuring a suitable structure for different data types first, and second considering cyber security measures at all levels.

8.2.4 Modular Service Integration

Referring to modular production systems, modularity is a design principle of Industry 4.0 and one of its essential functionalities. Answering the client demands, modular production systems give the possibility to adapt and adjust the individual modules of the production process in a more comfortable and useful way depending on the production and the product evolution. Modularity is concerned with shifting from linear manufacturing and planning, rigid systems and inflexible production models toward an agile system that can adapt to ever-changing circumstances and requirements, without the need for a huge and sophisticated redevelopment and reprogramming work. Modularity involves the entire production and manufacturing levels, and builds on agile supply chain, flexible material flow systems, modular decision-making procedures, and flexible processes (Ghobakhloo, 2018).

The modularity of a production system encloses two main topics: the operational processing modularity which concerns deeply the shop floor machines and devices along with its control system, and the manufacturing services modularity which addresses the manufacturing information system. The operational modularity means that a production system can be defined as a set of modules with an integrated decision-making level connected by flows, with the function of transforming raw materials into a product. Modules perform operations manually or automated to transform raw materials, and flows correspond to the transfer of material from one post to another. The overall flexibility of the production system stems logically from the flexibility of the modules and flows that compose it. Operational modularity is not only being able to change the layout of the shop floor simply but also have a flexible structure that allows the extension of the module to increase production capacity or integrate new functionalities (Mabkhot et al., 2018). A module is loosely coupled and can be moved, added, or removed from the system in a plug-and-play manner.

Considering the modular manufacturing information system, since manufacturing systems face external unpredictable events and internal complexity, the modularity of manufacturing services is imperative. Traditional centralized and hierarchical control becomes powerless in processing different orders, unable to respond quickly to unpredictable changes and mined data. In this context, new decentralized paradigms have emerged, such as multi-agent systems (MAS), which can solve problems that are difficult or impossible for an individual agent or a monolithic system to solve, driving the industrial firm to what is called distributed control and information system. Several aspects must be taken into consideration while addressing the distributed information structure. Embedding intelligent applications on certain machines allows them to analyse their own data, activate interactions with their nearby environments, and take local decisions. In addition, the mass of data generated becomes compatible with

the use of off-site artificial intelligence applications on the Cloud in order to enhance the production system. Well, this aspect raises the question of the data generated or imported from any point of view, storage, cyber security, processing, sharing, and visualization. The last aspect is undoubtedly the most complex one since it purposes to deploy an adapted network architecture. An adapted network architecture such as Event-Driven Architecture EDA or Service-Oriented Architecture SOA deployed to the different entities/manufacturing applications that intervene including MES and ERP, according to different protocols, in real or deferred time, to the objective of developing a well implemented modular and distributed system.

Regarding Manufacturing Execution Systems MES or Manufacturing Operations Management MOM, they are playing essential roles in automated manufacturing recently, enabling performance, quality, and agility goals to be achieved. Manufacturing Execution Systems served well in gathering data and making it valuable for product development, production planning, supply chain management, and even to optimize costs (Adjoul et al., 2019). Therefore, these systems are necessary to the implementation of Industry 4.0 as they are closely related to the data management when considering shop floor, Production Planning and Control PPC systems. (Connectivity IML Magazine, 2019) addressed the need to evolve MES systems to handle new challenges created by Industry 4.0. MES needs to become logically decentralized and composed of decoupled objects or service applications with an external service responsible for the coupling of connected machines and CPS. In a Computer Integrated Manufacturing CIM system, MES has to provide production planning and supervision to the shop floor level but needs to map the business flow as well when integrated into the ERP system. MES should consider the vertical integration aspect strengthening the orchestration and the decision-making of business processes and establishing the interoperability between different entities of the CIM Pyramid, by aggregating data and assessing data flows into context. Additionally, MES must be modular and in a service-oriented architecture to manage the manufacturing processes and guarantee horizontal integration at the shop floor level. Furthermore, horizontal integration has to be supported by the MES along the whole supply chain, enabling a connected and smart supply chain network taking into consideration the cybersecurity issues.

8.2.5 Openness for Business Level Communication and Distributed Industries

The defined goal of Industry 4.0 is the implementation and utilization of an individual interdependency matrix fitted to every single business process. In this respect, horizontal and vertical integration of IT systems are required.

Vertical integration is concerned with all hierarchy levels in the enterprise to the management and business level which comprises the enterprise planning (Bodrow, 2017) and is the main concern of the

proposed framework. While the horizontal integration covers the product life cycle from the supplier until it reaches the customer, this integration should be allowed through the network and taken into consideration. It involves the design and development of products, production planning, production rump-up and management, logistics, sales, and distributions (Man and Strandhagen, 2017).

In general, Industry 4.0 is centred on cumulative, real-time, real-world data across an array of dimensions such as smart warehouse, smart factory, smart product and smart business partners, meaning that real-time capability is deeply supported by the cross-network. In distributed manufacturing facilities and across multiple manufacturing sites, Industry 4.0 promotes horizontal integration between Manufacturing Execution Systems at the factory level. Data from production facilities are transparently shared between sites. Production operations could be automatically transferred between facilities to respond quickly and efficiently to production variables. Taking into consideration the security measures, different actors of the supply chain could be connected to the enterprise, providing a high level of collaboration in logistics and distribution operations.

9. Experimentation, Application on Industrial Platform 4.0

Our approach has been Experimented on a production platform 4.0 installed in the research laboratory **Fig. 28**. This platform carries a global research project led by M. Benfriha (Benfriha, 2020) and which revolves around 2 main axes. our research study falls under the 1st axis, which aims to develop a 4.0 production system model.

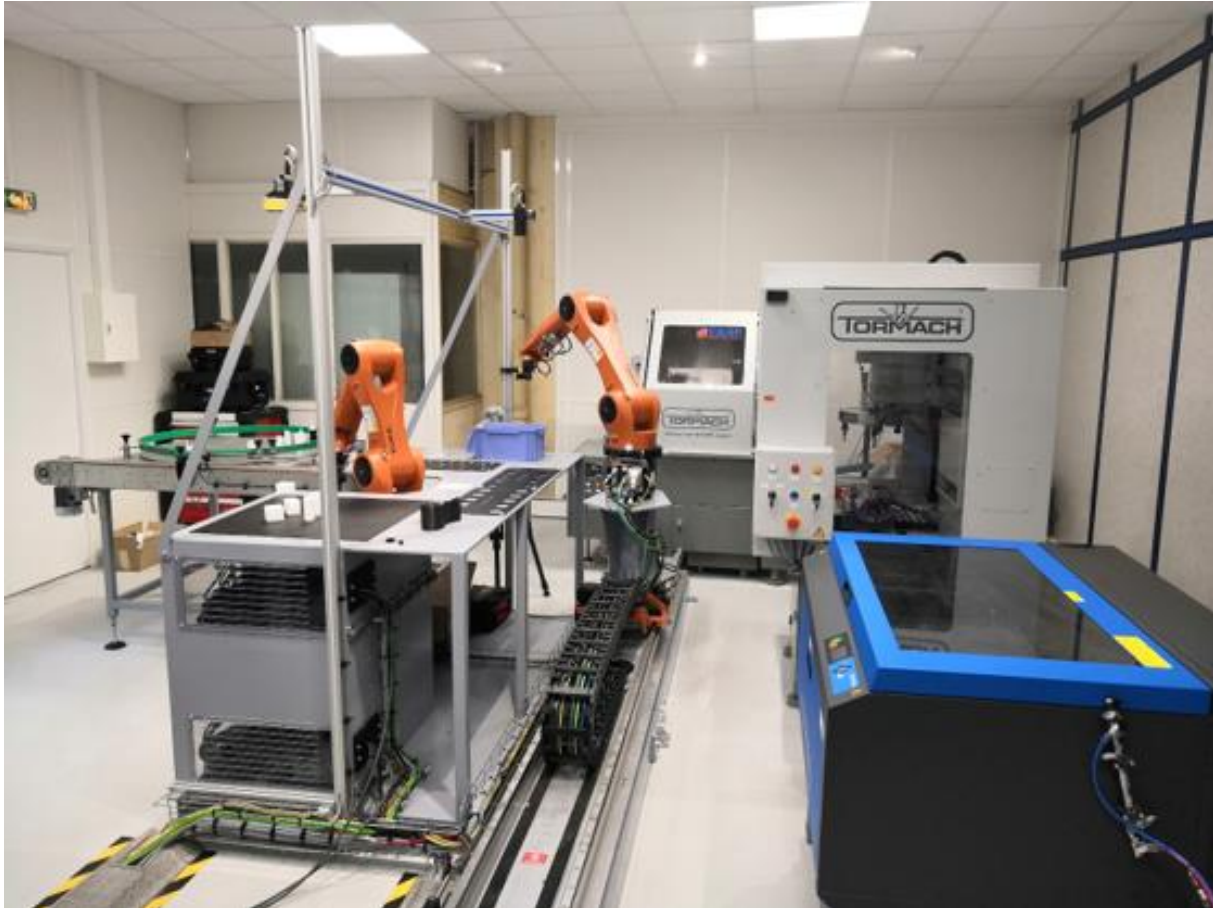


Fig. 28 Industrial Platform 4.0 at ENSAM Lab, Paris

Basically, this platform is built from a fixed robot - responsible of managing raw parts between initial and transition store, as well as transferring the finished parts to the conveyor in their way to the accumulation table, a mobile robot - responsible of transferring parts and feeding machines, a fixed camera system for raw material identification and classification, a lathe, a milling machine, and a laser cutting machine.

At the very beginning, the platform can manufacture, assemble, and transfer components with a closed and non-flexible automatic control process, resulting in the production of a single product of polyoxymethylene (POM) shock absorber type composed of 3 elements (piston, spring and body). This operating mode corresponds to the classic mass production mode subjected to uncontrolled disturbances close to 3.0 where it produces identical products in small series. After specifying the desired number of

shock absorbers, the PLC executes the production plan in a loop in the form of a grafcet deployed with various machining, transfer and assembly operations. This classic operating mode is far from being dynamic, given that the PLC does not react to any anomaly except for security incidents configured through logical functions that can cause the interruption of the cycle. In this old configuration, this production platform was fairly representative of the way companies operate.

The experimentation chapter is organised as follow:

- The experimentation objectives and protocol are presented in section 9.1
- The section 9.2 explains the deployment of the proposed framework into the industrial platform 4.0 presenting in detail the vertical integration and the evolution of the production system structure.
- Section 9.3 represents the new system architecture and the IT architecture of the platform as well as the industrial platform 4.0 Decision Making Model Based Machines.
- Section 9.4 introduces the design methodology for modular processes configuration based on the benefits of the system integration applied in section 9.2.
- In section 9.5, a new approach to enhance flexible manufacturing system through the implementation of the design methodology is proposed in 9.4.
- Section 9.6, additional integrated modules are presented and explained.
- Section 9.7 concludes the implemented system ontology and data flows generated through the integration and the evolution of the system.
- Section 9.8 presents a demonstrative application to evaluate the functioning of the system by validating the dimension of flexibility of the advanced manufacturing system.

9.1 Objectives & Protocol of the Experimentation

The aim of the experimentation at the platform 4.0 is to deploy an intelligent and flexible manufacturing process in order to validate our hypothesis “**Evolving production systems towards digitization in the context of Industry 4.0 requires acting on three main axes Production System including Shop Floor Control System SFCS, Machines & Advanced Techs, and Data Processing & Deployment**”, While integrating several technologies and implementing a new flexible production system.

Following the proposed design framework as shown by the experimental protocol presented in **Fig. 29**, the evolution of the production system architecture will be explained below starting from implementing flexibility to the shop floor and the shop floor control system, along with deploying a modular service integration at the information system layer. An integrated data management is also assured, as well as introducing the openness for business level communication and distributed industries. Several technologies were added to the industrial platform 4.0 such as the FARO 3D Scanner and embedded cameras on the robots. Once different levels of integration are deployed, the rationale and demonstration

of our conceptual model and the transition Framework will be established through the implementation of a new modular production program. The innovative integrated methodologies will allow the emergence of new functionalities, such as operational flexibility, customization, dynamic production, lead-time efficiency, decentralization, and portability. Finally, a demonstrative application will be carried out in order to validate the dimension of flexibility and lead-time yield of the advanced manufacturing system.

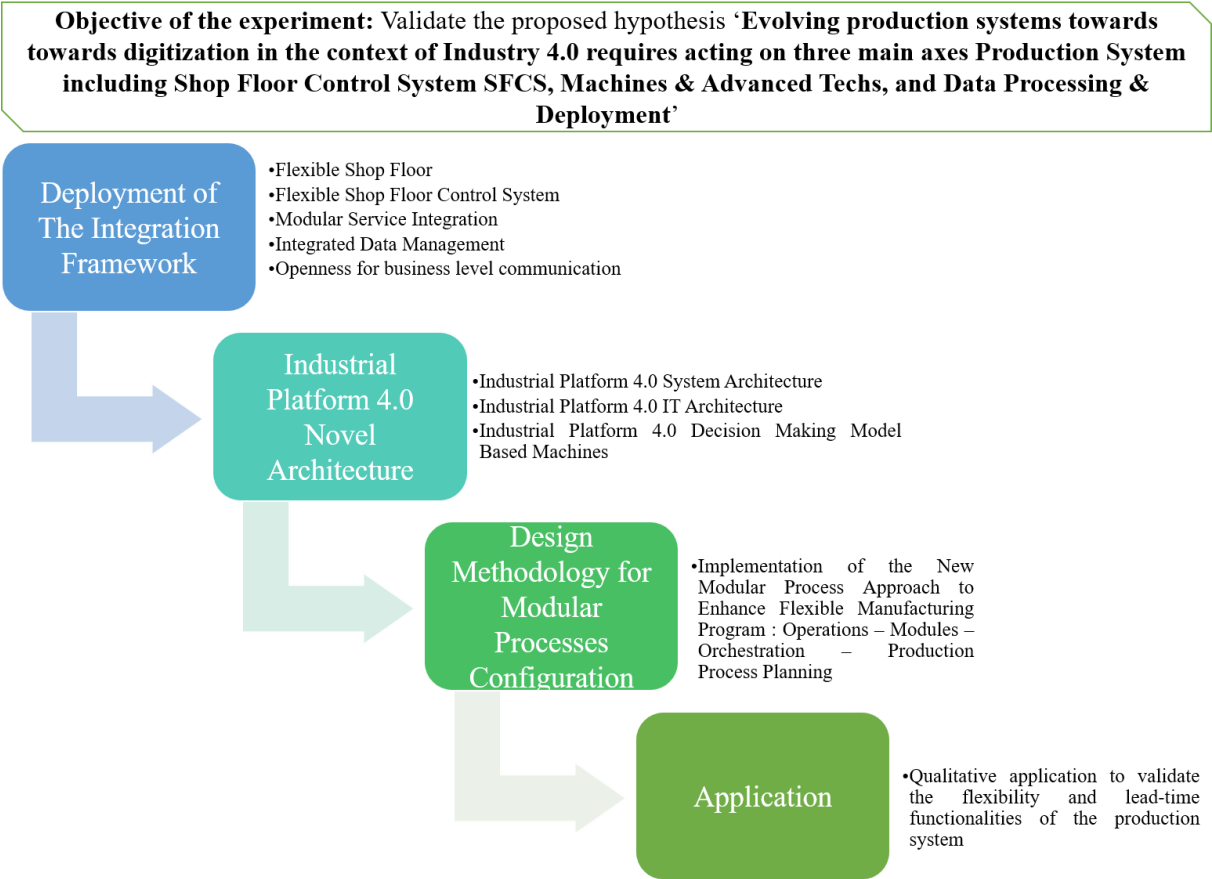


Fig. 29 Objectives and protocol of the experiment

9.2 Deployment of The Proposed Framework

The design framework proposed above is applied on the industrial platform and enriched with concrete details by deploying a new architecture. In what follows, the deployment of the framework is explained layer by layer.

9.2.1 Flexible Shop Floor

Concerning the machines layer, two level of modularity were developed, machines modularity and operational modularity. Machines modularity deal with transforming existing machines to CPS entities and/or flexible machines. Starting from turning the robots into smart and connected CPS by

implementing innovative configurations considering an internal data base developed and integrated into the production system. This data base is connected to trajectories programs which enable the transfer functions between different part stores and machines. Loop points per area are created to eliminate any collision between robots and machines / obstacles. These trajectories are well optimized consequently by adding several parameters: ID part, part diameter, height of the robot's gripper from the bottom of the part, speed of motion, and Tool number.

Regarding CNC machines, the fact is that automatic production machines are not well developed to be connected, intelligent, and open to exploit. To solve these issues, an IoT layer was added first overlaying the manufacturing machines in order to exploit data and useful information to enhance and supervise machines working states. Therefore, vibration sensors are added to machines along with temperature and IoT position sensors depending on the functional requirements of each machine in order to gather the maximum useful machining information. Secondly, machines control was extended by additional I/O modules to allow the selection of the desired manufacturing program with parametrization ability, activated through a main flexible G-code. Remote accessing machine's data through a USB Networking Adapter with the CNC enabled the file transfer of the machining programs to CNC machines from the MES already connected to a CAD/CAM tool. The CNC machining operation is parametrized first by the ID corresponding to the subroutine program reference, the cutting depth, and the speed of cutting.

Third, a 3D scanner is installed for advanced quality control function. The MES activates the 3D scanner via OPC UA. The 3D scanner generates a cloud point and compare it with the native design of the selected product and send back the results of conformity to the MES in a form of report. Adding to this, another camera system is embedded to the robots and has two main functionalities, a supplement conformity control in-situ which means parts will be controlled on machines before getting recovered by the robots and readjusted if needed, and an extra security check to eliminate any collision between robots vs machines and robots vs parts.

Machines modularity presented below contribute to the operational modularity. The operational modularity / flexibility implicates a flexible production with a new configuration perspective including all useful machining scenario enabling the customisation of production processes which will be explained in details in section 9.4. The production is consequently organised through functional modules that can be launched in a different order. This will allow us to take advantage of the full potential of the platform and gain flexibility. Each of these modules is composed form standardized operations and will be then integrated into the automation control process. To this end, we created several configured parametric operations that represent all the production operations adapted to the potential of our 4.0 industrial platform:

- Transfer operations between machines and stocks (Robots trajectories).

- Machining operations including CNC machining (G-codes for machining processes), and laser cutting operations.
- Quality control operations including 3D scanner operations for quality control, and Dimensional quality of parts being manufactured using robot embedded camera.
- Inspection operations using fixed and embedded camera including security checks, storage and anomaly controls.

To conclude, having a flexible and adaptive production system is essential for our scientific experiments in terms of flexibility. To achieve this goal, several changes would affect the conventional organisation of the shop floor, mainly its configuration perspective at both the operational and devices level. Several advanced technologies and options introduced by I4.0 **Fig. 30** have been deployed such as connected machines, 3D scanner, intelligent embedded camera systems and IoT sensors, along with deploying modular standardized parametric operations, a new modular planning approach compatible with the desired flexibility in the context of “Industry 4.0”.

