



Contribution à la conception, l'évaluation et l'implémentation de systèmes de production cyber-physiques

Olivier Cardin

► To cite this version:

Olivier Cardin. Contribution à la conception, l'évaluation et l'implémentation de systèmes de production cyber-physiques. Automatique / Robotique. Université de nantes, 2016. tel-01443318

HAL Id: tel-01443318

<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01443318>

Submitted on 23 Jan 2017

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.

Habilitation à Diriger des Recherches

Présentée à
L'Université de Nantes
Laboratoire IRCCyN UMR CNRS 6597

**Contribution à la conception, l'évaluation et l'implémentation de
systèmes de production cyber-physiques**

Olivier CARDIN
Maître de Conférences 60^{ème} - 61^{ème} Section

Soutenue le 2 décembre 2016

à l'IUT de Nantes

Devant le jury composé de

Benoit EYNARD	Université Technologique de Compiègne	Rapporteur
Benoit MONTREUIL	Georgia Institute of Technology	Rapporteur
Damien TRENTEAUX	Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis	Rapporteur
Christian ATTIOGBE	Université de Nantes	Examinateur
Alain BERNARD	Ecole Centrale de Nantes	Examinateur
Pierre CASTAGNA	Université de Nantes	Examinateur
André THOMAS	Université de Lorraine	Examinateur

Résumé

Les industries du futur sont en plein cœur de nombreuses perspectives de recherche dans le monde, sous des noms tels qu'Usines du Futur, Industrie 4.0 ou Systèmes cyber-physiques. Cette dernière terminologie, apparue au milieu des années 2000, a reçu un accueil favorable de la communauté et tend à devenir un concept englobant de nombreux domaines de recherche jusqu'alors faiblement connectés. Ce mémoire propose un aperçu des axes de recherche actuels et des applications proposées de ce qui constitue les systèmes cyber-physiques de production (Cyber-Physical Production Systems – CPPS).

Outre l'aspect mécatronique du CPPS, il s'agit généralement de concevoir un système de CPPS, dont les interactions vont permettre de faire émerger en temps réel un comportement permettant d'augmenter les caractéristiques de flexibilité, reconfigurabilité ou encore agilité du système de production complet. Sur ces notions en particulier, les travaux de la communauté française sont principalement structurés autour du groupe de travail IMS² du GDR MACS. Nos travaux s'inscrivent totalement dans les axes définis par ce groupe, que ce soit en terme d'agilité, de durabilité ou du développement de nouvelles technologies pour les systèmes de production. Ce mémoire a pour objectif de présenter les travaux relatifs à ces différents axes réalisés à l'IRCCyN et l'IUT de Nantes (Université de Nantes).

Le fondement de ces travaux tient au développement d'un observateur à événements discrets basés sur des outils de simulation de flux, connectés en temps-réel au système de production. Cet outil a pour objectif de servir de base à un outil d'aide à la décision à court terme, permettant de prendre en compte à la fois l'état réel du système et le comportement émergent de la commande. Cet élément est généralement défini comme étant l'un des outils indispensables au développement d'une commande performante des nouveaux systèmes. Nos travaux ont permis de proposer une méthodologie générale de conception de l'outil, basée sur une génération conjointe du code de la commande et de l'observateur utilisant les outils de l'Ingénierie Dirigée par les Modèles.

La prise en compte de l'énergie dans la commande des systèmes industriels est un enjeu important pour les années à venir. A l'heure actuelle, il y a un déficit d'outils permettant la prise en compte efficace de ces notions dans les décisions de pilotage. L'une des raisons expliquant ce manque est la difficulté d'intégrer aux outils de simulation à événements discrets cette dimension énergétique couplée à la notion classique de flux. Nos travaux ont permis la définition de méthodologies de gestion des données de consommation énergétique et leur intégration au sein d'un outil de simulation de flux. En comparant le fonctionnement d'un système sur plusieurs semaines à celui estimé par l'outil sur la base de relevés expérimentaux et du planning de production réalisé, nous arrivons à des précisions avoisinant les 3% sur la consommation énergétique du système. Cet outil constitue un premier pas permettant à terme à la commande du système de disposer d'informations relatives à la consommation énergétique actuelle ou future du système pour améliorer sa prise de décision.

Au niveau de la commande à proprement parler, les outils de l'Informatique Industrielle évoluent et promettent d'intégrer de plus en plus d'outils provenant de l'Informatique. Ainsi, les concepts de systèmes multi-agents trouvent-ils écho dans les systèmes de production holonomiques, ou encore les architectures orientées-services proposent-ils une réponse partielle aux problèmes de flexibilité de la commande. Nous avons mené pendant plusieurs années des travaux permettant de proposer une architecture de référence mêlant holons et services (Service-oriented Holonic Manufacturing Systems – SoHMS). Le développement complet d'un démonstra-

teur robotisé et automatisé de taille industrielle a permis de démontrer la faisabilité de l'approche et la performance du contrôle sur une architecture totalement sans automates.

Ces notions de systèmes de production holoniques ont toujours été axés sur la production manufacturière, c'est-à-dire sur de la production discrète. Dans le cadre d'une coopération internationale avec le Venezuela, nous avons pu étudier le cas de productions continues, telles que peuvent l'être la production pétrolière par exemple. Nos travaux ont permis de montrer l'applicabilité des architectures discrètes sur des cas continus au prix de modifications mineures, dans ce qui constitue une extension de l'une des plus célèbres architectures de référence en une architecture dénommée H²CM.

Table des matières

Avant-Propos.....	1
Introduction.....	3
Chapitre 1. Déploiement des Systèmes Cyber-Physiques.....	5
1.1 Caractérisation des CPS.....	5
1.1.1 Définitions	5
1.1.2 Classification des CPS.....	6
1.1.3 Quelques exemples de développements de CPS	8
1.2 Axes de recherche autour des CPS.....	13
1.2.1 Conception des CPS.....	14
1.2.2 Robustesse et Sécurité.....	16
1.2.3 Infrastructures de communication.....	18
1.2.4 Business model.....	19
1.3 Projets internationaux traitant des CPS	20
1.4 Bilan.....	24
Chapitre 2. Introduction aux Systèmes de Production Cyber-Physiques.....	27
2.1 Définition.....	27
2.2 Axes de recherche autour des CPPS.....	29
2.2.1 Amélioration des procédés et équipements	29
2.2.2 Gestion du Big Data en atelier	30
2.2.3 Intégration au contexte de coopération avec l'humain.....	32
2.2.4 Agilité des organisations.....	33
2.3 Un concept traité diffusément.....	34
2.3.1 Contexte international.....	34
2.3.2 Positionnement de la communauté française.....	38
2.4 Bilan.....	40
Chapitre 3. Contributions scientifiques principales	43
3.1 Développement de CPPS.....	44
3.1.1 Plateformes expérimentales	44
3.1.2 Observateur.....	55
3.2 Apport des CPPS à l'agilité des systèmes de production.....	58

3.2.1	Définition d'un modèle d'information.....	59
3.2.2	Définition d'une architecture de contrôle flexible	65
3.2.3	Méthodes : Evaluation de performance d'un pilotage prédictif-réactif	69
3.3	Apport des CPPS à une maîtrise efficiente de l'énergie	75
3.3.1	Extensions du paradigme holonique aux systèmes de contrôle hybride	75
3.3.2	Evaluation de performance d'un contrôle basé sur le paradigme holonique pour les systèmes de contrôle hybride.....	77
3.4	Bilan.....	79
Chapitre 4. Conclusions et Perspectives.....		81
4.1	Vers une dissémination des CPPS agiles	81
4.2	Vers une maturité technologique des CPPS.....	84
4.3	Vers des CPPS durables.....	86
4.4	Formation	89
Références		91