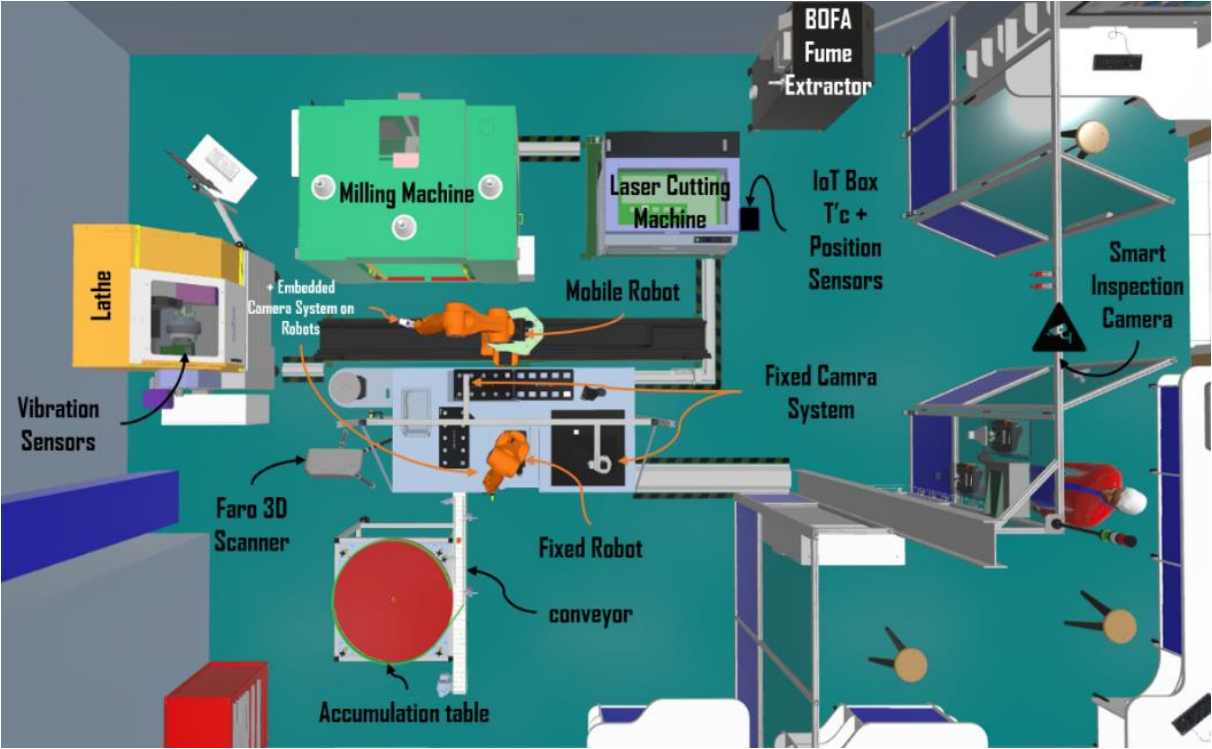


Fig. 30 Industrial Platform 4.0, 3D Model

9.2.2 Flexible Shop Floor Control System

In order to deploy the operational flexibility created at the devices / machines layer, the shop floor control system must support the introduced flexibility and modularity. In order to overcome the control limitation for an improved manufacturing system, the approach we propose is similar to the call up method by departing the control of automation logic functions of the API layer to the upper layer of the

CIM pyramid, so that they are accessible to users of the workshop. For this purpose, logic functions were adapted to be used without requiring the intervention of an automation redevelopment work. We are no longer using master grafkets to manage the commands of the operations, it is the Manufacturing Execution System MES (supervision & execution) that will perform this function. Concretely we generate small parametric production sequences that the engineer can use separately as standard operations or assembled to form functional modules in order to build a complete production plan. These standardized operations and modules activate the logical functions of the controller, keeping this way a clean path by using the standardized automation protocols to controlling shop floor machines.

Well, this solution concerning the control system is not unique. First of all, a suitable workshop control system must take into account the standard automation requirements concerning the control and monitoring of industrial systems: ISA-88, 95,106 standards, providing direct control via small microcontrollers or standard PLCs. The use of standard PLCs or microcontrollers will be provided by the deployment of logic functions or functional blocks. Subsequently, and with the goal of establishing operational flexibility, a remote scheduling function to an orchestrator will help free up and expand the decision-making process to configure a flexible production plan for a product. Consequently, the production plan execution process can be dynamic and optimizable thanks to the flexibility implemented at the control level. Finally, the possibility of integrating AI for small tasks through intelligent control modules is now possible thanks to new low-level intelligent automatic modules recently present in industrial markets.

9.2.3 Modular Service Integration

Focusing on the modular manufacturing information system, the main objective is to deploy a service-oriented manufacturing system capable of providing manufacturing functionalities such as production planning, production management, production optimisation and supervision. This modular information system must host manufacturing service applications and support the CPS modules integration by solving interoperability issues. Accordingly, this structure will enable a decentralized decision-making level distributed through the different modules of the system and allowing the integration of a distributed architecture at the site level.

The development has focused on adding a flexible layer into this production line by enabling it to produce several products and following different manufacturing cycle in a rapid configuration. An advanced distributed and service oriented MES is deployed to the platform, where alarms, trends and all data from machines and sensors are collected. The production system is therefore composed of different applications responsible each of a precise function including historization and trends, communication integration server, production planning, AI data processing and AI image processing. These applications are not necessarily hosted by the MES but also internally developed applications

especially the AI processing modules which are connected to the production system and can provide it with the interpreted information. An example of the integrated modules is the smart visual inspection system. An inspection camera was added to the production platform and controlled via a machine learning algorithm for human detection (El Zant et al., 2021). When a human is detected approaching machines, the camera system sends a notification to the MES to pause the production and ensure security of operators. This module is loosely coupled to the production system and can be used for several applications and generate opportunities to develop different parallel modules for data and image processing and integrate them into the manufacturing system in order to enhance and well optimize the whole production process. Two additional modules integrated to the production system will be presented in section 9.6 along with the respective architectures. The interoperability issue was solved thanks to the communication integration server of the MES which allow a wide variety of communication protocols through communication drivers. The PLC for example is communicating with MES via Sirect operations integration server, and the 3D scanner is communicating through OPC UA.

Finally, the control in real time of the operations and the scheduling are done through a web application HMI developed through the distributed MES. The objective is to provide an interface which communicates with robot's programs and machines via their identifier, and to orchestrate control and monitoring services in order to organize the production processes in the desired order as well as supervising and monitoring the production facility.

9.2.4 Integrated Data Management

As discussed before, data management including data aggregation and data mining is an essential objective in the digital transformation of the production systems. To do so, the shop floor layer has been superposed with an IoT sensors layer driving to exploit potential data and information from machines such as vibration sensors for predictive maintenance, power consumption for energetic optimisation of the production processes, temperature sensors for safety assurance and security matters. Some of the collected data are crucial for the production planning and management thus addressed to the management level to enrich the production system. Other low data are processed locally on a designated CPS assuring machine to machine communication and allowing for a local decision-making process regarding flow management. As an example, advanced robots at the platform are playing the role of managing transition stores and on-going product transfer at the shop floor locally using an integrated data base, which is shared as well with the MES layer for products tracking. Data from shop floor control system such as availability of machines are well considered and shared through the network with the management level since the production system will be in charge of managing the process flow and the overall production planning. Control data are critical equally to enhance the security of the production processes.

Technical wise, two TCP/IP networks were implemented. The first one is considering the management and business level, connecting the MES with other application modules including Historian, the HMI, and a portable HMI via 4G, as well as a bypass to the cloud. The second network represents the devices field bus where two flow of data can be defined, control and monitoring data for processing through controllers' routes, and data transfer flow using different communication protocols collected from machines, sensors and actuators. Management level will provide the production system with valuable data especially historical data, trends and KPI's, but also designed to gather raw data and exploited data for optimisation objectives. Alongside, data mining service modules are connected directly to the production system providing it with treated data, such as smart inspection camera modules. In addition, data management include the development and the implementation of cloud platforms where data can be stored and processed in parallel to the local machines. Cloud platform can provide cloud computing for raw data and learning new patterns to enrich the local AI algorithms. Finally, the production system is well connected to the business level through the ERP platform once deployed, where data can be shared in two directions in a well-defined perimeter taking into consideration cyber-security matters.

Taking into consideration the integrated data management dimension allowed to make use of data in organising and monitoring the production system and will contribute to the performance and the optimisation of the system since the data flows are assured in both ascendant and descendent directions. Additionally, the integrated data management helps defining the data lake of the platform and aggregating different types of data including low level data (raw data from machines including machines availability), sensors and IoT data, unstructured data such as images for image processing, point cloud data for quality control, and processing data including machining programs. The final design of data flows will be presented in detail in section 9.7.

9.2.5 Openness for business level communication and distributed industries

The integration of MES systems with ERP systems or other business applications has become a critical mission for manufacturing operations. In particular, this provides flexibility in production planning. It also improves supply chain visibility and decision support by updating business applications with real-time production information.

The production system digital platform integrated to the production system, provides the ability to exchange messages and enable automatic data synchronization between multiple workshop applications and corporate workshops. This enables manufacturing and business systems to communicate in an easier and more secure manner. This includes integration and exchange capabilities, including XML messages, flat files, SQL queries that allow the integration between multiple workshop applications and ERP or other business systems. Extensions allow through custom plug-ins to extend the connectivity of the ERP with any system or to standardize the use of the product in a multi-site scenario. The integration features

of such distributed ERP include high integrity of data exchanges, flexible message exchanges and native integration with MES. Users can also benefit from a complete history of message exchanges, Store & Forward functionality, extensions for personalized management of data transformation as well as web interfaces.

9.3 Industrial Platform 4.0 Novel Architecture

Based on the vertical integration implemented through the proposed transition framework, the system architecture has been upgraded to an advanced level in terms of flexibility and autonomy. The upgraded version of the system architecture is established and supported by the IT infrastructure of the platform assured by the new IT architecture deployed. The new IT architecture conducted to assure the modularity of the system and to solve the interoperability constraints. Consequently, thanks to the modular information system and the flexibility assured at the shop floor level, a new configuration of the decision-making level of different machines and modules is subsequently enabled assuring the decentralisation functionality of the production system.

The production system architecture as well as the IT architecture of the platform will be represented in the next sections. Finally, and before discussing the emergence of the production system configuration in section 9.3, the decision-making level model-based machines is presented in 9.2.3, introducing the decentralisation assured through the new system architecture.

9.3.1 Industrial Platform 4.0 System Architecture

As shown in **Fig. 31**, the system architecture has clearly evolved. Machines layer composed from lathe, milling, and cutting machines in addition to the robots have a direct control communication with the PLC / API layer. This communication is established through I/O, Profinet and other industrial communication protocols for low level data transfer and automatic steering controls. Data shared between machines and the PLC are directed to the MES through a communication established between the MES and the PLC in Sidirect driver for Siemens Profinet, thanks to the integration server of the MES. From another side, the IoT layer superposed to the machines including accelerometer sensors from Intellinova on the lathe, power consumption sensors from Socomec installed on the machines power source, and Sick IoT box connected to position and temperature sensors on the laser cutting machines are all communicating directly to the MES through Modbus communication protocol. The 3D Scanner from FARO installed to the processing machine is communicating through OPC UA communication protocol to the MES on the same network. Embedded cameras Sensorpart are connected to the local network and the robots via Profinet, while the fixed camera system from Cognex is integrated to the robots system. Another data transfer communication is established directly though the network between the MES and the Machines for Gcode programs sharing. Gcode programs generated by the CAD/CAM tool from SprutCam are accessed by the MES and shared through the network in order to

update the active programs on the CNC machines. An inspection camera from IDS is connected to the system platform on the network. The inspection system is installed on the processing machine and communicating with the MES through OPC UA.

The MES presented in this architecture represents several service-oriented applications including the Integrated Development Environment IDE of Aveva System Platform, the integration server, the HMI developed through Intouch OMI, and the historian. A DNS server is installed to the main server in order to activate the Intouch Access Anywhere application playing the role of a deported HMI application for portable use through another 4G network separated from the local one. The simulated digital twin application is integrated to the production system and will be presented in section 9.6 along with the smart visual inspection system. Finally, the cloud computing module is not already deployed but enabled first through Azure and Aveva Insight application connected to Aveva System Platform through the 4G network and enabled as well on the processing machine on the same network if needed. The configuration of the cloud computing platform will be conducted by the PhD thesis of my colleague EL HELOU Marwan, working on the integration of Cloud Computing in the manufacturing systems.

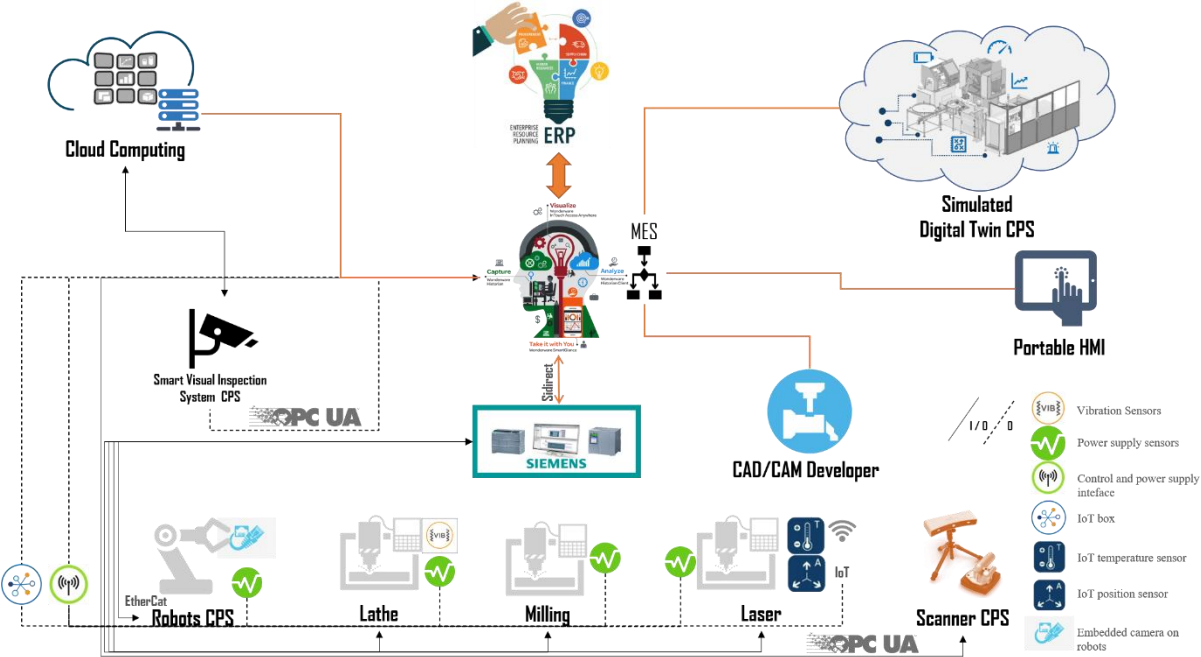


Fig. 31 Industrial Platform 4.0 System Architecture

9.3.2 Industrial Platform 4.0 IT Architecture

In order to clarify well the system architecture, the IT architecture implemented to the platform is presented in Fig. 32. The IT architecture is organised through two main networks, the low-level network and the high-level network. The low-level networking is a TCP/IP one, connecting machines layer, control layer, and the management layer presented by the main server as a field bus network, where different

communication protocols are deployed as required for each entity. The second network is connecting the management layer composed from different machines/PCs adapted for different use depending on the implemented application role, and enabling the connection to the cloud and the portable HMI application. This network is connected to the business layer as well represented by the ERP system which is not deployed for the moments since we focus on the production system dimension.

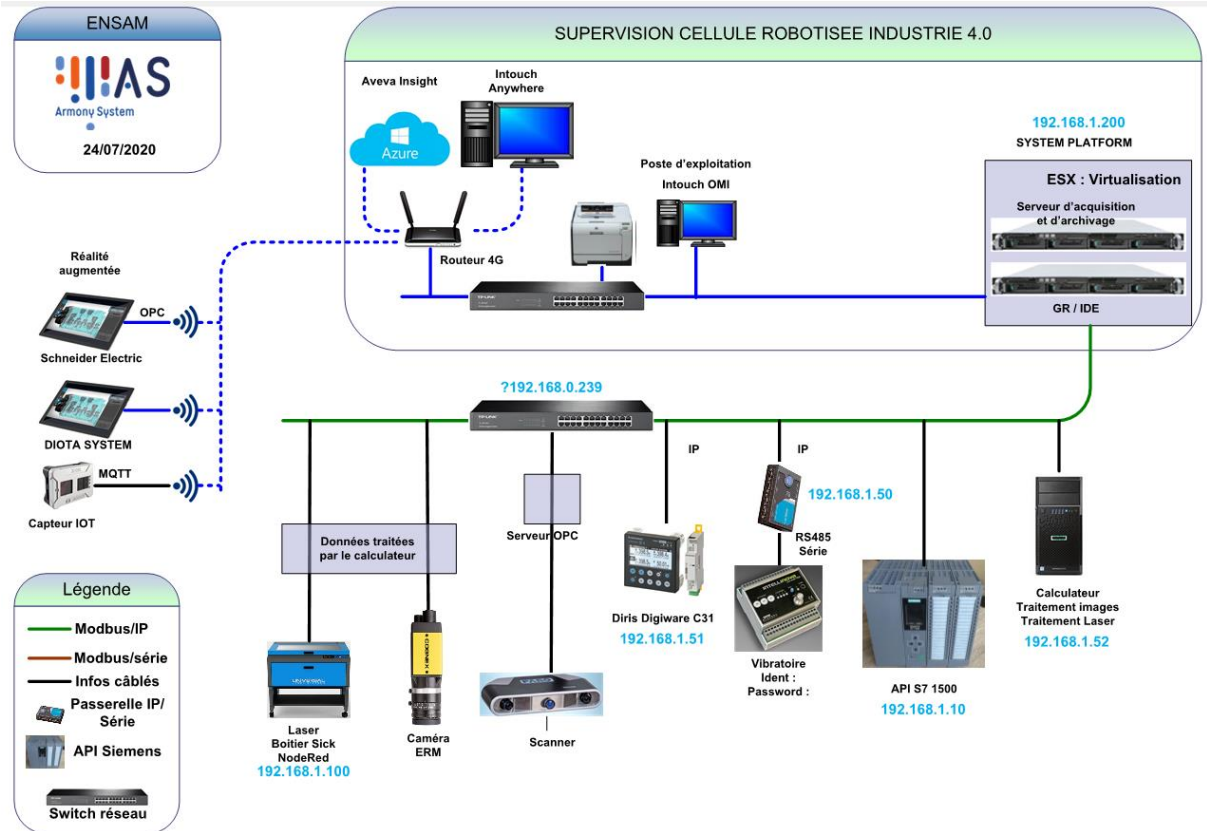


Fig. 32 Industrial Platform 4.0 IT Architecture

9.3.3 Industrial Platform 4.0 Decision Making Model Based Machines

The system architecture and the information system configuration as well as the modularity assured on the machines layer, enables an enhanced level of decentralisation in terms of decision-making level concerning production processing and information modules. Fig. 33 presents through a model-based machines diagram, the decision-making level of each entity of the system. In our configuration, the MES is playing the role of operation manager, responsible of process configuration, process planning and system monitoring. While robots are responsible of managing different stores regarding placing availability and transfer. PLC system is responsible for steering controls, but embedded cameras are responsible of confirming the well execution of the orders such as doors opening of machines.

Processing modules implemented to the processing machines such as smart inspection system and quality control are performing actions at the processing machines level and only supervised by the MES which collects in his turn the processed information.

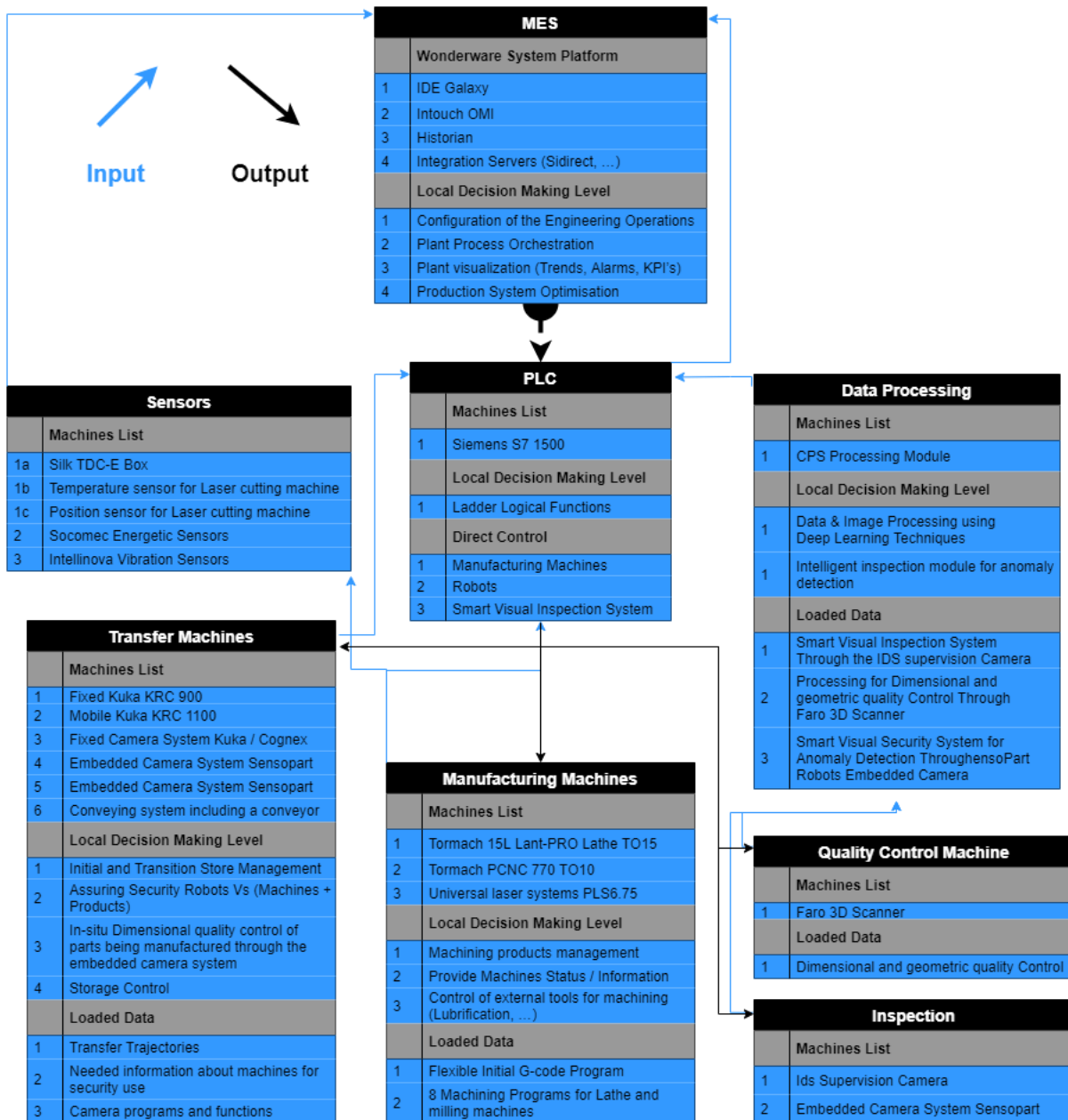


Fig. 33 Industrial Platform 4.0 Decision Making Model Based Machines

9.3.4 Synthesis

The framework based on the proposed conceptual model helps to consider the different layers of a company's production system and recommends new advanced modifications to ensure a robust evolution towards the digitization of the manufacturing system. This framework, which has been applied to the existing traditional architecture of the platform, has contributed to evolving the architecture of the

manufacturing system, in particular by ensuring the functionalities set at the beginning of this chapter, flexibility, customization, lead-time performance, modularity, decentralization, and portability.