Table des illustrations

Figure 1 Capacités de base d'un CPS.....	6
Figure 2 Prototype d'équipement personnel de santé (Santos et al., 2015).....	9
Figure 3 Intégration du système MINi-Me (Håkansson and Hartung, 2014)	10
Figure 4 Schéma de principe d'un système de transmission de puissance électrique (Al-Hammouri, 2012).....	10
Figure 5 Interface client (gauche) et de supervision (droite) du système de chauffage, ventilation et climatisation d'un bâtiment du campus de la Shandong Jianzhu University (Chine) (Wang et al., 2011)	11
Figure 6 Architecture et prototype de véhicule autonome (Wan et al., 2011)	11
Figure 7 Architecture de contrôle d'équipes de robots (Fink et al., 2012).....	12
Figure 8 Exemple de commande flexible de moteur électrique (Al-Hammouri, 2012)	12
Figure 9 Equipement mobile utilisé par un opérateur lors d'une tâche de maintenance (Bergweiler, 2015).....	13
Figure 10 Répartition par éditeurs des articles de revues traitant des CPS.....	14
Figure 11 Framework de conception de CPS (Canedo and Richter, 2014)	15
Figure 12 Utilisation des SoA pour la robustesse aux défaillances des CPS (Alho and Mattila, 2015).....	17
Figure 13 Vue fonctionnelle des smart grids (Vijayapriya and Kothari, 2011)	18
Figure 14 Servitisation des CPS version Komatsu (Lee et al., 2014)	20
Figure 15 Vision synthétique de l'organisation d'un CPPS selon (L. Wang et al., 2015).....	28
Figure 16 « Peg-in-hole problem » : insertion robotisée d'un pion de centrage guidée par les efforts et les couples (droite) pour reproduire les étapes humaines (gauche) (Abdullah et al., 2015).....	29
Figure 17 Cellule robotisée cyber-physique (Michniewicz and Reinhart, 2015).	30
Figure 18 Planification de process basée sur les connaissances (Denkena et al., 2014).....	31
Figure 19 Modèle cyber-physique de système de production prédictif (Lee et al., 2013).....	31
Figure 20 Plateformes expérimentales de la communauté française.....	39
Figure 21 Intégration de la ligne flexible d'assemblage au sein du hall expérimental.	45
Figure 22 Produit fabriqué sur la ligne flexible d'assemblage.....	45
Figure 23 La ligne d'assemblage, avec ses points de décision.....	46
Figure 24 Architecture visée d'intégration de la palette intelligente.....	48
Figure 25 Vue fonctionnelle de la palette intelligente.....	48
Figure 26 Structure interne de la palette intelligente.	49
Figure 27 Vue d'ensemble de SOFAL.	50
Figure 28 Vue schématique de SOFAL.....	50
Figure 29 Poste de Travail N°1 : Stockage de produits semi-finis et déchargement de produits finis.....	51

Figure 30 Postes de Travail N°2 et 3 (identiques) : Opérations d'assemblage.....	51
Figure 31 Produit étudié : structure Lego.	51
Figure 32 Architecture du système réel	52
Figure 33 Menu de configuration – HMI.....	54
Figure 34 Conception de Produits - HMI.....	54
Figure 35 Création et Lancement des Ordres de Production – HMI	54
Figure 36 Flot de génération automatique d'un observateur et de la commande à partir d'un même modèle du système	56
Figure 37 Différentes instances de la bibliothèque d'observation (haut) et le principe de synchronisation (bas)	57
Figure 38 Observateur final du système complet (gauche) et un exemple de mécanisme de synchronisation (droite).....	57
Figure 39 Perspectives de MService	60
Figure 40 Modèle de MService	61
Figure 41 Type de MService	61
Figure 42 Spécification de MService	62
Figure 43 Profil de MService	62
Figure 44 Implémentation de MService	62
Figure 45 Exemple de génération de gammes flexibles.....	65
Figure 46 Diagramme de Classes UML de l'architecture <i>SoHMS</i>	66
Figure 47 Architecture de contrôle de SoHMS.....	67
Figure 48 Ontologie de services d'assemblage sur SOFAL	68
Figure 49 Configuration du magasin étudié	70
Figure 50 Exemple d'évolution de l'indice de rangement en fonction du nombre de déstockage	71
Figure 51 Protocole expérimental	73
Figure 52 Evolution de la dégradation de performance de l'instance la15	74
Figure 53 Diagramme de blocs élémentaires de H ² CM.	76
Figure 54 Structure d'un holon Ressource	77
Figure 55 Système de commutations d'arrivée avec N=3.....	78
Figure 56 Analyse de stabilité du contrôle basé sur H ² CM.....	79
Figure 57 Décomposition de l'architecture SoHMS pour intégration dans le cloud	83
Figure 58 Echange de messages au travers de l'interface cloud pour la production de 25 produits sur SOFAL	83
Figure 59 Exemple d'instanciation de l'architecture SoHMS dans un contexte cloud	85

Avant-Propos

Le terme « Système Cyber-Physique » a émergé aux alentours de l'année 2006, et est généralement attribué à Helen Gill du National Science Foundation, organisation similaire au CNRS pour les USA. La racine de ce terme provient de « cybernétique », dont l'origine est attribuée à Norbert Wiener, 1948, mathématicien américain ayant eu un grand impact en théorie de la commande, notamment par la déclinaison des principes de rétroactions (feedback) aux systèmes biologiques.

Wiener a décrit sa vision de la cybernétique comme la conjonction de la commande et de la communication. Sa vision de la commande est pleinement axée sur le contrôle en boucle fermée, où des capteurs surveillent le process physique, qui est lui-même modifié par les actionneurs pilotés par la commande. Les travaux menés autour de la cybernétique ont constitué une thématique importante depuis l'avènement de ces théories. Depuis 1968, le Laboratoire d'Automatique de Nantes et depuis 1998 dans son appellation actuelle d'Institut de Recherche en Communications et Cybernétique de Nantes poursuit entre autres des recherches dans la continuité des travaux de Wiener.

L'apparition du concept de systèmes cyber-physiques démontre une évolution majeure et une vision intégrative de nombreux domaines de recherche incluant de larges domaines d'applications. Toutefois, la vision de Wiener convient encore tout à fait aux systèmes cyber-physiques tels que nous les traitons de nos jours, et la terminologie pourtant ancienne prend alors tout son sens plus de 60 ans plus tard.

Les travaux présentés dans ce document se situent dans la continuité des travaux menés par l'IRCCyN, et dans le cadre de l'évolution vers les systèmes cyber-physiques de production.

Introduction

Ce mémoire d'Habilitation à Diriger des recherches fait état de six années de recherche en tant que maître de conférences au sein du laboratoire IRCCyN, sur le site de l'IUT de Nantes, au sein de l'équipe ACSED dirigée par M. Jean Jacques Loiseau. Cette équipe a principalement pour objectif l'étude du pilotage des systèmes de production, à la fois sous des aspects de dimensionnement qu'organisationnels.

Le cœur de ces activités, menées en étroite collaboration avec le Pr. Pierre Castagna, repose sur l'encadrement des thèses de Mickaël Adam (2009-2013), de Carlos Indriago (2011-2015), de Francisco Gamboa Quintanilla (2012-2015) et de Meriem Kouki (démarrage en 2014). Les thématiques de recherche abordées s'étendent sur plusieurs aspects des systèmes de production, du stockage automatisé à la production en elle-même, de productions manufacturières discrètes à des productions de type continu. Les notions et paradigmes rencontrés ont évolué au cours des années, pour se focaliser sur la notion de systèmes de production holoniques orientés-services qui est l'une des contributions majeures de ces travaux.

Sur un aspect plus prospectif, la notion de systèmes cyber-physiques est née il y a quelques années et prend de plus en plus d'importance au sein de la communauté internationale. Ce concept, très fédérateur, permet un regroupement pertinent de nombreuses thématiques de recherche autrefois éparses au sein d'un seul paradigme, ayant de multiples verrous scientifiques associés. Les travaux que nous présentons dans ce document sont clairement positionnés dans ce paradigme, et nos perspectives de recherche s'inscrivent également pleinement dans la continuité et face aux différents verrous identifiés.

Cette notion n'ayant pas à ce jour été reprise massivement par la communauté française en productique, ce document a pour objectif de proposer tout d'abord un état de l'art sur les systèmes cyber-physiques au cœur du Chapitre 1. Cette synthèse nous permettra de définir une décomposition fonctionnelle des systèmes cyber-physiques, nous permettant de classifier les différentes applications et plateformes expérimentales développées ou de la littérature. Un focus un peu plus particulier sur leur utilisation dans le contexte de la production sera ensuite proposé dans le Chapitre 2.

Cet état de l'art nous permettra de structurer les efforts de recherche en axes majeurs, qui seront ensuite utilisés pour la présentation de nos travaux de recherche. Le Chapitre 3 proposera une vue d'ensemble synthétique des différents travaux menés au sein de l'équipe à ce jour dans le contexte des systèmes cyber-physiques de production. Le Chapitre 4 nous permettra d'exposer les différentes perspectives issues de ces travaux et du contexte international favorable à l'émergence de tels travaux.

Une vue générale et synthétique des activités de recherche et d'enseignement sera également proposée en Annexe 1 de ce document.

Chapitre 1. Déploiement des Systèmes Cyber-Physiques

Ce chapitre a pour objectif de dépeindre les activités internationales sur la thématique générale des systèmes cyber-physiques (CPS). Après une définition du concept et des caractéristiques fonctionnelles de ce type de systèmes, issues d'un examen des développements technologiques présents dans la littérature, une classification des efforts de recherche appuyée sur une analyse des projets de recherche internationaux dans la thématique est proposée.

1.1 Caractérisation des CPS

1.1.1 Définitions

La première définition que l'on peut trouver de systèmes cyber-physiques (CPS) date de 2006 (Lee, 2006), lors de travaux avec la National Science Foundation¹ (NSF) américaine. Cette définition peut être retranscrite ainsi : « *Les CPS intègrent des process physiques et computationnels. Des ordinateurs et réseaux embarqués surveillent et contrôlent les process physiques, généralement avec des boucles de rétroaction où les process physiques affectent les calculs et vice versa. En d'autres mots, les CPS utilisent des computations et de la communication profondément intégrée et interagissant avec les process physiques afin de produire de nouvelles capacités du système. Un CPS peut être considéré aussi bien à une petite échelle (e.g. pace maker) qu'à de grandes échelles (un réseau national de distribution d'énergie)* ».

Au fur et à mesure de leur développement, des définitions plus synthétiques ont été proposées, telles que : « *systèmes physiques desquels les opérations sont surveillées, contrôlées, coordonnées et intégrées par un cœur centres de calculs et de communications* » (Rajkumar et al., 2010) ou encore « *les CPS sont définis comme des technologies permettant la gestion de systèmes interconnectés entre une partie physique et des capacités computationnelles* » (Baheti and Gill, 2011). Cette interconnexion de systèmes, comme le rappelle (Gengarle et al., 2013), provient du fait qu'un CPS comprend à la fois des moyens de contrôle, de calcul, mais également de communication, ce qui peut être synthétisé par la Figure 1, adaptée de (Klimeš, 2014).

La récente définition proposée par (Monostori, 2014) permet une synthèse claire de tous ces éléments, en introduisant de plus la notion de services : « *Les CPS sont des systèmes formés d'entités collaboratives, dotées de capaci-*

¹ <http://www.nsf.gov/>

té de calcul, qui sont en connexion intensive avec le monde physique environnant et les phénomènes s'y déroulant, fournissant et utilisant à la fois les services de mise à disposition et de traitement de données disponibles sur le réseau. »

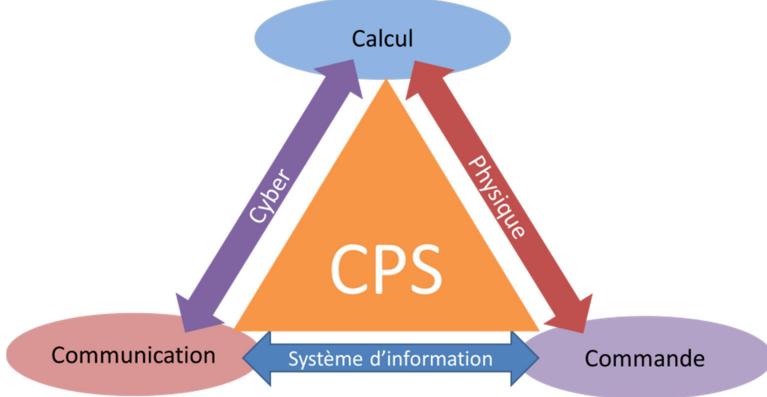


Figure 1 Capacités de base d'un CPS

1.1.2 Classification des CPS

Comme l'a démontré la section précédente, la notion de CPS regroupe un large groupe de domaines scientifiques, couvrant un spectre étendu d'applications potentielles. Afin de rationaliser l'approche de ces travaux, nous proposons dans ce document une classification des CPS suivant 4 critères.

1.1.2.1 Caractérisation fonctionnelle des CPS

Les CPS sont des systèmes coopérants, ayant une commande décentralisée, issus de la fusion entre le monde réel et le monde virtuel, ayant des comportements autonomes et dépendants du contexte dans lequel ils se trouvent, pouvant se constituer en systèmes de systèmes avec d'autres CPS et amenant une collaboration poussée avec l'humain (Schuh et al., 2014c). Pour cela, les logiciels embarqués en CPS utilisent des capteurs et actionneurs, se connectent entre eux et aux opérateurs humains en communiquant via des interfaces, et ont des capacités de stockage et de traitement de l'information issue des capteurs ou du réseau (Strang and Andrl, 2014). D'après (Shi et al., 2011), voici les caractéristiques attenantes à un CPS :

- Haut niveau d'intégration physique/cyber ;
- Capacités de traitement dans chaque composant physique, dû au fait que les ressources en traitement et communication sont généralement limitées ;
- Hautement connectés, via réseaux avec ou sans fil, Bluetooth, GSM, GPS etc. ;
- Adapté à des échelles temporelles et spatiales multiples ;
- Capable de reconfiguration/réorganisation dynamique ;
- Hautement automatisés, en boucles fermées ;
- Fiables, voire certifiés dans certains cas.