The flexibility of operations and production processes has been well mentioned in sections 9.2.1 and 9.2.2. The new flexible shop floor configuration consisting of turning machines into CPS will have the main effect on operational flexibility, followed by the equally flexible new configuration of the SFCS of the control layer. The flexibility of the system will be well developed and demonstrated in the following two sections by deploying a new configuration of the production program. Finally, the demonstrative application presented will be carried out mainly to justify the flexibility dimension of the evolved system. In addition, the application is meant to validate the lead-time yield, particularly in the industrialization phase which concerns the development of a new production plan for a product. The simplicity of defining a new production plan and the remarkable time savings in carrying out this task are also due to the evolution of the system architecture as well as to the new configuration of the production program implemented subsequently. The modularity of the information system explained in section 9.2.4 is due to the integration of modular services following the deployment of the digital SOA platform and the integration of image processing modules. The portability of the HMI is one of those information modules implemented in the system in the form of an Intouch Access Anywhere modular application which departs the HMI via the 4G network. The data dimension is configured by integrating the vibration sensors installed on the lathe, collecting generated data in order to be processed by algorithmic modules to be developed, taking into account the level of integrated data management. Finally, the decentralization appearing in the distribution of decision-making levels between the different entities of the production system was well presented in the previous section.

9.4 A Design Methodology for Modular Processes Configuration

The deployment of the Framework within the vertical integration dimension and the evolution of the architecture of the production system has led us to deploy a new modular configuration of the production program. The contribution of this section is the implementation of a new advanced modular SFCS approach where the control process is upgraded to the MES software. This new approach impacts the classic Computer Integrated Manufacturing (CIM) pyramid, including shifting decision making and scheduling control to the MES layer rather than being stacked in the Programmable Logic Controller (PLC) at the control layer. This novel architecture is enabled thanks to the use of new advanced industrial and production process SOA software Wonderware System Platform WSP as the MES (“Wonderware System Platform - Fondation de l’Industrie du Futur,” 2017), as well as the integration of new technologies such as advanced robots, a 3D scanner for quality control, and the integration of Iot sensors and embedded camera systems. This modular approach aims to unleash the potential of the new system architecture without changing the entire existing control process but moving the decision-making process to the MES layer through the implementation of an advanced and interoperable digital platform.

This modular approach is meant to overcome these limitations without changing the whole existing control process but by moving the decision-making process to the MES layer thanks to the new, advanced and interoperable MES.

The potential of MES is in the capability of easily creating production programs using allowed standard programming languages to develop complex scripts, which will be very difficult to develop on logic controllers or even impossible sometimes. The functionalities targeted by the deployment of the MES are the production monitoring including the execution of manufacturing operations, and the production management including the management of modular production plans, by responding to customer quality and quantity requirements, and the functional needs of the system in terms of maintenance and flow management. This makes it possible to go further in the optimization of production processes, thus facilitating the development for operators and production engineers without having to make continuous changes at the level of logic controllers and the device layer of the system workshop. We can identify two main use cases with this new modular process:

- For the industrialization of a new product: the capacity to reduce time to market for the production of a new product by reusing existing modules.
- For the production scheduling: the capacity to launch a new production with no lost time and to switch easily from one routing to another.

In this section, the modular process methodology is presented in 4.1, the evolution of our SFCS is clarified in 4.2, followed by 4.3, where the modular process design patterns are discussed.

9.4.1 Modular Process Methodology

Production management consists of ensuring the successive or simultaneous execution of manufacturing operations in accordance with the qualitative and quantitative requirements of customers. Management takes into account both the manufacturing modules and the necessary logistics in terms of tools, raw materials, maintenance and the hazards that may arise during production. Industrialization, which is a preparatory work, upstream of production, aims to define all the operations grouped into modules which will be implemented in a flexible production plan. To this end, the functionalities of the MES that we wish to develop should respond, mainly, to its ability to design a production plan from identified and recorded operations as well as its ability to drive production through data. **Fig. 34** presented the flowchart of the proposed methodology discussed below.

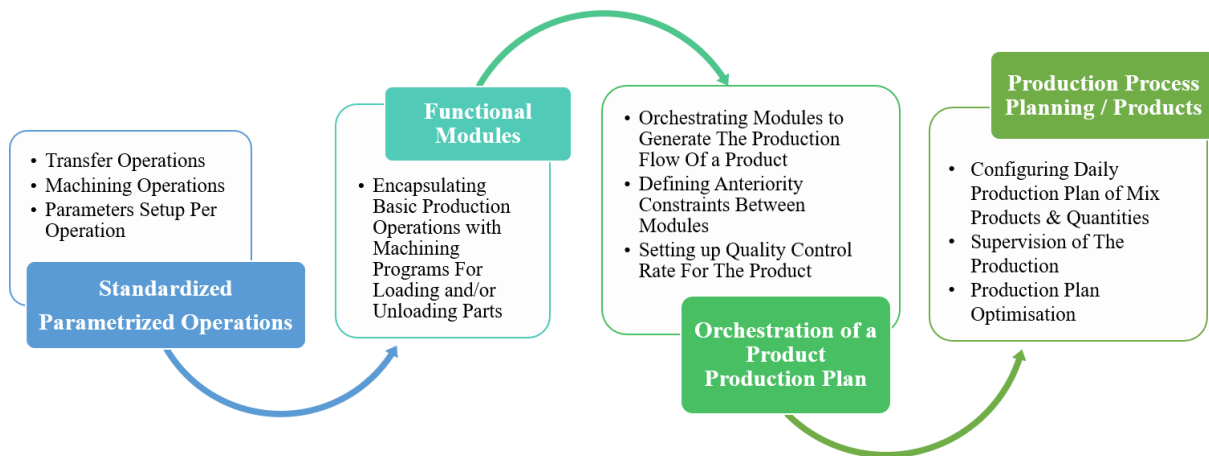


Fig. 34 Modular Process Methodology

The "Standardized Parametrized Operations" phase is reserved for the definition of basic production operations for a specific product, encapsulated to the MES and parametrized. The implementation of basic operations in MES is organized in two stages. The first takes place on machine-specific systems, such as CAM tools dedicated to the generation of tool paths for CNC machines. Indeed, all the operations necessary for a product production plan are validated upstream. Then comes the second step, which consists of preparing their integration into MES through an encapsulation action in order to make them compatible with its operational environment. This process is based on advanced technical knowledge of the production line and obeys specific codification in order to be identifiable in different interfaces. Production operations of the “standardized robot trajectory” type are interesting illustrative examples to mention. In our platform 4.0, we have analysed all the possible trajectories of the robots and we have succeeded in defining 33 trajectory that can be used in a combined way and thus cover all the needs in terms of transfer in the workspaces of the platform 4.0. This approach helps to increase the flexibility of operations and thus facilitates the design of a production plan by assembling standardized operations.

The "Functional Modules" or "industrialization" refers to the preparation of modules, where each module can group together, in a precise schedule, several operations from the previous phase. These modules can constitute a sequence of logical production operations dedicated for a specific product. For various reasons, any module must be able to be simulated and executed. For example, the engineer can develop a specific quality control module M1 which consists of using the Mobile Robot RM to transfer the component and drop it to the rotating plate of the 3D scanner through RM_Drop_Scanner operation, and activate the scanner using Scan_ProgX which recovers the point cloud and compares it to the native 3D model of the part X. Another module M2 will be created to pick the controlled part and transfer it to the Transition Store (TS) using respectively RM_Pick_Scanner and RM_Drop_TS operations **Fig. 35**. This phase allows production engineers to prepare modules by overcoming the issues of interoperability, robot programming, scanner control, etc. which provides a real advantage in productivity.



Fig. 35 Functional Modules Examples

The 3rd phase called "Orchestration of a Product Production Plan" is dedicated to finalizing a production plan for a given product. This phase consists of orchestrating modules to generate the production flow of a product, defining anteriority constraints between modules, and setting up quality control rate for the product. The production engineer collects all the modules necessary for the execution of a given production order and imposes the constraints of inter-module anticipation. Some modules are configured, in particular the quality control modules, which must be activated in proportion to the number of components manufactured. In this phase, the MES should offer several options, the first consists of taking into account the constraints imposed between modules and proposing all possible scenarios for scheduling production modules for a defined product. Finally, the 4th phase "Production Process Planning" or "piloting" is a logical continuation of the previous phase. The objective here is to prepare launching the production and to ensure it is managed in real time.

9.4.2 Shop Floor Control System SFCS

Actually, in the case of fully automated production, one of the flexibility locks is located at the controller level. Indeed, once the process is frozen in the Application Programming Interface (API) layer, only reprogramming the controllers allows the workshop to be used for another task than the active / configured one. For each new product, it will be necessary to create and redevelop a new program, allowing to produce another product rather than the old one. This situation represents the conventional industrial architecture type 3.0. In order to overcome this limitation for an improved manufacturing system, the approach we propose is to deport the control of automation logic functions of the API layer to the upper layer of the CIM pyramid, so that they are accessible to users of the workshop using the call-up technique. For this purpose, logic functions should be adapted to be used without requiring the intervention of an automation redevelopment action. Master grafkets are no longer used to manage the operations, it is the Manufacturing Execution System MES (supervision & execution) that will perform this function.

Concretely we generate small parametric production sequences that the engineer can use separately as standard operations or assembled to form functional modules in order to build a complete production plan. These standardized operations and modules activate the logical functions of the controller, keeping

this way a clean control path by using the standardized automation protocols to controlling machines.

Fig. 36 presents the proposed command architecture:

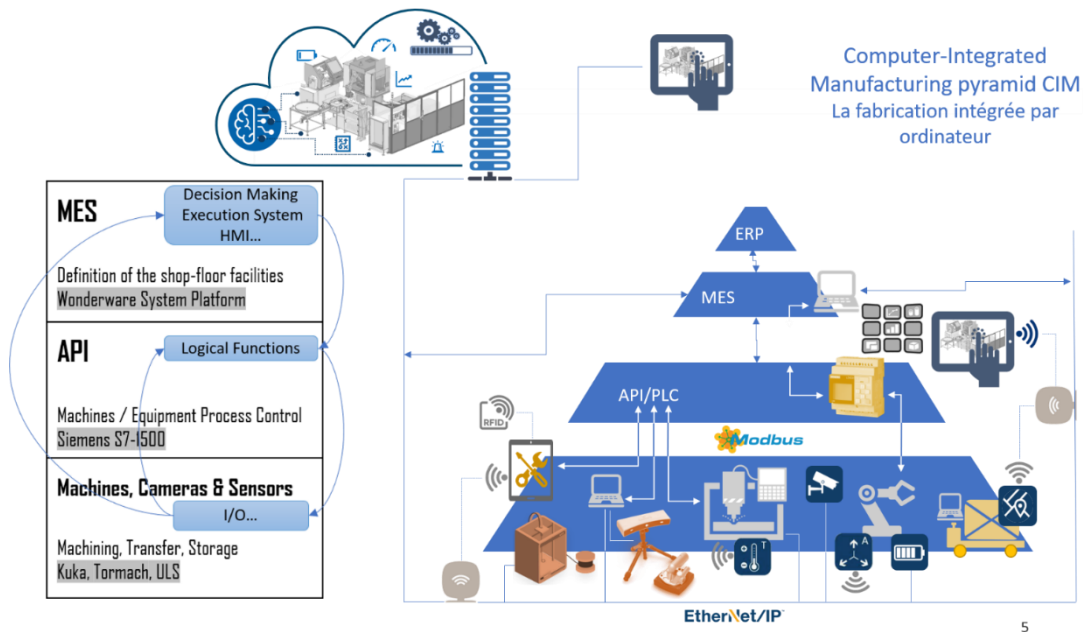


Fig. 36 Platform new control architecture

9.4.3 Modular Process Design Patterns

(Weyer et al., 2015) identified the issues of the design of a heterogeneous production line by new control architectures, new engineering and programming paradigms, communication standards and IT security challenging the digital evolution of the production systems. Three paradigms were identified by (Weyer et al., 2015) to specify central aspect of Industry 4.0 concerning the production systems **Fig. 37**. Starting from the smart product in the meaning of product-oriented production configuration, where the product embedded its own operational data and requirements to be processed in a modular production system. Secondly, machines getting smart when being transformed into Cyber Physical Production Systems (CPPS) enabling its self-organization, decentralization of the decision making at the shop floor level and allowing an easy plug-and-play integration. Lastly, the augmented operator considering the smart working environment as a requirement for technicians as for production engineers technological support when dealing with highly flexible and modular production systems.

Modular Process Design Patterns

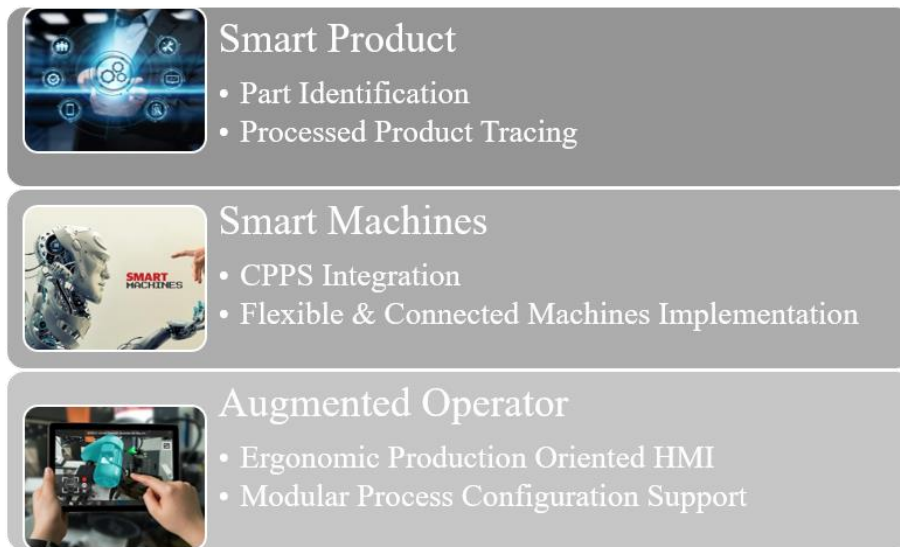


Fig. 37 Modular Process Design Patterns (Weyer et al., 2015)

The first dimension ‘Smart Product’ is considered in our configuration in a holistic way since we are using polyethylene plastic material without an RFID tag nor an embedded memory but categorized by ID series lot, identified by the fixed camera system and an ID number given by the MES for the part. The MES itself manage the production processing modules in our case rather than embedding the operational information into the product. Hence, this identification is used first to recognize the raw part for a specific product based on its ID series and its dimension (diameter), second to trace and track the part in the production processes and its place ID in different stores using its ID number, third to build a processing information data base of the processed parts on the robots bay shared between robots and the MES and updated instantly using internal robots functions taking into consideration loading / unloading / transferring parts as well as machining data. This data base serves in addition to assure the self-organization and collaboration between fixed and mobile robots in order to manage the transition stores as it serves as well in securing the robots vs parts loaded in the stores and the machines.

The smart machines as the second dimension is our essential concern since the interoperability and the compatibility issues were not at all considered when designing the line with its basic conventional configuration ‘automatic mass production’. Starting from turning the robots into smart and connected CPPS by implementing innovative configurations considering the internal data base developed and integrated in the production system, and its connection to the trajectories programs enabling the transfer functions between different part stores and machines by creating loop points per area to eliminate any collision between robots and machines / obstacles. These trajectories are well optimized consequently by adding the speed of the robots’ motion to the transfer operations in order to recompensate the time loss when following the loop points as starting and ending points in each trajectory.

Regarding CNC machines, other initiatives were implemented concerning machining flexibility. An access issue was crucial avoiding remote controlling the machine in updating machining programs, activating the program, and launching the activated one. First, the G-code transfer problem was resolved using a USB Networking Adapter with the CNC controller since the controller supports network access for file transfer – a fast and convenient method to transfer G-code programs directly to the controller from the MES where the activated machining programs list is set. The MES in his turn is connected to a CAD/CAM software where the machining programs are generated. Second, the activation issue is resolved by creating a main conditional G-code program to be activated when initializing the line, which in his turn call for each machining program of different parts as a subroutine stored in the subroutines file shared with the MES. To do so, machines controller was extended by additional I/O modules to allow remote access to machines and activating several machining sub-programs with parametrization ability such as cutting depth and cutting speed. Additionally, the fact is that automatic production machines are not well developed to be connected, intelligent, and open to exploit. To solve these issues, an IoT layer was added overlaying the manufacturing machines in order to exploit data and useful information to enhance and supervise machines working states. Therefore, vibration sensors are added to the machines along with temperature and position IoT sensors depending on the functional requirements of each machine in order to discover and gather the maximum useful machining information. Concerning the quality control task, a 3D scanner is installed for advanced quality control function. Adding to this, another camera system is embedded to the robots and has two main functionalities, a supplement conformity control in-situ, which means parts will be controlled on machines before getting recovered by the robots and readjusted if needed, and an extra security check of robots vs machines and robots vs parts in order to avoid any accident due to a wrong signal or a manual manipulation.

Furthermore, this flexibility implemented to the machines at the shop floor is reinforced and assured by the new configuration of the control system layer as presented in the section 9.2.2 discussing the shop floor control system configuration which enables not necessarily the physical integration but simply the plug and play modules integration in a form of standard programmed operations.

Lastly, the augmented operator dimension is considered clearly at the MES stage where an ergonomic production-oriented HMI is developed using Intouch OMI, enabling the production engineer to develop the product production plan by assembling core functional modules connected by flows and supporting the modular process configuration. The production engineer when receiving the order for a new product, starts from creating the correspondent machining programs using the CAD/CAM developer in case of not having the samples in the library, and imports them directly to the MES. He builds a list of all machining and transfer parametrized programs at the operations stage, before creating functional modules composed of one or more basic operation in order to transform this group of operations into a

meaningful process such as recuperate a part from the transition store by the mobile robot, load it to the lathe machine and run a specified machining program. The step forward is to arrange these modules and connect them by flows with the ability of adding anteriority constraint between two consecutive modules if needed along with setting the quality control rate corresponding to the percentage of controlling this product's lot when finished using the 3D scanner. Finally, the production engineer creates the list of products for the daily production planning. This organisation helps the production engineer and the operators to deal with the new modular configuration, saves a plenty time of the industrialization phase integrating a new product and a variety of products, and also simplifies the industrialization phase avoiding the production engineer from re-engineering processes, reprogramming machines, and reconfiguring the control system any time a new product processing is required.

9.5 Implementation of the New Modular Process Approach to Enhance Flexible Manufacturing Program

The platform is controlled through Wonderware System Platform WSP - Schneider product ("Wonderware System Platform - Fondation de l'Industrie du Futur," 2017), where alarms, trends and all data from machines and sensors are collected **Fig. 38**. The production line, thanks to developing this flexible layer, is able to produce different products and to drive different manufacturing plan.

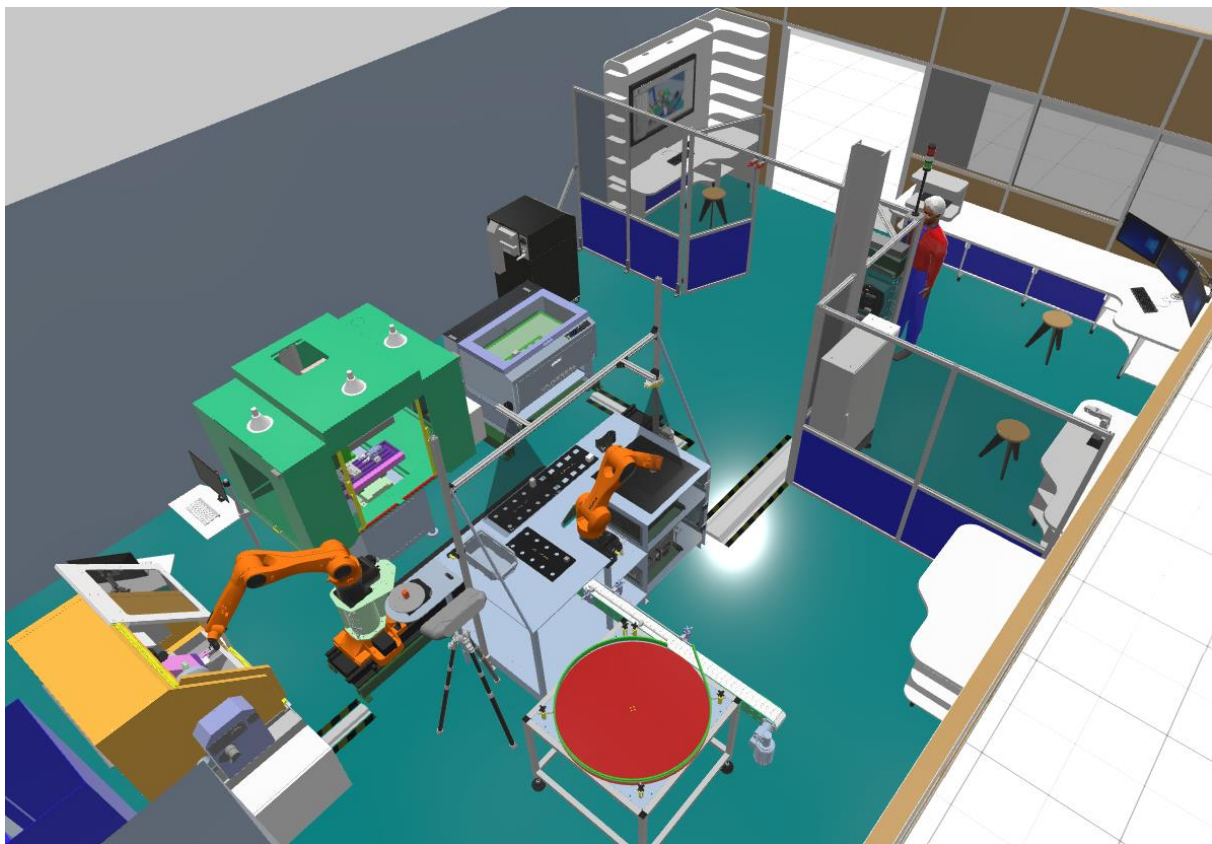


Fig. 38 ENSAM Industrial Platform 4.0, 3D-Model

9.5.1 Standardized Parametric Operations

Due to the shop floor flexible machines configuration, the development of the standardized parametrized operations is enabled. Several configured parametric operations were created representing all the production operations adapted to the potential of our 4.0 industrial platform. The parametric dimension expresses a variability that allows the operation to adapt to the context, in particular to the variability of the components manufactured. The operations can be defined in different ways, it all depends on the standardization sought. Corresponding to our platform, we have chosen to group the operations into 4 categories, summarized in the first column of **Table. 4**. The interest here is to identify all the operations necessary for manufacturing, controls, transfers, assembly, etc. which allow the production of a component to be ensured, starting from the initial stock until the delivery of the finished product and the controlled one where it could be recovered from the accumulation table. In other words, we are organizing production processes into multi-task production operations as follow:

- Transfer operations between machines and stores (Robots trajectories).
- Machining operations including CNC machining operations (G-codes for machining processes), and laser cutting operations.
- Quality control operations including 3D scanner operations for quality control, and Dimensional quality of parts being manufactured using robot embedded camera. The main dimensional and geometric quality control operation is conducted through the 3D scanner which compares the point cloud of the part being controlled to its native model. A dimensional quality control operation is performed by the embedded camera on the mobile robot in situ for parts being manufactured before recovering. This operation helps detecting deviations in order to readjust the manufactured part if possible before recovering.
- Monitoring operations using fixed and embedded camera including security checks, storage and anomaly controls. Fixed camera system above the initial and the transition store assists in the storage control and management of raw and manufactured parts. The supervision camera helps monitoring the production line by detecting any human presence nearby robots to alert the operator and pause the machines. Finally, supplement security checks are performed in addition through the embedded cameras to the robots to assure the availability of a place to drop a part as well as the opening of machines door to avoid any collision.

Table. 4 Standardized production operations

operations	Functions	Materials
Transfer	Robotic transfer between the transition store and the machines	Kuka Agilus 1100

	Robotic transfer between machines and the 3D Scanner	Kuka Agilus 1100
	Robotic transfer between the transition store and accumulation table	Kuka Agilus 900
	Robotic transfer between initial and transition store	Kuka Agilus 900
Machining	Lathe Machining	Tormach
	Milling	Tormach
	Cutting - ULS	Universal Laser System
	Engraving - ULS	Universal Laser System
Quality	Dimensional and geometric quality	3D Scanner Faro
	Dimensional quality of parts being manufactured	Embedded Camera
Monitoring	Storage control	Fixed Camera
	Anomaly control	Supervision Camera
	Security control Robots vs Machines, Robots vs Parts	Embedded Camera

Certain operations may require specific configuration, in particular with regard to the flexibility of the platform. For example, the robot's gripper in terms of stroke and shape, has to handle different workpiece dimension. Indeed, the typology of the different components that will be manufactured suggests that we maintain the "Gripper" aspect as an input parameter to transfer programs. The robot trajectories for transfer and machines loading are created as trajectory entities that can be assembled and used in any production process. For this, we have defined areas within the platform, which will be the starting and ending points of the robot trajectories. These points are called Loop Points and will be used at the beginning and the end of each trajectory and will ensure that each trajectory can be performed before or after any other trajectory. Indeed, the paths between each of these loop point have been tested to avoid any risk of collision with the equipment of the cell. Some additional trajectories dedicated to specific functions or security matters have also been added including basic security control sequences, such as controlling the opening of the doors of the machines to which they are heading. The Chosen trajectories for programming correspond to every possible path connecting different zones **Fig. 39** and each machine.

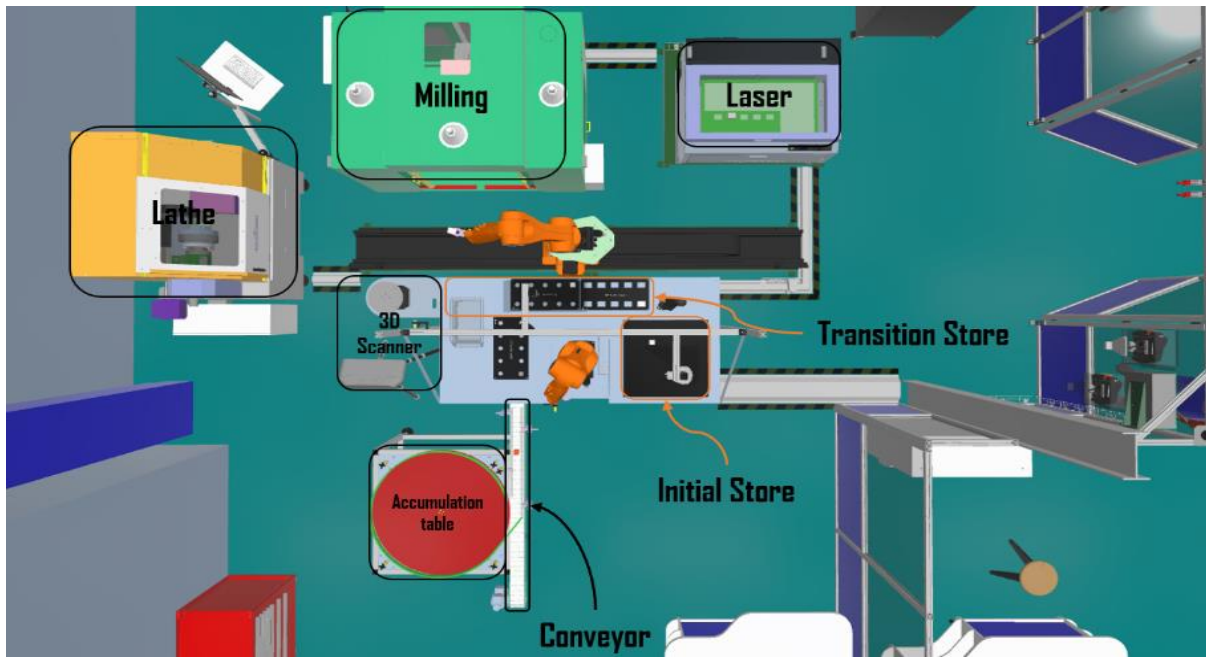


Fig. 39 Industrial Platform 4.0 Zones

Table. 5 illustrates in the second column an example of standardized production operations that can be requested in different production programs. The last column in the table presents some parameters dedicated for the correspondent operations. A robot trajectory is parametrized by the part ID, the diameter of the part, the height of the robot's gripper from the bottom of the part, and the robot's speed. The CNC machining operation is parametrized first by the ID corresponding to the subroutine program reference, the cutting depth, and the speed of cutting.

Table. 5 Example of parametrized operations

Machines	Operations	Description	Parameters
Robot K900	W_RF_Pick_InitStore	Pick the part from the Initial Store	ID, Ø, H, S
Robot K900	W_RF_Drop_TransStore	Drop the part in the Transition Store	ID, Ø, H, S
Robot K1100	W_RM_Pick_TransStore	Pick the Part from the Transition Store	ID, Ø, H, S
Robot K1100	W_RM_Drop_Tour	Drop the part to the Lathe	ID, Ø, H, S
Embedded Camera	W_RM_Control_Tour	Presence check of the part in the Lathe	ID, Ø, H, S
Tour Tormach	Prog_Tour_1	Turn On the referenced Lathe program	ID, D, S
Robot K1100	W_RM_Pick_Tour	Pick the part from the Lathe	ID, Ø, H, S

Robot K1100	W_RM_Drop_Scanner	Drop the part to the 3D Scanner	ID, Ø, H, S
Scanner FARO	Prog_Frao_1	Start Scanning (referenced part program)	Frequency %
Robot K1100	W_RM_Pick_Scanner	Pick the scanned part	ID, Ø, H, S
Robot K1100	W_RM_Drop_TransStore	Drop the part to the Transition Store	ID, Ø, H, S
Robot K900	W_RF_Pick_TransStore	Pick the part from the Transition Store	ID, Ø, H, S
Robot K900	W_RF_Drop_Conv	Drop the part to the final conveyor	ID, Ø, H, S

9.5.2 Modules

In fact, the MES transform basic production operations from the interconnected machines, robots, scanners, PLC's, actuators and sensors, into modules which encapsulate machine programs but also information and commands linked to its operational environment. Several strategies can intervene in the definition of modules from the operations defined in the previous step. The first strategy is to define modules that group together a minimum of operations under an identification that can be understood by the different operator involved in development and production. The advantages are multiple, in real time, this strategy increases the flexibility of production, in particular by its ability to reorganize the production plan in order to avoid the occurrence of undesirable events on the platform. On the other hand, in deferred time, this strategy offers the possibility of enhanced optimization in the scheduling phase of production modules. The second strategy is to define modules grouping together a sequence of operations such as transfer operation in order to facilitate visibility of the production plan, but may result in increasing the number of modules to respond to different tasks. The interoperation prior constraints make it easier to group them into a module; therefore, the parameterization of certain operations is transferred to the module which returns the value of the parameter to the operation concerned in the production phase.

It can be seen in **Table 6** that certain modules group together a single operation, while other modules group more than one operation for various reasons. We distinguish three main categories of the modules. First category considers transfer modules, which can regroup one or more transfer operation concerned by robots. Transfer modules such as the first and the 4th modules listed in table 6, are concerned with transferring parts between machines and different stores as well as assembly functions. Second type considers processing modules concerned with machining operations, quality, and monitoring control. These modules are meant to be single and specific to the machining of a precise component. Furthermore, processing modules such as the "Lathe machining - Pawn" module, are meant to be independent of transfer modules in terms of functionality in order to enhance the system flexibility and

liberate robots to perform other tasks. Other processing modules have percentage settings set to define the frequency of the module request for a product family such as presence control module resented in table 6. Last category considers the personalised modules. This category stands for enabling the operator to develop a personalised module by regrouping several transfer and processing operations for specific functional requirements.

The possibility to create such separated modules, thanks to the developed modular process, provides the manufacturing system with a considerable level of flexibility since multiple modules could be launched in parallel depending on the machines availability first and the queuing management generated by the manufacturing system based on the optimisation criterion (time, power consumption, machines priority, ...). The development work of these modules requires multidisciplinary skills in automation, robotics, and machining, but it has a great added value for the following production engineering work because when it is done, no more important development will be required.

Table. 6 Example of production modules

Modules	Operations	Module definitions	Settings
Raw transfer from initial stock to lathe	W_RM_Pick_TransStore		
	↳ W_RM_Drop_Tour		
Presence control	W_RM_Control_Tour	In-situ control of the presence of raw part	% de n
Machining lathe - Pawn	Prog_Tour_1	Start the machining program	Lathe
Machined part transfer to the transition store	W_RM_Pick_Tour	Get the machined part from the chuck and evacuate it to the accumulation table	n
	↳ W_RM_Drop_TransStore		

9.5.3 Production Plan ‘Orchestration’

The 3rd phase of this section is the scheduling of production modules to generate a digital production plan and therefore orchestrate the created functional production modules. We distinguish in our approach 3 types of production plans. The first called "initial" which takes into account the precedent constraints in-between modules. This initial plan is not well optimised as it stands, it only gives a global overview of the initial production plan since it activates the defined modules sequentially. The second version of the production plan, called "dynamic", which will be subject to the capacity constraints of the

platform and the machines availability. Consequently, the MES will be able to manage production by executing several production plans in parallel while managing flow management. The MES system will be able to plan its execution taking into account the current production load by managing the production flows (Queuing Management). The 3rd version of the general production plan called “optimized” consists of optimizing the machining and transfer operations in terms of time, cost or energy, based on the processing of data collected from the various sensors and IoT superimposed on the machines. The criteria which can be used are cost, time, or energy. The optimization can be mono-objective, for example producing a production plan which minimizes energy consumption, or multi-objective, when we seek for example to identify a production plan which offers the best time of production at the lowest cost.

Fig. 40 illustrates a production plan for a Pawn organized into several possible flow scenarios. The first flow transfers the machined part from the lathe chuck to the 3d scanner, activates the scanner to measure dimensional deviations, then transfers it from the scanner to the conveyor. The second flow transfers the machined part directly from the lathe chuck to the conveyor without going through the 3d scanner. These alternative flows are conditioned by the frequency of dimensional control defined for this specific product. This parameter, controlled by the MES in the "production control" phase, can be fixed or varied depending on the evolution of dimensional deviations observed over time. The historization of dimensional deviations of machined parts from their CAD model is a real source of optimization to maintain production at an optimal rate. Indeed, the dynamic quality control makes it possible on the one hand to limit interruptions for adjustment and on the other hand to limit the number of parts rejected for dimensional and geometric non-conformities.

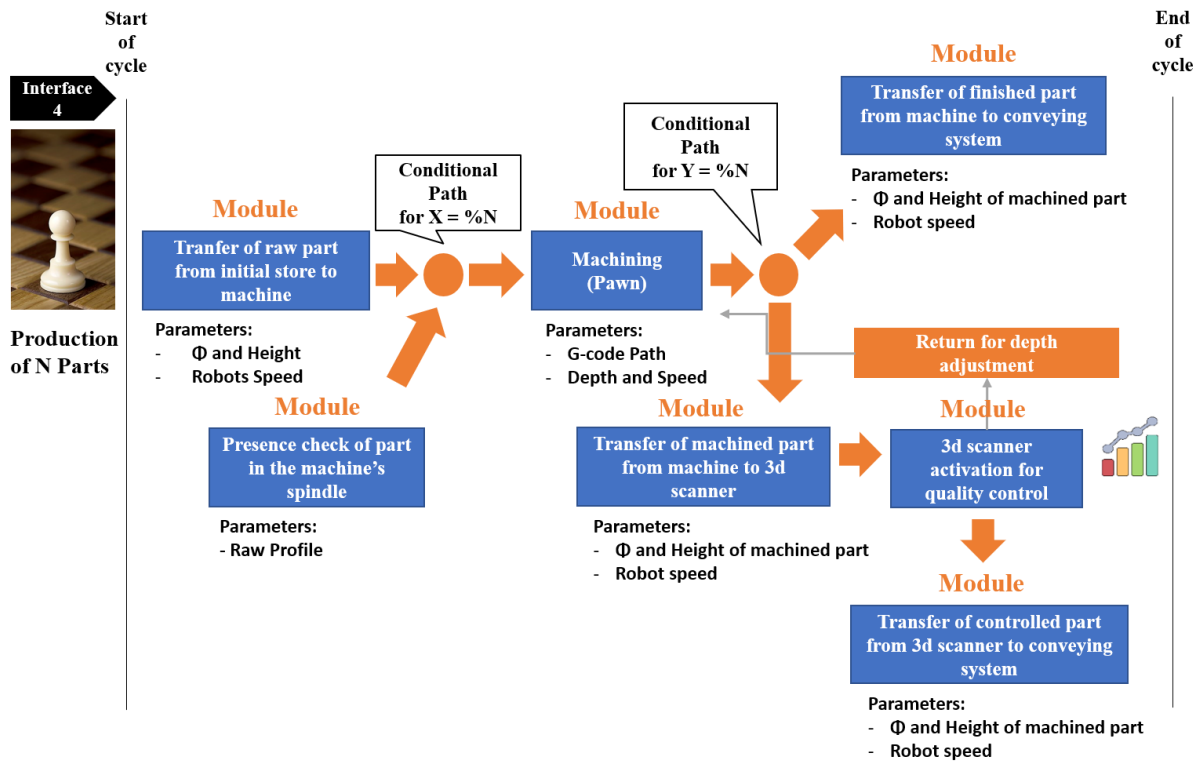


Fig. 40 Production Plan Example for A Chess Pawn

Finally, the control in real time of the operations and the scheduling are done through an HMI developed on Wonderware System Platform WSP. WSP software applications offer enhanced integration and provide a common and strategic industrial application services platform based ArchestrA real-time service-oriented architecture SOA technology. This integration provides a development environment for MES, SCADA, HMI, Historization, and other manufacturing service applications using a single, unified SOA software platform. These new unified software solutions are designed to help manufacturers reduce inventory costs and improve production order lead time for rapid responses to changes in demand, as well as increase the capacity of existing assets through improvements in asset utilization (“Wonderware enhances Operations and Performance Software,” 2008). **Fig. 41** presents the experimental HMI version to test the reliability of the production system. The tab presented in figure 41 is dedicated to the orchestration of the modules composing the production plan of the product.