(Geisberger and Broy, 2012) détaillent les fonctionnalités générales qui sont attendues de la part d'un CPS :

- directement enregistrer les données physiques en utilisant des capteurs et agir sur les phénomènes physiques en utilisant des actionneurs ;
- évaluer et sauvegarder les données enregistrées, et interagir activement ou en réaction aux événements avec à la fois le monde physique et digital ;
- être connecté avec les autres CPS et à un réseau global via des moyens de communications numériques (avec et/ou sans fil, local et/ou global) ;
- utiliser de manière globale les données et services disponibles ;
- avoir un ensemble d'interfaces homme-machine multimodales.

Ces caractéristiques et fonctionnalités restant assez théoriques et abstraites, une classification des CPS en cinq catégories (5C) suivant leurs niveaux de fonctionnalités a été proposée par (Lee et al., 2015) :

- **C1.** Au niveau Connexion, le CPS opère sur un réseau Plug&Play et utilise des données envoyées par un réseau de capteurs ;
- **C2.** Au niveau Conversion, le CPS sait traiter l'information et la retranscrire en informations de plus haut niveau ;
- **C3.** Au niveau Cyber, le CPS a une connaissance des autres CPS de l'environnement et peut interagir avec eux pour enrichir son propre traitement d'information ;
- **C4.** Au niveau Cognition, le CPS est capable d'établir un diagnostic basé sur des simulations de son propre comportement et une analyse différentielle des données de capteurs ;
- **C5.** Au niveau Configuration, le CPS peut s'adapter seul en cas de défaillance, se reconfigurer ou ajuster de manière autonome ses paramètres afin de retourner à un comportement nominal.

Cette classification a été réalisée initialement afin de fournir un tutoriel pas à pas de déploiement de CPS, de la fonctionnalité de détection jusqu'aux fonctions créant le plus de valeur ajoutée. L'intégration totale des 5 niveaux au sein d'un CPS n'est actuellement que très rarement atteinte, et ne se justifie pas toujours selon le type d'application. Nous proposons dans ce document d'étendre l'utilisation de cette décomposition fonctionnelle, et de s'en servir afin de définir le niveau d'autonomie et d'intelligence d'un CPS donné, selon le niveau de fonctions qu'il atteint.

1.1.2.2 Critères de classification des CPS

La caractérisation fonctionnelle exprimée ci-dessus constitue le premier critère de classification que nous proposons d'utiliser (C1 à C5). Un second critère de classification est le domaine d'application du CPS. Cette caractéristique a déjà été évoquée dans de nombreux travaux, et nous reprenons dans ce document la liste de domaines potentiels issue d'une synthèse² réalisée par le NIST et les universités de Virginia et Berkeley :

- **Communication** : ce domaine regroupe tout ce qui a trait à la conception de moyens de communication innovants ;

² <http://cyberphysicalsystems.org>

- **Consumer** : intègre tous les CPS ayant pour objectif une modification des habitudes consuméristes des usagers ;
- **Energy** : concerne toutes les applications autour de la production et de la distribution d'énergie ;
- **Infrastructure** : inclut toutes les initiatives autour des bâtiments, génie civil et travaux publics ;
- **Health Care** : recouvre les aspects liés à la santé ;
- **Manufacturing** : englobe tout ce qui est lié à la production manufacturière ;
- **Military** : se limite aux applications orientées vers la défense ;
- **Robotics** : couvre toutes les applications orientées vers la robotique, qu'elle soit humanoïde, de production, de service ou mobile ;
- **Transportation** : représente tous les modes de transport, individuels ou collectifs, de personnes ou de marchandises, etc.

Ce critère pourra être exprimé par un seul ou par la conjonction de deux domaines. Un troisième critère concerne l'interaction entre le CPS et l'humain, en particulier au niveau de l'automatisation de la prise de décision. Les niveaux envisagés pour ce critère ont été étendus à partir de ceux définis par (Dworschak and Zaiser, 2014) et qui seront détaillés dans la section 2.2.3 :

- **Full** : l'humain n'a qu'un rôle de supervision du CPS, qui prend la totalité de ses décisions sans l'intervention de l'humain ;
- **Automation** : le CPS guide l'humain dans sa tâche en prenant la majeure partie des décisions et en laissant les fonctions d'adaptation à l'humain ;
- **Tool** : l'humain guide le CPS en prenant la majeure partie des décisions ;
- **Manual** : le CPS n'a qu'un rôle d'informateur de l'humain qui va prendre la totalité des décisions.

Enfin, le dernier critère recouvre l'aspect technologique du CPS au niveau de la technologie de communication utilisée pour communiquer avec le réseau. Les niveaux de ce critère sont ouverts, en fonction de l'évolution de la technologie utilisée, mais l'on pourra citer de manière préliminaire les niveaux suivants : Ethernet, Wifi, Zigbee, WSN (Wireless Sensors Network), GSM, etc.

Nous obtenons ainsi une classification à 4 critères permettant de spécifier les caractéristiques d'une étude relative aux CPS, et qui s'écrira sous la forme : {Fonctionnalités ; Domaine ; Interaction avec l'humain ; Technologie réseau}.

1.1.3 Quelques exemples de développements de CPS

Les CPS ont fait l'objet de nombreux travaux de recherche lors de la dernière décennie, amenant assez régulièrement jusqu'au niveau du développement de prototypes fonctionnels. Ceux-ci sont encore généralement en phase de tests/évaluation de performance et ne constituent donc pas à l'heure actuelle de produits commercialisables ni même industrialisables. Une série de prototypes peut toutefois être dégagée de la littérature, que nous présentons dans les paragraphes suivants.

Les premières applications des CPS se sont basés sur les appareils de type smartphones pour déployer les applications. De ce fait, les applications d'assistance à la personne se sont développées, et notamment celles axées sur l'assistance médicale. La vision de la « santé connectée » a pris de l'ampleur ces dernières années, notamment grâce à l'essor de technologies connexes telles que les réseaux sans fil ou les capteurs. Ceci a permis le développement d'Equipements de Santé Personnels (Personal Health Devices (PHD)), qui visent à récupérer puis partager de l'information sur un réseau local ou Internet, tel que celui présenté sur la Figure 2 (Santos et al., 2015). Selon la classification élaborée ci-dessus, cet exemple est caractéristique d'un CPS : {C1 ; Health Care ; Manual ; WSN}.