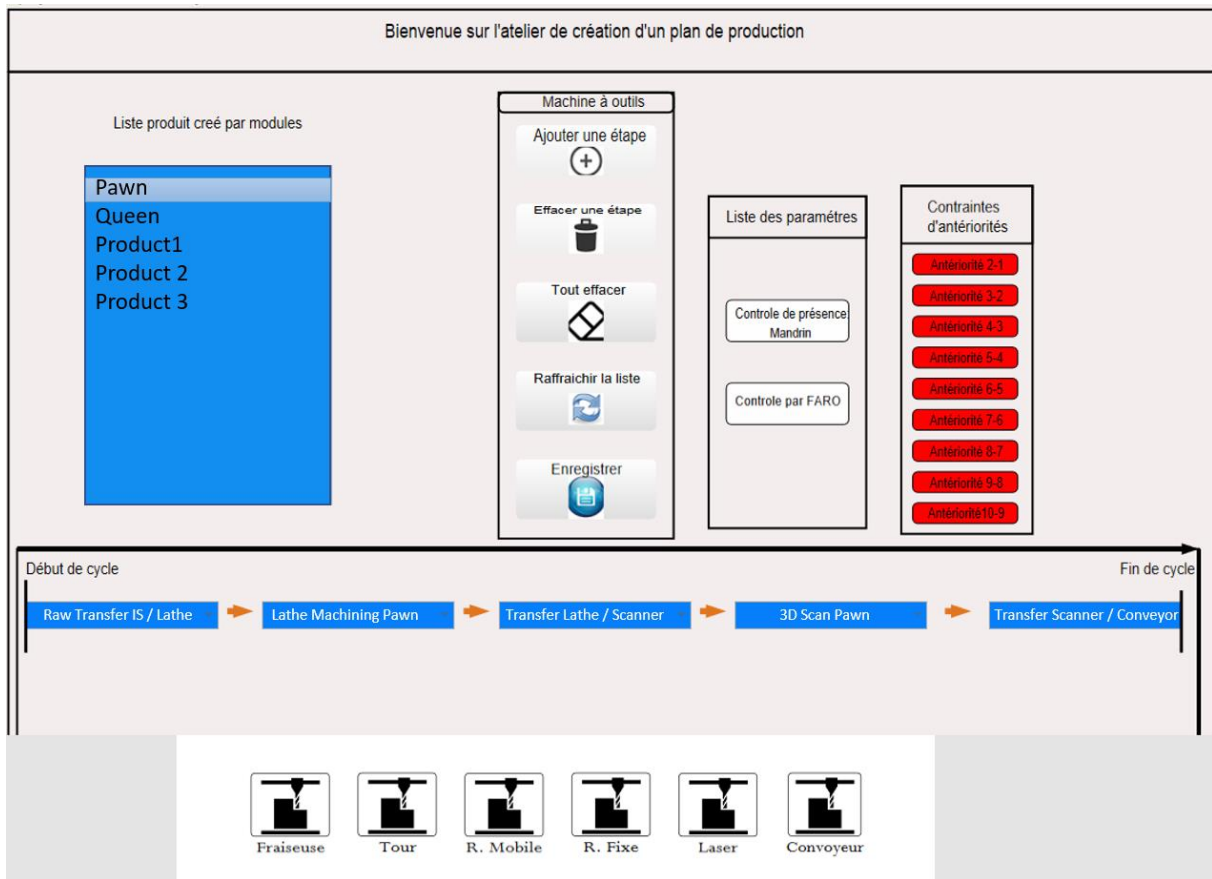


Fig. 41 Production HMI for the Industrial Platform 4.0

9.5.4 Production Process Planning

The production plans, selected and validated in the previous phase, will be loaded and positioned in priority execution order. The MES manages the synchronization of production plans with the capacity load of the platform. In our approach, synchronization is carried out at the modules level, bringing the operational flexibility to modular flexibility. In its preparation phase, the MES takes into account the load plan of each machine, scheduled shutdowns, stocks, initial scheduling, the availability of reference documents, the constitution of batches, etc. In its active phase, it takes into account the real-time balancing of flows, failures, measured deviations, contingencies, traceability and batch release, etc. To this end, the MES developed here will be endowed with a level of autonomy and must therefore be able to make decisions based on ascending data almost in real time. Thus, the execution of modules becomes dynamic and its updating depends on the one hand on the evolution of the situation in real time and on the other hand on the hazards encountered.

9.6 Additional Modules Integration

As mentioned in the section **9.2.4 Modular Service Integration**, two modules were integrated to the system in terms of demonstration of the deployed modular information system. We are focusing in this section on the integration process of two developed modules, along with explaining their functionalities

briefly since the development work will be conducted and continued by the PhD thesis of my colleague CHARRIER Quentin, working on the digitalization of the production processes.

9.6.1 Smart Visual Inspection System Module

The system given below in **Figure 42**, presents the contribution of an integrated module which figures in the successful implementation of a Machine Learning ML algorithm into an industrial production system, and the effectiveness of using ML to assure in real time visual inspection and rapid decision-making process. Thanks to the interoperability and modularity assured by the MES and the system architecture, the intelligence and the self-adoption of the manufacturing system is possible by adding smart CPSs and smart modules using machine learning and deep learning algorithms and techniques. The ML system runs on the processing machine and reports to the MES the processed data through the PLC using snap7 communication protocol or directly to the MES using an OPC UA communication server. The MES takes into consideration the received signals and information and acts properly by modifying the initial program and upgrading it as it should.

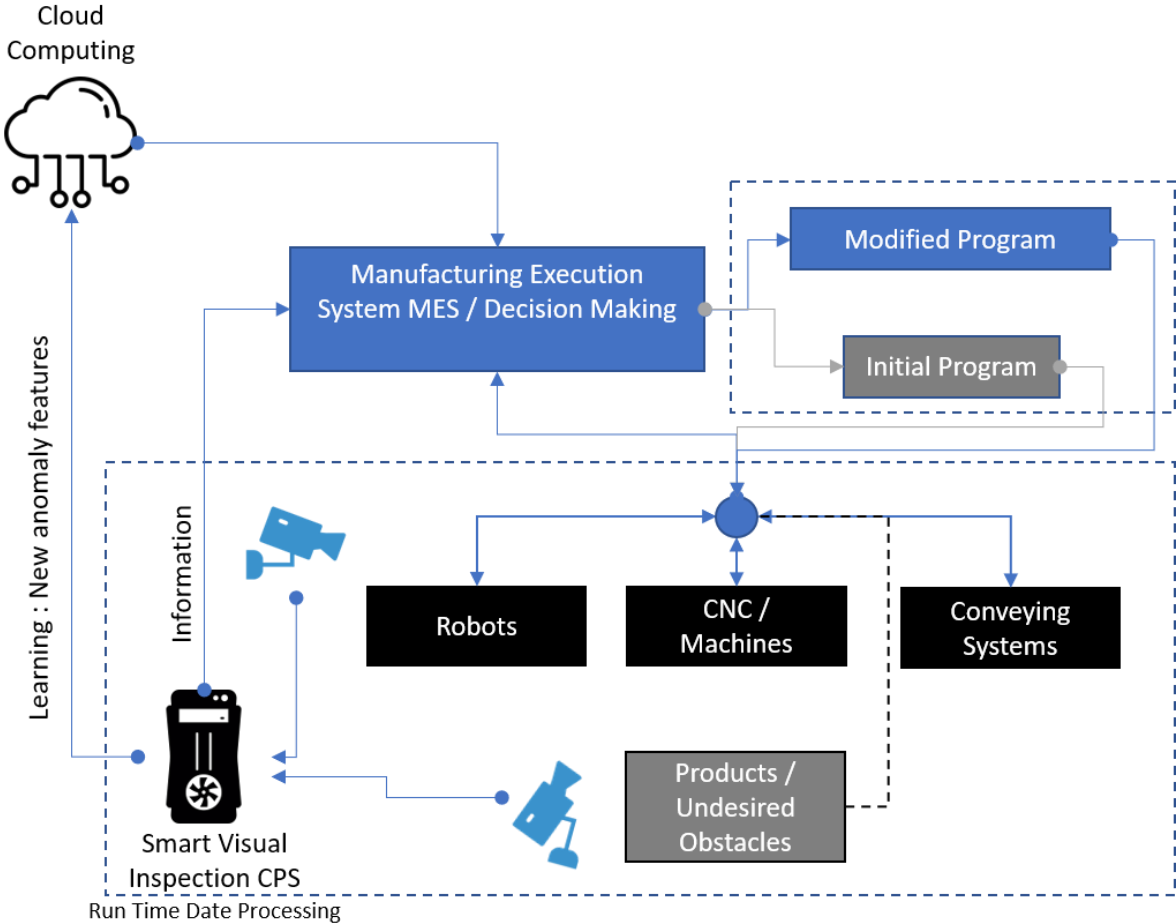


Fig. 42 Smart visual inspection model

This smart system could play a role in being an edge computing module, which reports unexpected and untrained data to the cloud in order to train the model for continuous data acquisition and analysis. This model can be used and developed in our ongoing project for several data processing tasks, providing valuable information regarding the predictive maintenance task, the quality control process, and the power consumption optimization.

To test our model, we chose a security application, since we are using two robots in our line **Figure 43**, we should not have any human presence inside the production line when it's functioning to avoid any accidents. So, to ensure security, the platform has a physical barrier and an access door that must be closed, preventing anyone from entering the interior when it is operating. However, if the door is closed and a person was present in the production facility or comes in through another unsecured access, no error is reported, and the person can be then in danger. To overcome this problem, we decided to conduct a smart visual inspection system which will detect the presence of the human within the production line using video streams.

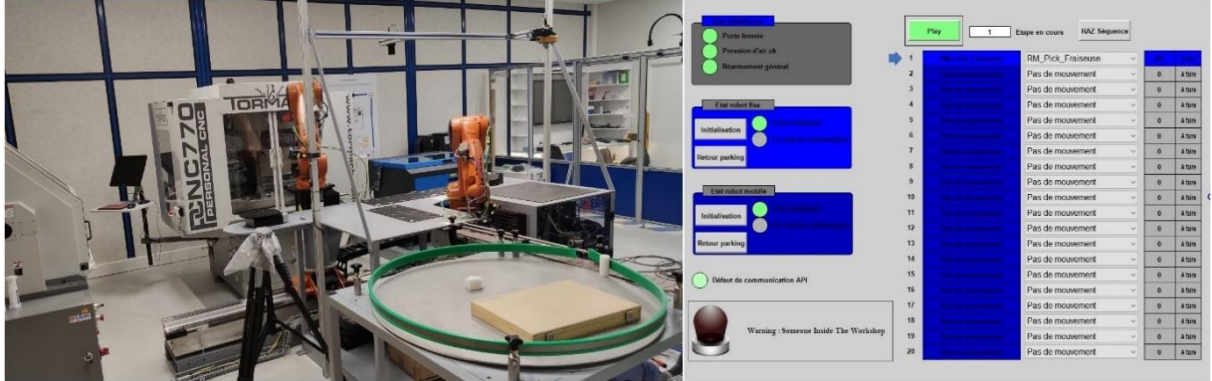


Fig. 43 Initial Program Running, No Person Detection

If a person is detected, the information will then be forwarded to the MES which will pause or reduce the speed of the robots and which will alert the operator who will be able to raise the alert after confirmation that no one is present in the line. The video streams are then fed back to this algorithm which will carry out the detection, and in case of detection of someone present will send the information back to the MES which will pass the line in safety mode **Figure 44** and will warn an operator who will have to raise this alert once the risk has passed.

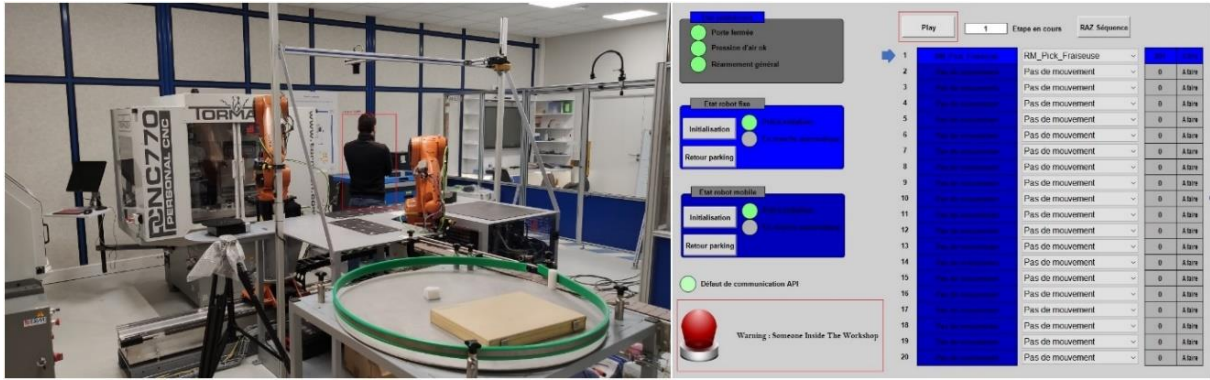


Fig. 44 Program Paused, Person Detection Inside the Platform

9.6.2 Digital Twin Application Module

A digital twin application module has been developed as well using Unity3D and integrated to the system. Thanks to the potential of the advanced simulation technologies and tools, 3D modelling of robots and machines were developed through KUKASim and exported to the Unity3D project. The digital twin application was configured in two modes: Monitoring mode and Simulation mode.

The monitoring mode presented in **Fig. 45** below, is a loosely coupled application module integrated to the system. The monitoring application collected real data from the WSP via its OPC UA server and visualize machines status and virtual functioning as well as products tracing and evolution following the production processes. The data flow via the WSP is bidirectional, orders can be sent back to the production system using the digital twin monitoring application and the production program can be launched from it. Other direct data exchange flows were superposed between robots and the digital twin application using WCF communication server for real time visualization of the robots movement evolution (Axis coordinates), facilitating as well the sharing of internal data base developed on the robots. This module helped us first experiencing different communication protocols in terms of real time data exchange. Second, the digital twin application is a well demonstrative module of creating a real time connected virtual replica of the production system. Finally, several functionalities are assured through this application from monitoring, real time inspection, and security enhancement since the application can follow the robots evolution and predict any collision before being occurred.

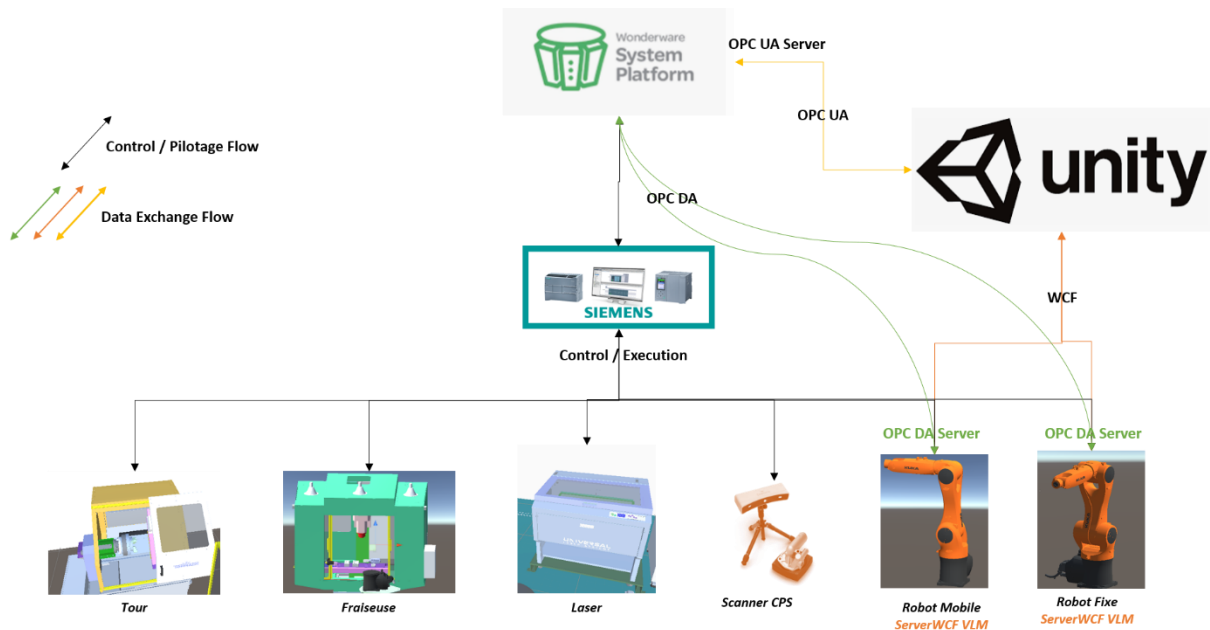


Fig. 45 Digital Twin Application, Monitoring Mode

The digital twin simulation mode is an offline working mode of the digital twin module which is connected directly to the robots virtual system at 0 velocity through Office Lite as shown in **Fig. 46**. The application is connected also to the WSP and it is able to simulate new robots trajectories before deploying them into the system operations. Moreover, it enables the production engineer to simulate the production program before getting deployed to the WSP, creating a potential added value concerning the industrialization phase by reducing development time and decreasing the deployment phase since the production program will be tested and commissioned virtually without causing a long period of disruption of the production.

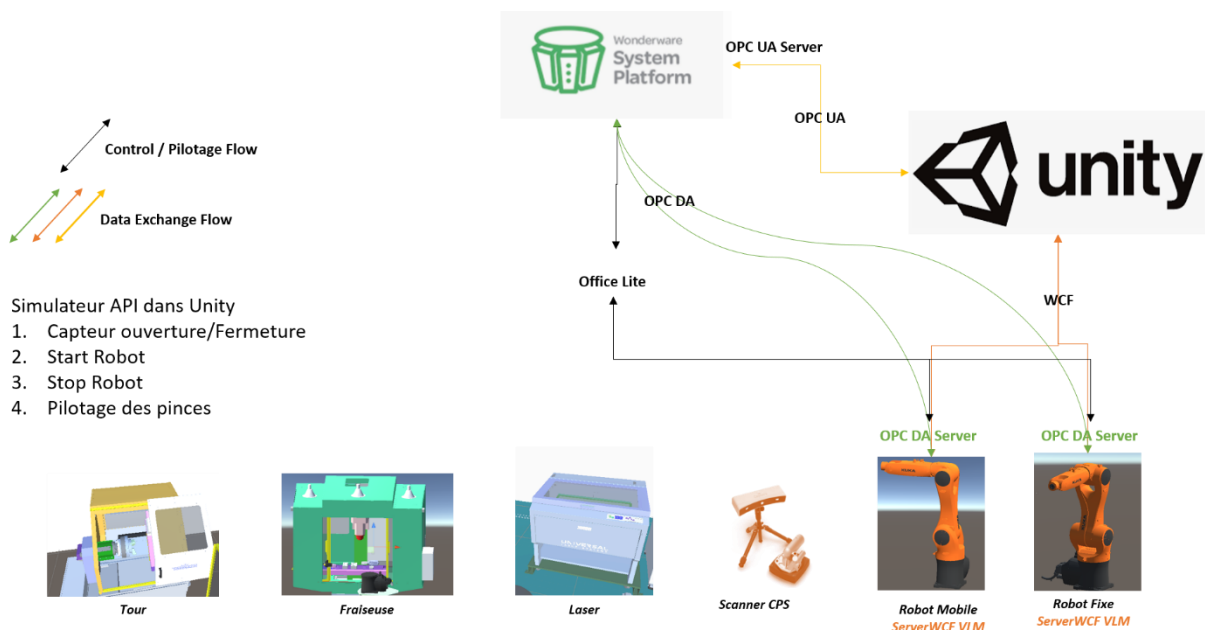


Fig. 46 Digital Twin Application, Simulation Mode

9.7 Implemented System Ontology and Data Flows

Before conducting a demonstrative application to validate the integration process in section 9.8, we aim to represent in the section the whole system using an ontology model figuring the implemented system as shown in Fig. 47. This figure represents the new holistic approach of the system architecture, considering each machine and application integrated to the system as a self-standing module having its own functionality and performing services across the whole system. This service can be a data processing service, or a production processing operation configured to be adapted in the overall system. First aspect highlighted through this model is the different functionalities of Industry 4.0 assured through the system development, starting from an enhanced flexibility concerning the processing dimension, an enhanced quality control well integrated to the system, the adaptability assured to different circumstances and unintended changes in the production, the intelligence implemented through the use of AI, and finally the customization enabled thanks to the system architecture and configuration. The second aspect highlighted is the diversity development axis and dimensions enabled through the deployed production system and the emergence of technological activities and research fields: robotics systems, computer vision, data mining, cloud computing, predictive maintenance, modular and flexible production information system, and digital integration. This diversity of fields drives us far to point out the mass of competencies required and needed to be developed in the context of production systems digitalization.

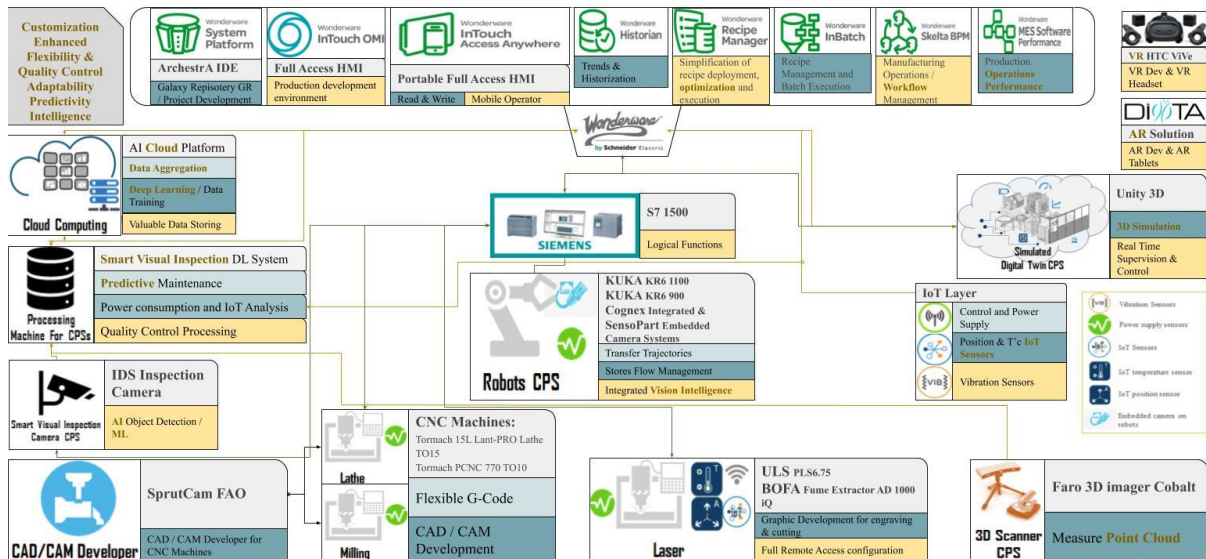


Fig. 47 Industrial Platform 4.0, Ontology Model

As discussed earlier, two key factors were identified in order to achieve the transition goal:

- A production system capable of adapting to new orders/products (under the factory capacity) and able to respond quickly to fluctuations in demand and workflow assuring the mass customization aspect.

- A production system capable of exploiting data collected from machines, sensors, failures, and historic data, in order to learn and self-optimize its production processes.

The first goal was presented well in the different sections of the experimentation chapter. At the end, it is imperative to present the contribution of this work regarding the data aggregation performed through the implementation process. For each data level **Fig. 48**, data type is identified, the source of data is presented, the relevance of data is pointed out by its signification, data lake and local migration is well identified, and finally the bridge to the cloud is identified along with a relevance recommendation proposed.

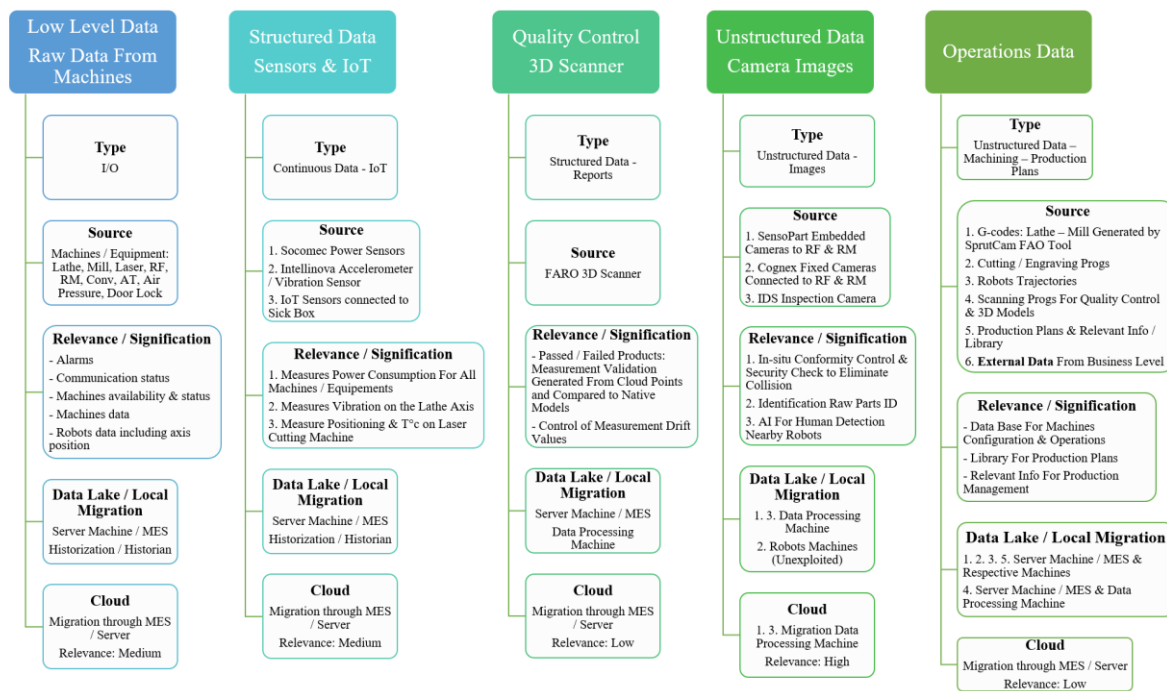


Fig. 48 Industrial Platform 4.0, Data Aggregation

As shown in **Fig. 48**, data collected from the platform is aggregated into different data type. Low level data considers the raw data from machines type I/O, collected from transfer and machining, serving as alarms, machines availability, machines status, and processing data. The structured data type includes both continuous data and IoT data collected from embedded sensors on machines, measuring power consumption, vibration on the lathe, temperature and plate positioning on the laser cutting machine, driven to the MES and historized for data processing. The quality control data includes structured scanning data and generated reports sent to the MES, evaluating dimensional and geometrical aspects of the produced parts and controlling measurement drift values. The processing of quality control is done on the processing machine where reports are generated and shared with the production program on the MES. The unstructured data including camera images collected from embedded cameras on the robots and the inspection camera are shared to the network, while images from fixed camera system are processed inside the robots system. The last data type taken into consideration is the operational data

including unstructured data, machining data such as Gcodes, and production plan data saved to the MES library as products data base along with external data from business level. This data type is considered as very relevant information and data base for production management. Finally, **Fig. 49** offers a separate representation of data flow for each data type.

Data Lake + Data Flow representation

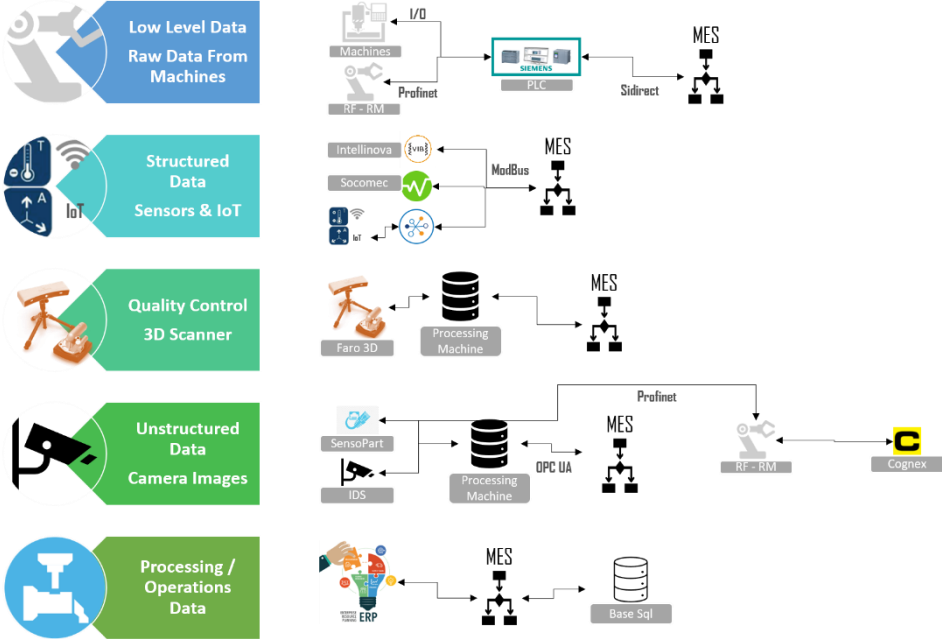


Fig. 49 Industrial Platform 4.0, Data Lake & Data Flow Architecture

9.8 Demonstrative Application

From the conceptual modelling of digital production systems, an Integration Framework has been proposed to augment the 4.0 platform with new functionalities such as flexibility, modularity, customization, decentralization, and portability. To this end, a new system architecture has been deployed at the platform. As part of this experimentation, a qualitative application is presented in this section which aims to validate the new functionalities of the production system. Among the various functionalities defined above, we mainly want to validate the flexibility of the production system as well as the lead-time yield for the industrialization phase and configuration of the production plan of a new product as well as the execution phase. The validation of the flexibility of the system will be based on a functional comparison of the current production system, close to 4.0, with the old 3.0 operating mode, by proposing a reference for quantitative assessment of the new performance.

Following the development of the experimental interface, a commissioning phase was held to verify the well-functioning of the flexible operations. Concerning the transfer functions, all possible combinations were tested in order to validate the secure and successful passage of the robots between all machines and production stages / zones. Regarding CNC machines, the flexible G-code is tested as well on both the lathe and the milling machine. The monitoring is confirmed through the ability to change the sub-program selection (from a list of 8 sub-G-code programs active on the machine) corresponding to a specific product.

In order to validate the proposed architecture and comparing it with the traditional approach, several tests were conducted by a group of interns and production engineering students. The aim of the conducted experimentations is to validate the simplicity of creating a new production plan for a new product along with the significant short-time consumed at the industrialisation phase to configure a new production plan. The 2nd objective is to validate the flexibility of the new architecture of our production system in comparison with the old architecture. For this, the experiments are conducted in two stages considering two scenarios. The 1st scenario concerns the definition of a new production plan for a pawn "A". The 2nd scenario concerns receiving a new order for a pawn "B" with a dimensional variant compared to the pawn "A", knowing that the grippers mounted on two (fixed and mobile) robots are identical and accept a diameter margin between 20 and 35 mm. Pawn "A" and Pawn "B" have the same base diameter of 25mm.

9.8.1 Phase 1

The experimentation is supported by a library module created on the HMI to guide the operator and assist him with basic information concerning different types of operations fulfilled with descriptions and annotations. A chess piece Pawn "A" has been identified to be produced by the platform in its new configuration. The production engineer uses the HMI to create a new product called Pawn A. The first step is to assign different transfer operations necessary for the robot to manipulate the part, as well as to select the appropriate parameters corresponding to the dimension of the raw part, knowing that all possible transfer operations are already defined, listed and well indexed on the HMI. All parameters configuration of transfer operations identified for Pawn A are similar for all trajectories, as follow:

- ID = 1001, the ID 1001 has been assigned to this Pawn A which designates product number 1 of series 1.
- $\varnothing = 25$, the diameter of Pawn A is 25 mm.
- H = 5, the height of the part gripping between the base of the clamp and the base of the part is 5 mm. This value also corresponds to the height of the grip when recovering the part from the lathe chuck, knowing that the chuck carries the part at 3 mm from its base.

- S = 15%, corresponding to 15% of the maximum speed of robots including linear and Point to Point (PtP) movements.

Regarding machining operations, the operator generates machining programs in the form of G-code corresponding to the product based on its 3D model through a CAM application. Created and indexed machining programs are imported to the HMI module of the MES and subsequently shared with CNC machines by updating the list of 8 active subroutines. Once the transfer functions and machining operations have been configured and assigned to the product, the operator generates functional modules grouping configured operations as explained previously. Next, the operator creates the production plan as shown in **Figure 45**, adding a set of modules presented by a list box, and orchestrating the generated modules based on the selected product. The last phase is to select the configured product in the production plan interface where the operator can add the required quantity of the product and execute the production.

9.8.2 Phase 2

The 2nd step is to create a new production plan for a Pawn “B”. Once the Pawn “A” production plan is properly configured, we now assume the arrival of a new order Pawn "B". The two requested pawns have the same geometric shape; however, Pawn B marks a height difference of +10 mm compared to Pawn A, see **Figure. 50**. The objective of choosing the same parts with different heights figures in the need of changing the associated production plan that we wish to investigate. This assessment demonstrates the ability of the system to respond to personalized customer requests. The height of Pawn A, X1 is 50 mm, while the height of Pawn B, X2 is 40 mm. Therefore, the height Y1 of the cylindrical base (its thickness) of the Pawn A is 8mm and that of the Pawn B is 6.5mm.

A new task of creating the production plan for Pawn B is required through the developed HMI. Transfer operations required for machining Pawn B are the same as those for Pawn A:

- RF_Pick_InitStore: corresponding to picking the raw part from the initial store by the fixed robot
- RF_Drop_TransStore: corresponding to placing the raw part in the transition store always by the fixed robot
- RM_Pick_TransStore: corresponding to picking the raw part from the transition store by the mobile robot
- RM_Drop_Lathe: corresponding to feeding the raw part into the chuck of the lathe
- RM_Pick_Lathe: corresponding to recover the machined part from the lathe chuck
- RM_Drop_TransStore: corresponding to returning the machined part to the transition store

- RF_Pick_TransStore: corresponding to picking the machined part by the fixed robot
- RF_Drop_Conv: corresponding to drop / place the machined / finished part on the finished products conveyor in his way to the accumulation table by the fixed robot

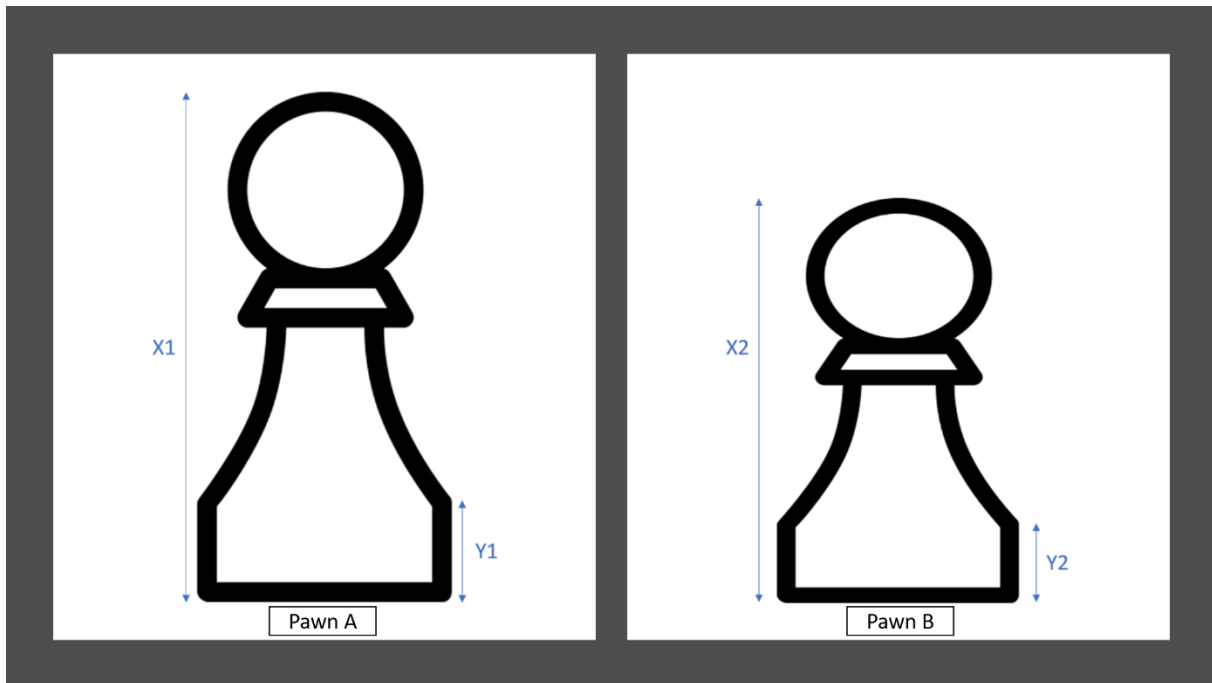


Fig. 50 Dimensional representation of Pawn A and Pawn B

However, the required changes to transfer operations can be found in the settings. Indeed, the diameter and the speed of robots remain identical to the Pawn A, while a new identifier of the Pawn B will be generated by the MES ($ID^2 = 2001$, part number 1 of the series number 2), and associated to this new product. However, a change in the grip height will be required specifically for the RM_Pick_Tour trajectory (ID^2 , \emptyset , H^2 , S) which recovers the Pawn B after being machined in the lathe. Since the chuck holds the part to a depth of 5 mm, the remaining dimension of the cylindrical base of the Pawn B will be 1.5 mm, which causes difficulty in gripping the part and a risk of the part falling into the machine. Consequently, the height of the grip for the trajectory RM_Pick_Tour will be readjusted to the value of 15 ($H^2 = 25$ mm), in order to recover the Pawn B by holding its body from the spherical profile at the top of the part. Subsequently, a second g-code will be generated by the CAM tool, imported to the MES and sent directly to the lathe updating the list of active machining programs on the machine. The Pawn B production plan will be created by assembling transfer and machining functional modules following the same logic of grouping basic operations as the Pawn A.

The last phase consists in selecting both configured products, Pawn A and Pawn B successively, in the production piloting interface. The production volume for this experiment is limited to one piece by product. The production was executed successfully according to the "initial" production plan corresponding to an automatic sequential execution.

9.8.3 Proposed measurement frame of reference for the quantitative assessment of the new performance

Indeed, the quantification for this type of project is difficult to achieve, especially when evaluating the integration work and the evolution of different layers of the production system. In order to quantify our contribution, we have proposed an estimated performance frame of reference to validate the functionalities of the production system. This estimated comparison reference mainly considers flexibility and lead-time performance for the industrialization and configuration phase of the production plan of a new product as well as the production execution phase. **Table 7** represents a measurement assessment proposed to be able to estimate the new performance of the production system of the 4.0 platform in terms of flexibility and lead-time efficiency by comparing the 4.0 architecture with the traditional 3.0 architecture.

The proposed measurement frame considers the evaluation of 2 main processes:

- Creation of the production plan for a new product
- The piloting / execution of production

The creation of a production plan for a product includes elements of measures that concern several tasks:

- The configuration of machining operations consists in generating g-codes associated with the product, which is required in both approaches. The estimated time required to perform this task corresponds to the CAM tool used in terms of simplicity and skills of the operator (estimated to one hour); while the possibility of parametrizing the machining program in the 4.0 approach has an advantage over the traditional approach. However, setting up machining programs in the 4.0 approach requires an additional task of encapsulating programs generated by the CAM tool according to a well-defined protocol. The additional time required to perform this configuration is estimated to 30 minutes.
- The configuration of transfer operations consists of generating robot trajectories associated with the manufacture of a new product, taking into account its dimensional specifications. This task is necessary to be carried out in the traditional approach, given the lack of possible parameterization of the trajectories, which requires additional costs considering the intervention of a roboticist and loss of time estimated to one working day. In the case of a flexible 4.0 workshop, trajectories are designed to serve a variety of products and are available with a flexible and parametric configuration which marks a significant advantage over the traditional approach in terms of time and cost.
- The configuration of functional modules as well as the orchestration of the production plan of a product and the overall production planning are grouped together in the 3rd task concerning the creation of the production plan. The configuration of this task is required in the traditional approach by creating logic functions and graficets associated to a product and carried out with passage conditions in terms of

settings. This task requires the need for the intervention of an automation engineer marking an additional cost and time estimated to one working day for the creation of new automatic production programs. In the new 4.0 architecture, it is adequate to perform these configurations through the dedicated production HMI without the need for additional development at the automatic layer and without any modification required for the PLC program.

Table. 7 Proposed measurement frame of reference for the evaluation of the new performance

Processus	Tasks	Sub-tasks	3.0	4.0	Measurment Units
Production Plan Configuration	Machining operations Configuration	Génération G-code / FAO	Yes	Yes	-
		Parameterization	No	Yes	-
		Estimation temps	1h	2h	Hour
	Transfer operations Configuration	Génération des trajectoires robots	Yes	No	-
		Parameterization	No	Yes	-
		Intervention of robotic technician	Yes	No	\$
		Estimated time	8h	1h	Hour
	Modules configuration Orchestration of production plan Production processes planning	Configuration	Yes (logic functions + Grafquets)	No	-
		Parameterization	Yes Conditions	Yes Parameters per product	-
		Intervention of automatic technician	Yes	No	\$
		Estimated time	8h	1h	Hour
	Execution	Machining	Remote access	50%	80%
Transfer functions		Remote access	50%	90%	%
Commissioning		Commissioning	Yes	No	-
		Estimated time	3h	2h	Hour
Execution		Remote execution	Yes	Yes	-
		Automatic successive execution	No	Yes	-
		Global optimisation possibility	50%	80%	-
Supervision & Tracing		Supervision	50%	99%	%
		Tracing	50%	99%	%

The piloting process includes other elements of measures that concern the production execution:

- Remote access to CNC machines and robots is limited to the automatic execution of machines estimated at a maximum accessibility rate of 50% in the traditional approach, while this rate rises to 80% - 90% for machines and robots respectively in the new interoperable approach. This estimation was based first of all on the possibility of parameterizing robot transfer functions and machining programs thanks to the new configuration of these machines, the possibility of selecting and executing a list of

programs exchanged remotely with machines, and the creation of an on-board robot database that manages product flows at the shop floor level of the platform and exchanges this information with the production system. From a functional point of view, the fact of evolving machine / robot configurations at the shop floor level towards a CPS configuration while solving the interoperability constraints as explained in section 9.2.1 has contributed to improving the functioning and the access level of machines.