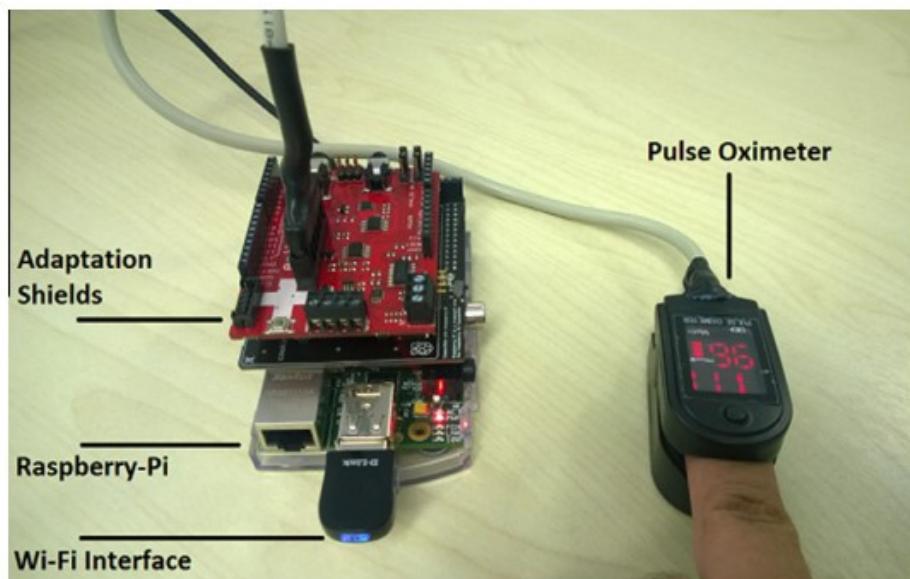


Figure 2 Prototype d'équipement personnel de santé (Santos et al., 2015)

Un autre facteur important est la volonté de limiter l'impact budgétaire des soins médicaux en proposant une alternative au chemin traditionnel menant en premier lieu aux médecins généralistes pour tout type de demandes (Håkansson and Hartung, 2014). La Figure 3 présente le système MINi-Me, copie virtuelle de l'utilisateur qui permet de stocker un grand nombre de données et paramètres liés à cet individu et d'interagir en fonction des paramètres prédéfinis par l'utilisateur avec les équipements de soin qui lui sont nécessaires. L'intelligence du système se situe au niveau de la gestion des données. Le système n'est pas qu'un simple avatar de la personne, mais contient des données d'historique sur l'évolution des paramètres du patient, ses problèmes précédents, l'ensemble de ses traitements passés et actuels, ses contre-indications, etc. De plus, sur une base quotidienne, l'équipement est également informé par le biais d'une base de données sur Internet d'éléments nouveaux concernant les maladies, traitements et effets secondaires, ce qui, couplées aux informations du patient, permettent d'éviter des incompatibilités médicamenteuses par exemple. Ce CPS se caractérise en {C2 ; Health Care ; Tool ; GSM}.

Les CPS ont également de nombreuses applications dans le domaine de l'énergie (génération, distribution, consommation). Ces systèmes ont pour intérêt par exemple de diminuer les conséquences d'une défaillance. Ainsi, le réseau capteur-actionneur présenté dans la Figure 4 est utilisé par (Al-Hammouri, 2012) pour démontrer comment une défaillance peut être détectée et isolée. Une ligne de 430km de long relie une turbine à vapeur d'eau à un bus infini. Le courant est mesuré de chaque côté de la ligne et est envoyé à un contrôleur central par le réseau. Ce con-

trôleur, par comparaison du courant sur les phases, détecte les éventuelles défaillances et agit sur les coupe-circuits, également via le réseau, ce qui constitue un CPS : {C2 ; Energy ; Full ; Ethernet}.



Figure 3 Intégration du système MINi-Me (Håkansson and Hartung, 2014)

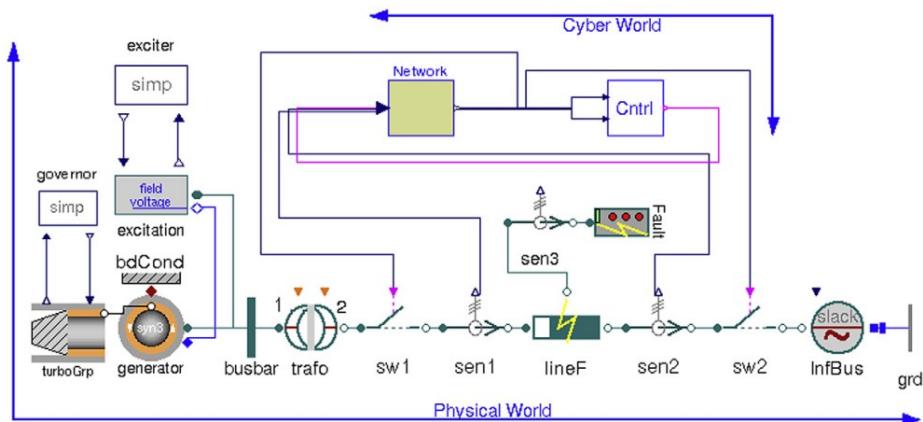


Figure 4 Schéma de principe d'un système de transmission de puissance électrique (Al-Hammouri, 2012)

Cette préoccupation énergétique se décline également au niveau du bâtiment. Le « Cyber-physical building Energy Management System » (CBEMS) a par exemple été testé sur un bâtiment du campus de la Shandong Jianzhu University en Chine (Figure 5). Ce système intègre à la fois les informations énergétiques du bâtiment grâce à un réseau de capteurs sans fil, mais également une architecture de contrôle de la consommation basée sur un système multi-agents, qui permet d'automatiser la plupart des fonctions de chauffage, ventilation et climatisation (Wang et al., 2011). Nous pouvons caractériser ce système en : {C4 ; Infrastructure ; Full ; WSN}.



Figure 5 Interface client (gauche) et de supervision (droite) du système de chauffage, ventilation et climatisation d'un bâtiment du campus de la Shandong Jianzhu University (Chine) (Wang et al., 2011)

Depuis de nombreuses années, les véhicules intelligents constituent un champ de recherche important avec beaucoup de travaux émergeant du monde entier. Dans ces véhicules sans conducteurs, le système de navigation/vision joue un rôle important dans la détection de l'environnement physique. La Figure 6 présente un prototype de véhicule autonome basé à la fois sur la technologie GPS et sur des réseaux de capteurs sans fil : {C3 ; Transportation ; Full ; WSN}.

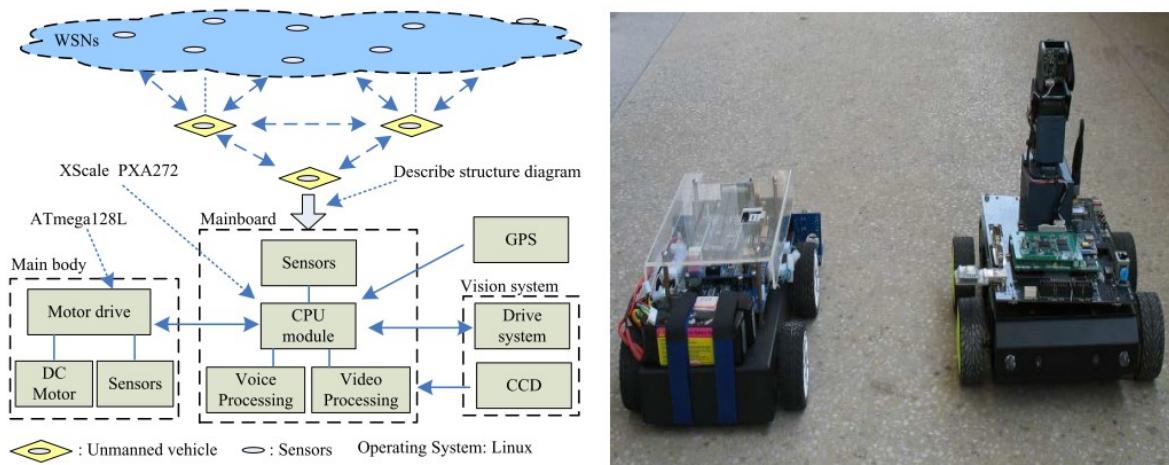


Figure 6 Architecture et prototype de véhicule autonome (Wan et al., 2011)

Souvent connexes à ces problématiques de transport, les travaux en robotique s'intéressent aussi aux CPS. Ainsi, la Figure 7 propose l'architecture proposée par (Fink et al., 2012) pour le contrôle d'équipes de robots autonomes. Ce contrôle a pour objectif d'optimiser les performances du réseau sans fil et assurer la disponibilité continue des ressources de communication. L'architecture présentée permet de plus le développement et l'évaluation de différentes politiques de routage des robots. L'opérateur humain a à la fois un rôle de définition des tâches à accomplir et reçoit en contrepartie tout un lot d'informations provenant de l'ensemble des robots : {C3 ; Transportation/Robotics ; Tool ; Radio}.