- The commissioning task is pre-requisite for the execution of production in the case of the traditional approach to validate new automatic programs developed and verify the assignment of input / output variables. This task is estimated at half a day of additional work or even one full day versus one hour of general validation of machines operation in the new 4.0 approach.

- Automatic execution is possible for both approaches, but automatic successive execution of several products is not allowed in the traditional approach. Actually, in the traditional approach a manual deployment of PLC programs product by product is needed. Furthermore, the possibility of global optimization of production processes marks a difference as well for the 4.0 approach estimated at a minimum of 80% thanks to the generation of data and the possibility of processing it.

- Production supervision and product traceability are estimated to 99% in the 4.0 mode against 50% in the traditional approach, thanks to the integration of the MES and the exchange of data generated from various workstations during production.

9.8.4 Analysis and discussion of results

The traditional approach of configuring a production plan for a new product consists of creating all correspondent machining and transfer operations (and sometimes from scratch) required to manufacture the product. Afterward, a technical or a control engineer is needed to assign first logical functions to configured operations and consequently create a new control program and deploy it to the PLC controller, followed by a commissioning phase.

Considering the phase 1 of the application carried out, the simplicity of various tasks and sub-tasks, measured in the repository, of the creation and configuration of a new production plan has been well validated. Indeed, the realization of a new production plan based on the traditional architecture of the platform requires first the development of a new program at the PLC level in the form of a Grafcet which deploys various machining and robotic transfer functions, associated with a well-defined product. A commissioning phase will always be required in order to verify the assignments of logical variables corresponding to different operations, and to verify the operating of new configured processes.

The 2nd phase of the application validates once again the simplicity and speed of creating a new production plan. Henceforth, it highlighted the flexibility of the new configuration of the production system at the Planning / monitoring level as well as at the shop floor level. By carrying out the same

scenario on two products Pawn A and Pawn B with the old traditional approach, three technical dimensions were added. The 1st dimension concerns the constraint resulting from the need to recover the machined part at a specific gripping height for the Pawn B, which is different from the configured one. This constraint required two technical tasks in the traditional configuration of the platform. The 1st technical task required is the creation of a new specific trajectory to recover this product from the lathe which takes the same movements of the basic trajectory but changing the point of arrival on the machine chuck in Z axis. The second technical task concerns the assignment of a new cycle code to this trajectory and its deployment by creating a new logical function to be implemented in the grafcet corresponding to this product. This difficulty was dealt in the new platform architecture with configuring the parameters of robotic transfer functions. The second technical dimension concerns the need to activate a new g-code machining program on the lathe. Loading the new g-code into the machine was manual, as was its selection. This constraint was resolved thanks to the interoperability deployed at the platform level which facilitated the exchange between the MES and various machines. The 3rd dimension considers the advanced role of MES in the planning and management of the production of a variety of products. Always comparing the application carried out with the old approach, it was necessary to launch the 1st production program of Pawn A which figures in the PLC program, then deploy the 2nd production program of Pawn B at the PLC level and simultaneously launch the production cycle of the 2nd product. The fact that marks an increased flexibility in the new architecture and a considerable level of monitoring in terms of autonomy.

Transfer functions are well configured, and the flexible design of this production system has performed well, giving the operator the ability to easily drive the production plan in various configurations and combinations through a simple HMI without any additional coding or technical effort required as shown in the measurement reference. Three main functional dimensions are worth mentioning in terms of comparing the new approach with the traditional approach. Mainly technical skills, including the "complexity" dimension and the "time saving in the industrialization phase" dimension. Considering the 1st dimension, the operator or the production engineer does not need to have specific skills in control, robotics and other technical fields for the generation of a new production plan, thus reducing the costs of the intervention of external integrators. The time saving is ensured by reducing the configuration time required for the industrialization phase and production execution with an estimation of 14 hours less. Thus, the reduction in time achieved is also linked to minimizing the need for a commissioning phase since the new approach is flexible and designed upstream to manage a variety of products taking into account machine capacities. The third dimension focuses on the flexibility of the evolved production system. This flexibility deployed in the system is due to the integration of the Framework and the evolution of different layers of our production system including the shop floor layer but also the control, management, and planning layers.

The experimentation presented in this section shows that the MES plays an important role in intelligent manufacturing processes, and also demonstrates that the notion of operational flexibility must be taken into account in the design phase of the advanced production system, especially when working in a more complex manufacturing system equipped by more machines, devices and sensors. The framework proposed has shown the relevance of our methodological choices and our research orientation. The perspective in terms of development consists in developing the autonomy of the “management” function as well as deploying multi-criteria production optimization algorithms.

10. Results & General Discussion

The vertical integration taken into consideration at the modelling level along with essential modelling concepts drive us far at the experimentation phase by applying the proposed framework at a wide range including different levels of the production system. The integration done based on the framework has led us to study and develop a novel approach at the configuration level of the new production system to be deployed. This configuration based on the flexibility and the modularity assured through the new system architecture contributed to different opened opportunities considering the production system organisation, process planning and enhanced modules integration, along with an advanced deployment of the implanted technologies.

The work carried out during this PhD thesis is a new approach allowing increased flexibility of a production system. This allows us to easily control the manufacturing of various products through an HMI rather than reprogramming the industrial controllers which is normally required to enable a new product manufacturing process. The contribution of this thesis lies first in the successful integration of the production system based on the proposed model and the developed Framework. Second, the development of a flexible and modular approach is achieved, based on several advanced technologies such as advanced robotics, embedded camera systems and flexible machine tools, as well as the implementation of a new control architecture which consists of upgrading the decision-making process to an advanced and interoperable MES system. The operation of our architecture has been successfully tested. Despite interoperability challenges, we have succeeded in developing an automated modular and flexible production system capable of manufacturing a wide range of products from the same raw materials.

Following the development of the experimental interface, all possible combinations were tested, in order to validate the secure and successful passage between all machines and production stages. The paths are well configured, and the modular design of this production system worked very well, giving the operator the opportunity to drive the production plan in various configuration and combination easily through a simple HMI without the need for any additive coding or technical effort. This validates an interesting revenue concerning the industrialization phase with a remarkable reduced time set to integrate a new product to the production system.

The proposed novel model for a smart visual system well integrated into the manufacturing execution system as well as the digital twin module contribute to improve the production system. This integration is a concrete contribution in terms of the modular information system that can be used for several applications and cases and assure the optimization of the production process and control. These modules give us wide opportunities to develop different parallel modules for data and image processing and integrate them into the manufacturing system in order to enhance and well optimize the whole

production process. Finally, the data dimension is well considered by the development phase. The data management integration in parallel with the new flexible configuration of the platform enable the potential of a continuous self-optimisation of production processes through the data processing and mining to be implemented.

Furthermore, and based on the developed methodology, the proposed architecture can be applied to other manufacturing system with specific requirements involving controllable and programmable robots playing transfer functions. The specific requirements abovementioned concerns first the degree of flexibility of machines at the shop floor and its ability to perform multiple operations from a limited number of resources. Machines flexibility requires at least solving issues such as interoperability, accessibility or remote access to machines, and enabling flexible configuration of the machining process in terms of dimensional capability to carry out a margin of parts, and in terms of parametrization. Second, a special attention should be paid to the configuration of logical functions at the API layer taking into consideration the operational flexibility of machines. Third, the digital MES platform developed or adapted to play the role of Production Planning and Control PPC system must handle new challenges created by Industry 4.0. MES needs to become logically decentralized and composed of decoupled objects or service applications with an external service responsible for the coupling of connected machines and CPS. Lastly, it is worth mentioning that applying the proposed design methodology should be driven by a new configuration insight of the shop floor taking into consideration the flexibility deployed and the expected patterns from the production system. We believe that our work is a foundation that can be deployed at the levels of manufacturing companies, especially for small and medium enterprises, where operational flexibility plays an important role in an ever-changing market.

In terms of limitations, we distinguish two axes: scientific research limitations and technical limitations considering the development and experimental work. Regarding research limitations, specific attention to the principle of multi-agent systems could enrich this research thesis. On the other hand, the definition of the required skills for the digitization of manufacturing systems as well as identifying jobs evolution in the context of Industry 4.0 could improve this work. Regarding the experimental limitations, it should be mentioned at the very beginning that the realization of the integration work and the deployment of the new architecture is a main challenge in terms of integration project management. Generating a roadmap from this experimental approach could be appreciated.

Conclusion & perspective

Future manufacturing systems need to be more flexible and intelligent in order to embrace customer and market demands. Industry 4.0 is a promised industrial revolution, taking the industrial world to an advanced level of product mass customization, and enabling a high level of digital manufacturing facilities. To well manage the targeted transition, several stages of development are required, innovative technologies are to be integrated, and the company has to deal with a wide area of challenges affecting different component of the company's structure. The main challenge is how to guide companies among the evolution from Industry 3.0 to 4.0. The aim of this PhD thesis is to propose a transition framework based on an appropriate model to help companies achieve a successful digital transformation and integration **Fig. 51**. This Framework takes into consideration three main axes **Production System including Shop Floor Control System SFCS, Machines & Advanced Techs, and Data Processing & Deployment**.

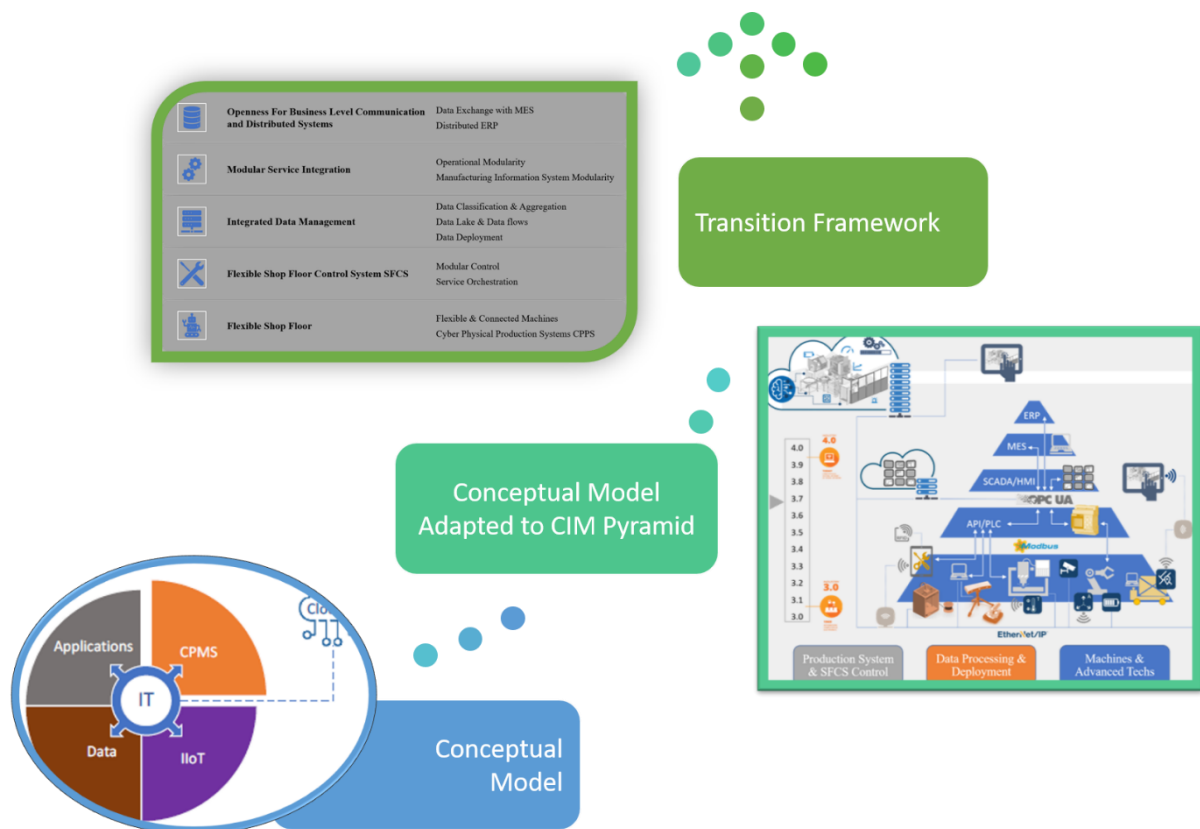


Fig. 51 Scientific contribution of this PhD thesis

In this thesis, the state of the art of Industry 4.0 is well discovered. Industry 4.0 definition and concept is presented, as well as its changes and benefits affecting the manufacturing sector. The axes of research are well stated, and a summary of Industry 4.0 technology trends, principles and functionalities is

delivered. In addition, the existing integration models were presented, and the challenges facing companies in the digitalization of their manufacturing systems are well discussed in order to answer our central research problematic: **which model for a successful digital transition of 4.0 manufacturing systems?**

In result, the PhD hypothesis is identified as **Evolving production systems towards Industry 4.0 requires acting on three main axes Production System including Shop Floor Control System SFCS, Machines & Advanced Techs, and Data Processing & Deployment.**

This proposal is based on a deep literature study and related challenges and problematics regarding our research direction and topic. Therefore, a novel conceptual model is introduced and explained. The proposed model is then deployed to an existing conventional production system in order to identify the evolutions required and to define consequently the transition framework regarding the actions needed to be taken for the digital integration goal. A design principles framework along with a novel integration architecture toward the digital manufacturing transition is introduced. The proposed framework contributes to considering the different layer of the production system of an enterprise and recommends novel and advanced modification in order to assure a robust evolution towards the digitalization of the manufacturing system. This framework is well applied to an existing traditional architecture implemented to the industrial platform 4.0.

Finally, a demonstrative application was carried out at the industrial platform 4.0 of the Arts et Métiers, in order to validate the new architecture of the production system assuring the digital transition to Industry 4.0. This architecture has allowed the emergence of new advanced functionalities such as flexibility, and lead-time performance.

Several further research and development trends are identified as perspectives. Based on the above-mentioned development, we believe the production system configuration regarding the process planning must be taken into consideration with the evolved flexible system. The production planning configuration is a separate field of research and development, and a special attention should be paid on it in the context of Industry 4.0. Process planning in the digitalized production system is a crucial trend and has a strong connection with Lean 4.0 especially when considering the smart logistics aspects.

Additionally, further development will focus on the optimisation opportunities enabled by the system considering time, cost and power consumption criterion through embedded sensors already mounted on the machines. The data mining dimension and the possibility of having a continuous self-optimisation of the production processes through the data processing enabled thanks to the flexible production system is critical to benefit from the digitalization of the manufacturing processes and to value the aimed performance of the 4.0 integration.

Finally, it is necessary to express the need for a multidisciplinary approach in projects of this type. The transition to Industry 4.0 is the paradigm of the intersection of multiple areas of engineering expertise and competencies. Capitalizing on the knowledge and the required competencies of each of these areas to transform the industry is, in our opinion, one of the major issues.

References

- Adjoul, O., Benfriha, K., Aoussat, A., 2019. Algorithmic strategy for optimizing product design considering the production costs. *Int J Interact Des Manuf* 13, 1313–1329. <https://doi.org/10.1007/s12008-019-00571-w>
- Bajic, B., Cosic, I., Lazarevic, M., Sremcevic, N., Rikalovic, A., 2018. Machine Learning Techniques for Smart Manufacturing: Applications and Challenges in Industry 4.0 11.
- Beckhoff Automation GmbH & Co KG, 2021. TwinCAT | Automation software | Beckhoff France [WWW Document]. Beckhoff Automation. URL <https://www.beckhoff.com/fr-fr/products/automation/twincat/> (accessed 1.24.21).
- Belvedere, V., Grando, A., Bielli, P., 2013. A quantitative investigation of the role of information and communication technologies in the implementation of a product-service system. *International Journal of Production Research* 51, 410–426. <https://doi.org/10.1080/00207543.2011.648278>
- Benfriha, K., 2020. Conception, Modélisation, Architecture, Technologie et Pédagogique (Mémoire HDR). ENSAM Paris.
- Bloch, H., Fay, A., Knohl, T., Hoernicke, M., Bernshausen, J., Hensel, S., Hahn, A., Urbas, L., 2017. A microservice-based architecture approach for the automation of modular process plants, in: 2017 22nd IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFa). Presented at the 2017 22nd IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFa), IEEE, Limassol, pp. 1–8. <https://doi.org/10.1109/ETFa.2017.8247573>
- Bloch, H., Grebner, T., Fay, A., Hensel, S., Menschner, A., Urbas, L., Hoernicke, M., Knohl, T., Bernshausen, J., Ag, B., 2018a. Orchestration of Services in Modular Process Plants, in: IECON 2018 - 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Presented at the IECON 2018 - 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, IEEE, D.C., DC, USA, pp. 2935–2940. <https://doi.org/10.1109/IECON.2018.8591300>
- Bloch, H., Hensel, S., Hoernicke, M., Stark, K., Menschner (né Hahn), A., Fay, A., Urbas, L., Knohl, T., Bernshausen, J., 2018b. State-based control of process services within modular process plants. *Procedia CIRP* 72, 1088–1093. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.03.037>
- Block, C., Lins, D., Kuhlenkötter, B., 2018. Approach for a simulation-based and event-driven production planning and control in decentralized manufacturing execution systems. *Procedia CIRP* 72, 1351–1356. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.03.204>
- Bodrow, W., 2017. Impact of Industry 4.0 in service oriented firm. *Adv. Manuf.* 5, 394–400. <https://doi.org/10.1007/s40436-017-0196-3>

- Bonnard, R., Vieira, K.M.M., Arantes, M.D.S., Lorbieski, R., Nunes, C., Mattei, A.P., 2019. A BIG DATA / ANALYTICS PLATFORM FOR INDUSTRY 4.0 IMPLEMENTATION IN SMES 10.
- Borangiu, T., Trentesaux, D., Thomas, A., Leitão, P., Barata, J., 2019. Digital transformation of manufacturing through cloud services and resource virtualization. *Computers in Industry* 108, 150–162. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2019.01.006>
- Carvalho, N., Chaim, O., Cazarini, E., Gerolamo, M., 2018. Manufacturing in the fourth industrial revolution: A positive prospect in Sustainable Manufacturing. *Procedia Manufacturing* 21, 671–678. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.02.170>
- Chen, H., 2017. Theoretical foundations for cyber-physical systems: a literature review. *Journal of Industrial Integration and Management*, 2(03), 1750013.
- Connectivity IML Magazine, 2019. Preparing Manufacturing Systems for Industry 4.0 [WWW Document]. URL <http://www.connectivity4ir.co.uk/article/167720/Preparing-Manufacturing-Systems-for-Industry-4-0.aspx> (accessed 1.31.20).
- 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>
- de Man, J.C., Strandhagen, J.O., 2017. An Industry 4.0 Research Agenda for Sustainable Business Models. *Procedia CIRP* 6.
- De Pace, F., Manuri, F., Sanna, A., 2018. Augmented Reality in Industry 4.0 6.
- de Sousa Jabbour, A.B.L., Jabbour, C.J.C., Foropon, C., Godinho Filho, M., 2018. When titans meet, can industry 4.0 revolutionise the environmentally-sustainable manufacturing wave? the role of critical success factors. *Technological Forecasting and Social Change*, 132:18{25.
- Derbel, N., GHOMMAM, J., ZHU, Q. (ed.), 2019. *New Developments and Advances in Robot Control*. Springer Singapore.
- Dilberoglu, U.M., 2017. The Role of Additive Manufacturing in the Era of Industry 4.0. *Procedia Manufacturing* 10.
- Duckworth, N., 2019. Industry 4.0: Why Manufacturers Need to Keep Their Eye on the Long Game [WWW Document]. *Manufacturing Business Technology*. URL <https://www.mbtmag.com/business-intelligence/article/13251875/industry-40-why-manufacturers-need-to-keep-their-eye-on-the-long-game> (accessed 2.25.21).
- El Zant, C., Charrier, Q., Benfriha, K., Le Men, P., 2021. Enhanced Manufacturing Execution System “MES” Through a Smart Vision System, in: Roucoules, L., Paredes, M., Eynard, B., Morer Camo, P., Rizzi, C. (Eds.), *Advances on Mechanics, Design Engineering and Manufacturing III, Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer International Publishing, Cham, pp. 329–334. https://doi.org/10.1007/978-3-030-70566-4_52

- ElMaraghy, H.A., 2005. Flexible and reconfigurable manufacturing systems paradigms. *Int J Flex Manuf Syst* 17, 261–276. <https://doi.org/10.1007/s10696-006-9028-7>
- Erol, S., Schumacher, A., 2016. Strategic guidance towards Industry 4.0 – a three stage process model 8.
- Esmailian, B., Behdad, S., Wang, B., 2016. The evolution and future of manufacturing: A review. *Journal of Manufacturing Systems* 39, 79–100. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2016.03.001>
- Fan, W., Zheng, L., Ji, W., Xu, X., Wang, L., Lu, Y., Zhao, X., 2020. Function block-based closed-loop adaptive machining for assembly interfaces of large- scale aircraft components. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 66: 101994.
- Feng, S., Li, L.X., Cen, L., 2001. An object-oriented intelligent design tool to aid the design of manufacturing systems. *Knowledge-based systems*, 14(5-6), 225-232.
- Foresight, U., 2013. The future of manufacturing: a new era of opportunity and challenge for the UK - summary report 54.
- Fragapane, G., Ivanov, D., Peron, M., Sgarbossa, F., Strandhagen, J.O., 2020. Increasing flexibility and productivity in Industry 4.0 production networks with autonomous mobile robots and smart intralogistics. *Ann Oper Res*. <https://doi.org/10.1007/s10479-020-03526-7>
- 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>
- Geissbauer, R., Lübben, E., Schrauf, S., Pillsbury, S., 2018. Global Digital Operations Study 2018. Digital Champions. How industry leaders build integrated operations ecosystems to deliver end-to-end customer solutions.
- Ghobakhloo, M., 2018. The future of manufacturing industry: a strategic roadmap toward Industry 4.0. *Jnl of Manu Tech Mngmnt* 29, 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>
- Gorecky, D., Weyer, S., Hennecke, A., Zühlke, D., 2016. Design and Instantiation of a Modular System Architecture for Smart Factories. *IFAC-PapersOnLine* 49, 79–84. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.12.165>
- Gupta, S., 2018. Artificial Intelligence for Enterprise Networks, in: *Artificial Intelligence for Autonomous Networks*. Chapman and Hall/CRC, pp. 263–284. <https://doi.org/10.1201/9781351130165-11>
- Gürdür, D., El-Khoury, J., Seceleanu, T., Lednicki, L., 2016. Making interoperability visible: Data visualization of cyber-physical systems development tool chains. *Journal of industrial information integration*, 4, 26-34.