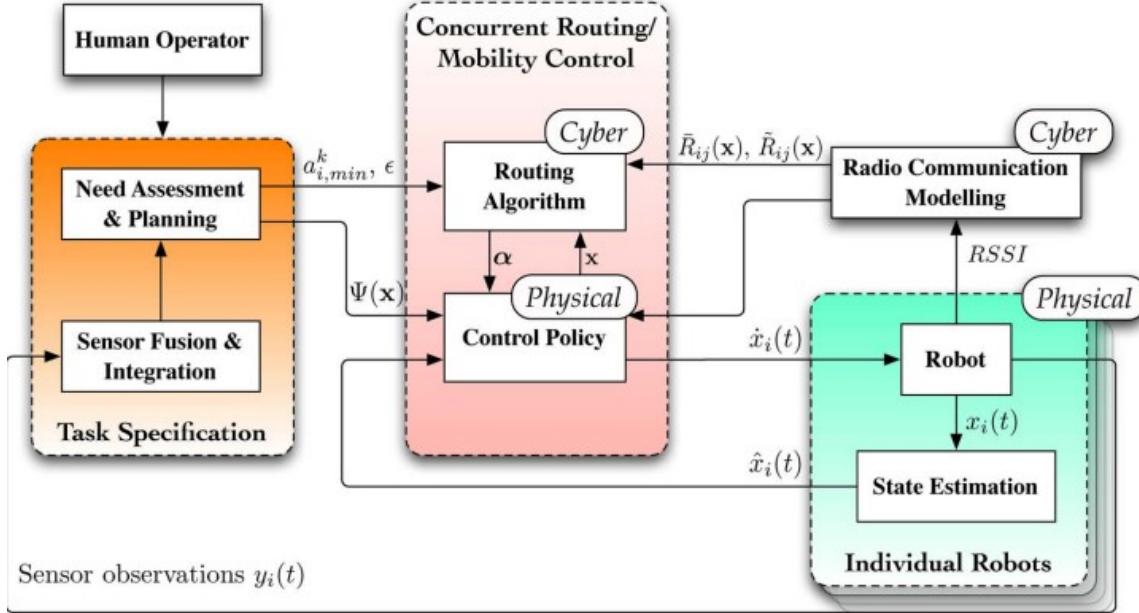


Figure 7 Architecture de contrôle d'équipes de robots (Fink et al., 2012)

Plus généralement, la commande de machines de production est également sujette à application des CPS. La Figure 8 représente deux contrôleurs reliés par un réseau Ethernet à un même moteur (Al-Hammouri, 2012). En se basant sur les mesures relevées par les capteurs (angle et vitesse), la commande du CPS peut, au travers du réseau, décider de changer le contrôleur en charge de l'asservissement du moteur, et ainsi gagner en performance du moteur : {C2 ; Manufacturing ; Full ; Ethernet}.

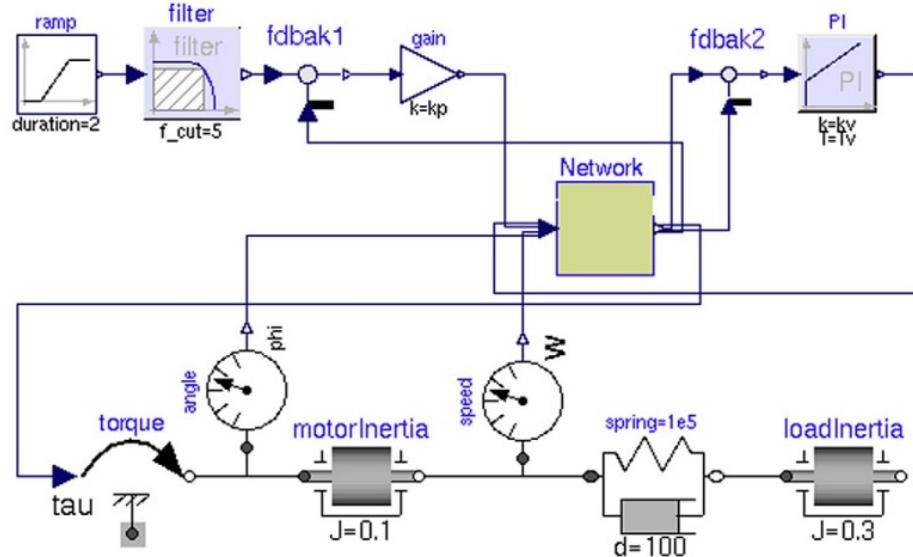


Fig. 11. A CPS example: flexible drive system.

Figure 8 Exemple de commande flexible de moteur électrique (Al-Hammouri, 2012)

La production manufacturière peut également bénéficier des avantages des CPS. En particulier, le domaine de la maintenance a été particulièrement étudié, notamment du fait du grand

nombre d'informations manipulées par les opérateurs de maintenance au cours d'une journée, voire d'une intervention. La Figure 9 présente l'interface d'une application mobile dédiée à la maintenance d'équipements industriels (Bergweiler, 2015). Dans cet appareil mobile, une représentation visuelle des objets réels est téléchargée via le réseau depuis un serveur central appelé *Object Memory Server*. A partir de là, un certain nombre de petites tâches sont possibles à réaliser de manière autonome et décentralisée. Grâce au relevé d'informations sur les tâches réalisées et sur les relevés issus des capteurs sur équipements, le système central peut commander les pièces détachées avant même la panne : {C2 ; Manufacturing ; Tool ; Wifi}.



Figure 9 Equipement mobile utilisé par un opérateur lors d'une tâche de maintenance (Bergweiler, 2015)

Cette rapide revue d'exemples de développements de CPS issus de la littérature montre que les caractéristiques fonctionnelles des CPS s'étendent sur presque tous les niveaux selon le besoin, mais que le niveau C5 n'a, à notre connaissance, pas encore été atteint et développé dans quelque domaine que ce soit. La coopération avec l'humain est très souvent considérée, et tous les scénarios d'interaction envisagés ont été retrouvés. Enfin, la gamme de technologies utilisées pour la communication entre CPS est vaste et variée.

1.2 Axes de recherche autour des CPS

L'extension des systèmes cybernétiques vers les CPS est explicitement traitée dans la littérature depuis 2006-2007 et est en pleine expansion. Si l'on réalise une étude chez les principaux éditeurs du nombre de publications en revues scientifiques, nous observons une croissance importante et généralisée ces 5 dernières années (Figure 10). Le taux de publication semble continuer à s'accroître, puisque les chiffres de 2016 représentent déjà 20% du total de 2015 alors que la statistique n'a été réalisée que sur moins de 10% de l'année.

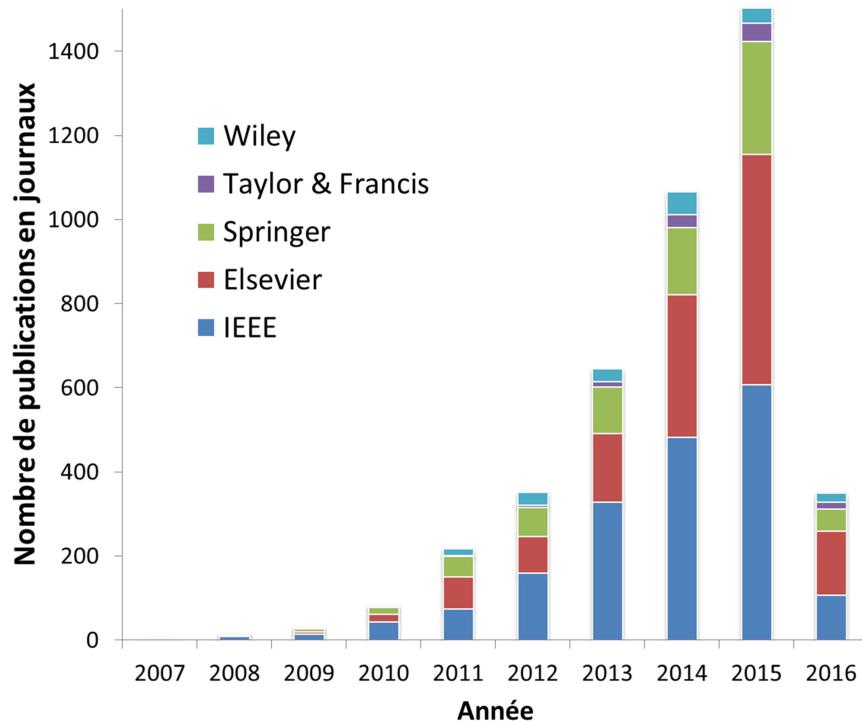


Figure 10 Répartition par éditeurs des articles de revues traitant des CPS

A partir de cette revue d'articles, plusieurs axes actuels de recherche peuvent être dégagés. Ces axes ont été définis en rapport à la théorie générale des CPS, sans évoquer leurs potentielles applications. Cette section décrit les quatre axes majeurs rencontrés et quelques exemples de réalisations liées à ces axes.

1.2.1 Conception des CPS

Intellectuellement parlant, concevoir un CPS relève plus de l'intersection que de l'union des mondes physique et cyber. Il n'est pas suffisant de comprendre les composants physiques et de calcul, mais il faut également appréhender leurs interactions.

La conception de tels systèmes requiert donc la compréhension de dynamiques couplées ordinateur/logiciel/réseau/phénomène physique qui s'avèrent généralement relativement complexes et qui rendent cette discipline de conception à part (Lee and Seshia, 2011). De plus, l'impact des CPS dans l'entreprise est une révolution touchant bien plus que la production, mais aussi la plupart des départements indirects, telle que l'ingénierie (Schuh et al., 2014d). Comme indiqué dans (Onori and Barata Oliveira, 2010), la plupart des ingénieurs de production sont à la base des experts en mécanique, pour lesquels un certain nombre de concepts nécessaires à la conception de CPS est étranger. Partant de ce constat, (L. Wang et al., 2015) pointe la nécessité de combler le déficit entre les disciplines, ce que plusieurs projets européens ont déjà prouvé (EUPASS³, IDEAS⁴, GRACE⁵).

³ http://cordis.europa.eu/result/rcn/51017_en.html

⁴ http://cordis.europa.eu/project/rcn/95351_en.html

⁵ http://cordis.europa.eu/project/rcn/94796_en.html

(Bernard and Chenouard, 2014), tout en présentant un exemple de conception de système produit-service et une analyse de sa performance dans la construction de bateaux, pointe les nouveaux besoins nécessitant une adaptation des modèles, méthodes, outils, organisations et environnements de conception, rejoignant de près les challenges mis en avant par (Hu et al., 2015) :

- Modélisation formelle et analyse dynamique des CPS, dû à l'évolution constante de ce type de système dynamique hybride ;
- Analyse et évaluation de performance des CPS, par une comparaison permanente entre les valeurs obtenues par le modèle et par la détection ;
- Vérification, validation, certification, évaluation de la robustesse des CPS ;
- Diminution du risque de défaillance ;
- Sécurisation du traitement de l'information et des réseaux.

Là encore, le côté multi-métiers apparaît clairement, et amène une réflexion sur le processus de conception dans son ensemble, que ce soit pour la liaison commande/mécanique (L. Wang et al., 2015) que pour la liaison commande/réseau (Conklin, 2011). De plus, étant donné la complexité de ce type de système, il est important de noter que la conception passe de mains en mains de dizaines de personnes différentes, voire d'entreprises différentes, entre le concept initial et le prototype industrialisable. C'est pourquoi (Canedo and Richter, 2014) a identifié un framework de conception illustré Figure 11 mettant en avant des aspects tels que la prise de décision sur les choix de conception au plus tôt ou encore une analyse multidisciplinaire et centré sur l'utilisation d'un Functional Modeling Compiler.

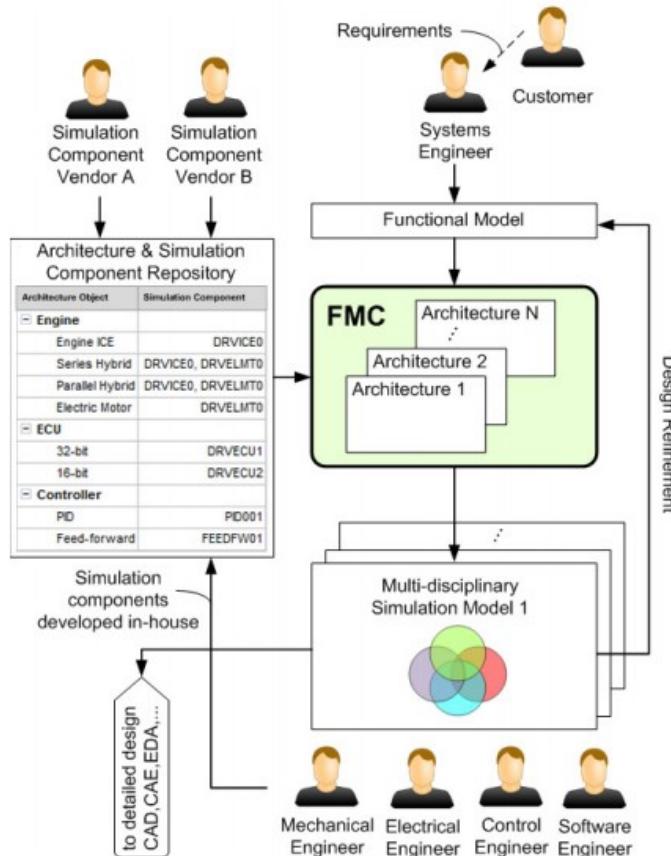


Figure 11 Framework de conception de CPS (Canedo and Richter, 2014)