- Hartwell, R.M., 2017. *The Causes of the Industrial Revolution: An Essay in Methodology* 20.
- Henning, K., Wolfgang, W., Johannes, H., 2013. Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0. Final report of the Industrie, 4, 82.
- Hermann, M., Pentek, T., Otto, B., 2016. Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios, in: 2016 49th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS). Presented at the 2016 49th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS), IEEE, Koloa, HI, USA, pp. 3928–3937. <https://doi.org/10.1109/HICSS.2016.488>
- Horst, D.J., Duvoisin, C.A., de Almeida Vieira, R., 2018. Additive manufacturing at Industry 4.0: a review. *International journal of engineering and technical research*, 8(8).
- Ibarra, D., Ganzarain, J., Igartua, J.I., 2018. Business model innovation through Industry 4.0: A review. *Procedia Manufacturing* 22, 4–10. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.03.002>
- Information and communications technology, 2021. . Wikipedia.
- Islam, M.M., Kim, J.M., 2019. Automated bearing fault diagnosis scheme using 2D representation of wavelet packet transform and deep convolutional neural network. *Computers in Industry*, 106, 142-153.
- Jakl, A., Schoffer, L., Husinsky, M., Wagner, M., 2018. *Augmented Reality for Industry 4.0: Architecture and User Experience* 5.
- Jasperneite, J., 2012. Was hinter Begriffen wie Industrie 4.0 steckt. *Computer & Automation*, 19.
- Joost, D., Sutherland, J.W., Dornfeld, D.A., Herrmann, C., Jeswiet, J., Kara, S., Hauschild, M.Z., Kellens, K., 2012. Towards energy and resource efficient manufacturing: A processes and systems approach. *CIRP Annals*, vol. 61(2), pp. 587-609.
- Jung, J.Y., 2002. Manufacturing cost estimation for machined parts based on manufacturing features. *Journal of Intelligent Manufacturing*, vol. 13(4), pp. 227-238.
- Kagermann, H., Wahlster, W., Helbig, J., 2013. Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0 (No. 1).
- Kamble, S.S., Gunasekaran, A., Gawankar, S.A., 2018. Sustainable Industry 4.0 framework: A systematic literature review identifying the current trends and future perspectives. *Process Safety and Environmental Protection* 117, 408–425. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.05.009>
- Kang, H.S., Lee, J.Y., Choi, S., Kim, H., Park, J.H., Son, J.Y., Kim, B.H., Noh, S.D., 2016. Smart manufacturing: Past research, present findings, and future directions. *Int. J. of Precis. Eng. and Manuf.-Green Tech.* 3, 111–128. <https://doi.org/10.1007/s40684-016-0015-5>
- Karnouskos, S., Colombo, A.W., Jammes, F., Delsing, J., Bangemann, T., 2010. Towards an architecture for service-oriented process monitoring and control, in: *IECON 2010 - 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*. Presented at the *IECON 2010 - 36th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics*, IEEE, Glendale, AZ, USA, pp. 1385–1391. <https://doi.org/10.1109/IECON.2010.5675482>

- Kaschel C., H., Y Bernal, L.M.S., 2006. Importance of Flexibility in Manufacturing Systems. *INT J COMPUT COMMUN* 1, 53. <https://doi.org/10.15837/ijccc.2006.2.2285>
- Kaushal, A., Vardhan, A., Rajput, R.S., 2016. Flexible Manufacturing System A Modern Approach To Manufacturing Technology 8.
- Kaynak, O., 2007. The exhilarating journey from industrial electronics to industrial informatics. Presented at the 2007 2nd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (pp. xli-xlii). IEEE.
- Kennedy, S., 2015. Made in China 2025. Centre for Strategic and International Studies.
- Khan, W.Z., Rehman, M.H., Zangoti, H.M., Afzal, M.K., Armi, N., Salah, K., 2020. Industrial internet of things: Recent advances, enabling technologies and open challenges. *Computers & Electrical Engineering*, 81, 106522.
- Kim, D.-Y., Park, J.-W., Baek, S., Park, K.-B., Kim, H.-R., Park, J.-I., Kim, H.-S., Kim, B.-B., Oh, H.-Y., Namgung, K., Baek, W., 2020. A modular factory testbed for the rapid reconfiguration of manufacturing systems. *J Intell Manuf* 31, 661–680. <https://doi.org/10.1007/s10845-019-01471-2>
- Kumar, A., 2007. From mass customization to mass personalization: a strategic transformation. *Int J Flex Manuf Syst* 19, 533–547. <https://doi.org/10.1007/s10696-008-9048-6>
- Kumar, K., Zindani, D., Davim, J.P., 2019. Process Planning in Era 4.0, in: *Industry 4.0, SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology*. Springer Singapore, Singapore, pp. 19–26. https://doi.org/10.1007/978-981-13-8165-2_2
- Lasi, H., Fettke, P., Kemper, H.G., Feld, T., Hoffmann, M., 2014. Industry 4.0. *Business & information systems engineering*, 6(4), 239-242.
- Lee, J., Davari, H., Singh, J., Pandhare, V., 2018. Industrial Artificial Intelligence for industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters* 18, 20–23. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2018.09.002>
- Li, Z., Wang, Y., Wang, K.-S., 2017. Intelligent predictive maintenance for fault diagnosis and prognosis in machine centers: Industry 4.0 scenario. *Adv. Manuf.* 5, 377–387. <https://doi.org/10.1007/s40436-017-0203-8>
- Liao, Y., Deschamps, F., Loures, E. de 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, 3609–3629. <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1308576>
- Lin, Y., Lan, C.-B., Huang, C.-Y., 2019. A Realization of Cyber-Physical Manufacturing Control System Through Industrial Internet of Things. *Procedia Manufacturing* 39, 287–293. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.01.449>
- Lina, Y.J., Lana, C.B., Huang, C.Y., 2019. A Realization of Cyber-Physical Manufacturing Control System Through Industrial Internet of Things Through Industrial Internet of Things. Presented

- at the 25th International Conference on Production Research Manufacturing Innovation: Cyber Physical Manufacturing Cyber Physical Manufacturing, Chicago, Illinois (USA).
- Mabkhot, M., Al-Ahmari, A., Salah, B., Alkhalefah, H., 2018. Requirements of the Smart Factory System: A Survey and Perspective. *Machines* 6, 23. <https://doi.org/10.3390/machines6020023>
- Man, J.C. de, Strandhagen, J.O., 2017. An Industry 4.0 Research Agenda for Sustainable Business Models. *Procedia CIRP* 63, 721–726. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.03.315>
- Mazars and OpinionWay, 2018. Les dirigeants face à l'Industrie 4.0 [WWW Document]. Mazars.fr. URL <https://online.mazars.fr/industrie-40> (accessed 3.5.20).
- Mekni, M., Lemieux, A., 2014. Augmented Reality: Applications, Challenges and Future Trends 10.
- Mes, M., Gerrits, B., 2019. Multi-agent Systems, in: Zijm, H., Klumpp, M., Regattieri, A., Heragu, S. (Eds.), *Operations, Logistics and Supply Chain Management, Lecture Notes in Logistics*. Springer International Publishing, Cham, pp. 611–636. https://doi.org/10.1007/978-3-319-92447-2_27
- Moeuf, A., 2018. The industrial management of SMEs in the era of Industry 4.0. *International Journal of Production Research* 20.
- Mourtzis, D., Alexopoulos, K., Chryssolouris, G., 2012. Flexibility consideration in the design of manufacturing systems: An industrial case study. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 5, 276–283. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2012.10.001>
- Mourtzis, D., Angelopoulos, J., Dimitrakopoulos, G., 2020. Design and development of a flexible manufacturing cell in the concept of learning factory paradigm for the education of generation 4.0 engineers. *Procedia Manufacturing, Learning Factories across the value chain – from innovation to service – The 10th Conference on Learning Factories 2020* 45, 361–366. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.04.035>
- Mourtzis, D., Vlachou, E., Xanthopoulos, N., Givehchi, M., Wang, L., 2016. Cloud-based adaptive process planning considering availability and capabilities of machine tools. *Journal of Manufacturing Systems* 39, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2016.01.003>
- Ollinger, L., Abdo, A., Zühlke, D., Heutger, H., 2014. SOA-PLC – Dynamic Generation and Deployment of Web Services on a Programmable Logic Controller. *IFAC Proceedings Volumes* 47, 2622–2627. <https://doi.org/10.3182/20140824-6-ZA-1003.02189>
- Perzylo, A., Grothoff, J., Lucio, L., Weser, M., Malakuti, S., Venet, P., Aravantinos, V., Deppe, T., 2019. Capability-based semantic interoperability of manufacturing resources: A BaSys 4.0 perspective. *IFAC-PapersOnLine* 52, 1590–1596. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.11.427>
- Qin, J., Liu, Y., Grosvenor, R., 2016. A Categorical Framework of Manufacturing for Industry 4.0 and Beyond. *Procedia CIRP* 52, 173–178. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.08.005>

- Radziwon, A., Bilberg, A., Bogers, M., Madsen, E.S., 2014. The Smart Factory: Exploring Adaptive and Flexible Manufacturing Solutions. *Procedia Engineering* 69, 1184–1190. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.03.108>
- Rojko, A., 2017. Industry 4.0 Concept: Background and Overview. *Int. J. Interact. Mob. Technol.* 11, 77. <https://doi.org/10.3991/ijim.v11i5.7072>
- Rüßmann, M., Lorenz, M., Gerbert, P., Waldner, M., Justus, J., Engel, P., Harnisch, M., 2015a. Industry 4.0: The Future of Productivity and Growth in Manufacturing 20.
- Rüßmann, M., Lorenz, M., Gerbert, P., Waldner, M., Justus, J., Harnisch, M., 2015b. Industry 4.0: The Future of Productivity and Growth in Manufacturing Industries 14.
- Santos, C., Mehraisi, A., Barros, A.C., Araújo, M., Ares, E., 2017. Towards Industry 4.0: an overview of European strategic roadmaps. *Procedia Manufacturing* 13, 972–979. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.09.093>
- Schierholt, K., 2001. Process configuration: Combining the principles of product configuration and process planning. *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing: AIEDAM* 15, 411–424.
- Schlapfer, R.C., Koch, M., Merkofer, P., 2015. Industry 4.0 Challenges and solutions for the digital transformation and use of exponential technologies.
- Science, P.C. of A. on, Technology (U.S.), 2014. Report to the President, Accelerating U.S. Advanced Manufacturing. Executive Office of the President, President’s Council of Advisors on Science and Technology.
- Segovia, D., Mendoza, M., Mendoza, E., González, E., 2015. Augmented Reality as a Tool for Production and Quality Monitoring. *Procedia Computer Science* 75, 291–300. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.12.250>
- SenTryo, 2017. The 4 industrial revolutions [WWW Document]. URL <https://www.sentryo.net/the-4-industrial-revolutions/> (accessed 6.17.19).
- STEARNS, P.N., 2020. *The industrial revolution in world history*. Routledge.
- Stock, T., Seliger, G., 2016. Opportunities of sustainable manufacturing in industry 4.0. *Procedia Cirp*, 40:536:541.
- Strategy&, 2015. Small automation, big benefits [WWW Document]. PwC. URL <https://www.strategyand.pwc.com/gx/en/functions/technology-strategy/big-benefits.html> (accessed 3.5.20).
- Strayer, R.W., Nelson, E., 2009. *Ways of the World: A Brief Global History*. Bedford/St. Martin’s.
- Sung, T.K., 2018. Industry 4.0: A Korea perspective. *Technological Forecasting and Social Change* 132, 40–45. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2017.11.005>
- 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>

- Thames, L., Schaefer, D., 2016. Software-defined cloud manufacturing for industry 4.0. *Procedia cirp*, 52, 12-17.
- Theorin, A., 2012. Service-oriented Process Control with Grafchart and the Devices Profile for Web Services 6.
- Theorin, A., Bengtsson, K., Provost, J., Lieder, M., Johnsson, C., Lundholm, T., Lennartson, B., 2017a. An event-driven manufacturing information system architecture for Industry 4.0. *International Journal of Production Research* 55, 1297–1311. <https://doi.org/10.1080/00207543.2016.1201604>
- Theorin, A., Bengtsson, K., Provost, J., Lieder, M., Johnsson, C., Lundholm, T., Lennartson, B., 2017b. An event-driven manufacturing information system architecture for Industry 4.0. *International Journal of Production Research* 55, 1297–1311. <https://doi.org/10.1080/00207543.2016.1201604>
- Weyer, S., Schmitt, M., Ohmer, M., Gorecky, D., 2015. Towards Industry 4.0 - Standardization as the crucial challenge for highly modular, multi-vendor production systems. *IFAC-PapersOnLine* 48, 579–584. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.143>
- Wilamowski, B.M., 2005. Welcome to the IEEE Transactions on Industrial Informatics, a New Journal of the Industrial Electronics Society. Presented at the IEEE Transactions on Industrial Informatics, 1(1), 1-2.
- Wonderware enhances Operations and Performance Software [WWW Document], 2008. . automation.com. URL <https://www.automation.com/en-us/products/product18/wonderware-enhances-operations-and-performance-sof> (accessed 2.15.21).
- Wonderware System Platform - Fondation de l'Industrie du Futur [WWW Document], 2017. . Wonderware. URL <https://www.wonderware.fr/produit/supervision-et-controlle/ihm-supervision-et-controlle/system-platform-2> (accessed 5.5.20).
- Xu, L.D., Xu, E.L., Li, L., 2018a. Industry 4.0: state of the art and future trends. *International Journal of Production Research* 56, 2941–2962. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1444806>
- Xu, L.D., Xu, E.L., Li, L., 2018b. Industry 4.0: state of the art and future trends. *International Journal of Production Research* 56, 2941–2962. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1444806>
- Yang, H.-L., Chang, T.-W., Choi, Y., 2018. Exploring the Research Trend of Smart Factory with Topic Modeling. *Sustainability* 10, 2779. <https://doi.org/10.3390/su10082779>
- Yu, Z., Ouyang, J., Li, S., Peng, X., 2017. Formal modeling and control of cyber-physical manufacturing systems. *Advances in Mechanical Engineering* 9, 168781401772547. <https://doi.org/10.1177/1687814017725472>
- Zdravković, M., Zdravković, J., Aubry, A., Moalla, N., Guedria, W., Sarraipa, J., 2018. Domain framework for implementation of open IoT ecosystems. *International Journal of Production Research* 56, 2552–2569. <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1385870>

- Zhang, J., Yao, X., Zhou, J., Jiang, J., Chen, X., 2017. Self-Organizing Manufacturing : Current status and Prospect for Industry 4.0. Presented at the 5th International Conference on Enterprise Systems (ES), Beijing, China.
- Zhang, L.L., Rodrigues, B., 2009. A tree unification approach to constructing generic processes. IIE Transactions 41, 916–929. <https://doi.org/10.1080/07408170903026049>
- Zheng, L.Y., Dong, H.F., Vichare, P., Nassehi, A., Newman, S.T., 2008. Systematic modeling and reusing of process knowledge for rapid process configuration. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing 24, 763–772. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2008.03.006>
- Zhong, R.Y., Xu, X., Klotz, E., Newman, S.T., 2017. Intelligent Manufacturing in the Context of Industry 4.0: A Review. Engineering 3, 616–630. <https://doi.org/10.1016/J.ENG.2017.05.015>
- Zhou, K., Taigang Liu, Lifeng Zhou, 2015. Industry 4.0: Towards future industrial opportunities and challenges, in: 2015 12th International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD). Presented at the 2015 12th International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD), IEEE, Zhangjiajie, China, pp. 2147–2152. <https://doi.org/10.1109/FSKD.2015.7382284>
- Zunino, C., Valenzano, A., Obermaisser, R., Petersen, S., 2020. Factory Communications at the Dawn of the Fourth Industrial Revolution. Computer Standards & Interfaces 71, 103433. <https://doi.org/10.1016/j.csi.2020.103433>

Résumé

L'industrie 4.0 est un système dynamique et intégré permettant de contrôler l'ensemble de la chaîne de valeur du cycle de vie des produits. L'intégration verticale et horizontale et la fusion des composants physiques et virtuels sont essentielles, de même que la mise en œuvre des tendances technologiques telles que les systèmes cyber physiques et l'Internet des objets en tant que catalyseurs clés d'un haut niveau d'intégration à l'échelle mondiale. L'introduction de l'Industrie 4.0, caractérisée par des processus de fabrication intelligents et connectés, intéresse de plus en plus les entreprises qui s'efforcent de s'adapter à la demande croissante du marché et des clients. L'objectif de ce projet de doctorat est d'aider les entreprises à évoluer de la fabrication automatisée traditionnelle vers la numérisation du processus de fabrication en proposant un nouveau modèle d'intégration de l'Industrie 4.0. La variété et la complexité des aspects de l'Industrie 4.0, ainsi que les défis techniques et de gestion doivent être pris en compte pour fournir aux entreprises des approches d'intégration cohérentes sur la base d'un nouveau Framework d'intégration. L'expérimentation a été réalisée à la plateforme technologique 4.0 des Arts et Métiers, campus de Paris. Le modèle développé et le Framework proposé ont été vérifiés grâce à un travail intensif d'expérimentation et de mise en œuvre à la plateforme 4.0.

Mots-clés : Industrie 4.0, Systèmes cyber-physiques (CPS), Internet des objets (IoT), Modèles d'intégration, Transformation numérique, Framework d'intégration, Flexibilité, Modularité, Déploiement de données, Robotique avancée, Système d'exécution de fabrication.

Abstract

Industry 4.0 is a dynamic and integrated system for employing control over the entire value chain of the lifecycle of products. Vertical and horizontal integration and fusion of physical and the virtual components are critical for Industry 4.0, as well as technology trends implementation such Cyber Physical Systems and Internet of Things as key enablers of high level of integration at a global scale. Introducing Industry 4.0 as the smart and connected manufacturing processes enabler is increasingly attracting companies trying hard to adapt to the growing market and customer demands. Due to the emergence of Industry 4.0 concept, the aim of this PhD thesis is to help companies to evolve from traditional automated manufacturing to the digital manufacturing level by proposing a novel integration model of Industry 4.0. The variety and the complexity of Industry 4.0 aspects, along with technical and managerial challenges are to be taken into consideration to provide companies with successful integration approaches along with a novel integration framework. The experimentation following this research has been realized at the platform 4.0 at Arts et Métiers Institute of Technology, Paris. The developed model and the proposed framework have been verified through an intensive implementation and integration work among the experimentations done at the industrial platform 4.0.

Keywords: Industry 4.0, Cyber-Physical Systems (CPS), Internet of Things (IoT), Integration Models, Digital Transformation, Integration Framework, Flexibility, Modularity, Data Deployment, Advanced Robotics, Manufacturing Execution System.