Cette Figure 11 insiste sur le fait qu'un développement efficace de la partie logicielle nécessite une approche de génération automatique basée sur les modèles des produits et des ressources (Otto et al., 2014). Plusieurs travaux ont déjà été menés sur cette thématique, parmi lesquels on peut citer :

- Des apports à la métamodélisation de process flexibles pour CPS (Seiger et al., 2014)
- Des améliorations de la norme IEC 61499 pour automates programmables industriels (Programmable Logic Controller – PLC), afin de mieux définir la sémantique d'exécution des Basic Function Blocks (BFB) et lever l'ambiguité qui découlait de l'instanciation de ces blocs essentiels de la norme (S. Wang et al., 2015) ;
- De la génération automatique conjointe de code IEC 61131-3 pour PLC et programmes Java pour le code embarqué (Thramboulidis, 2015) ;
- Utilisation de l'Ingénierie Dirigée par les Modèles pour la gestion énergétique d'un datacenter (Mukherjee et al., 2010). A noter que les techniques FCA (Formal Concept Analysis) sont également souvent utilisées (Klimeš, 2014) ;
- Un framework de génération de code pour CPS intégrant la modélisation (CPSiCGF), utilisant le modèle d'application créé durant la phase de spécification produit pour produire la configuration complète de l'application et les codes exécutables correspondants à partir de bibliothèques de composants CPS (Li et al., 2015).

Ces approches de génération amènent une certaine fiabilité dans le comportement observé grâce à la transcription automatique du modèle amont. Pour augmenter encore cette fiabilité, des travaux sur la vérification de propriétés (Deux CPS peuvent-ils coopérer ? Des comportements anormaux sont-ils possibles ?), grâce à des outils proches des model-checkers sont utilisés (Zhang et al., 2015). De nombreux CPS ont également une fiabilité (et des performances) dépendante d'une prédiction temporelle en ligne précise du futur état du système (Petnga and Austin, 2013). La Figure 11 indique clairement la fonction centrale de simulations multidisciplinaires dans la phase de conception. Les techniques de co-simulation (Al-Hammouri, 2012; Broman et al., 2015) ont été largement étudiées, que ce soit pour une utilisation en ligne avec des développements sur la co-simulation parallèle de systèmes dynamiques hybrides (Ben Khaled, 2014; Ben Khaled et al., 2014) ou lors de phases de conception ou de prototypage rapide (Zhang et al., 2014).

1.2.2 Robustesse et Sécurité

En corollaire de la fiabilité au niveau de la conception, la fiabilité dans la phase de mise en œuvre du CPS fait l'objet de quelques travaux, bien que les aspects sécuritaires soient beaucoup plus présents dans la littérature (Hu et al., 2015).

Les liens étroits existants entre les CPS durant la phase d'utilisation améliorent leur connectivité, mais permettent inévitablement aux défaillances de se propager sur le réseau jusqu'à éventuellement créer des catastrophes. Les agents de maintenance externes ont souvent besoin de collaborer avec des pairs pour réaliser les interventions d'urgence et les opérations de réparation. (Zhong and Nof, 2015) propose un framework de modélisation systématique de la réponse collaborative afin de préparer au mieux l'intervention de l'équipe d'agents, et ainsi éviter la propagation de défauts en cascade

Du fait des limitations technologiques et aux influences de l'environnement, les données de capteurs collectées par les CPS sont forcément bruitées, ce qui peut potentiellement déclencher de nombreuses fausses alarmes. Néanmoins, il est nécessaire d'extraire un ensemble de données pertinentes du grand volume de données bruitées fournies par des réseaux comportant jusqu'à plusieurs centaines de capteurs. (Tang et al., 2013) propose une méthode appelée « Tru-Alarm », qui améliore la capacité d'un CPS à reconnaître les alarmes fiables au sein du réseau.

(Alho and Mattila, 2015) explore la possibilité d'utiliser les Architectures Orientées-Services (SoA) pour créer des CPS robustes aux défaillances. Les SoA sont des architectures de contrôle décentralisées dont la principale caractéristique est la décomposition de process en sous-process, appelés services, pour pouvoir les distribuer aux différentes ressources disponibles (Komoda, 2006a). (Alho and Mattila, 2015) utilise un prototype de plateforme SoA temps-réel, Sulava (Figure 12), pour tester des politiques de réponses aux défaillances pour des systèmes avec des contraintes de Qualité de Service (QoS).

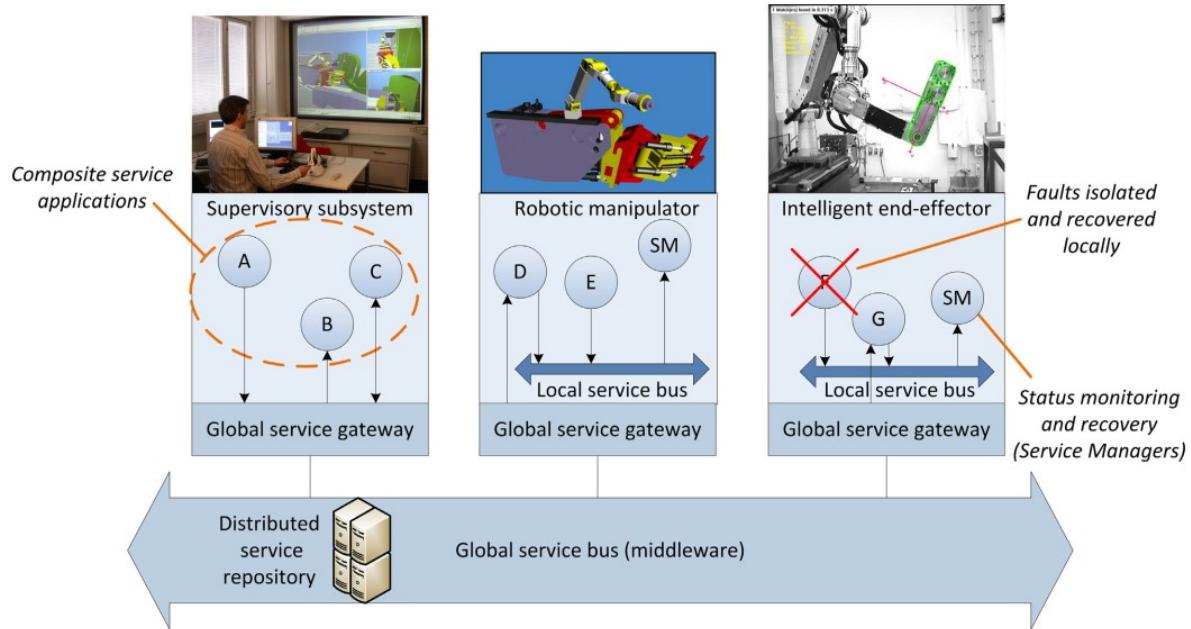


Figure 12 Utilisation des SoA pour la robustesse aux défaillances des CPS (Alho and Mattila, 2015)

Par essence, les CPS tirent leur efficacité pour bonne part de leur interconnectivité. En plus de nuire à l'efficacité de la maintenance des installations en les rendant plus complexes et interdépendantes, cette interconnectivité pose d'énormes problèmes de sécurité. Ainsi, les réseaux de distribution d'énergie, le contrôle aérien ou la conduite de véhicules parmi d'autres deviennent petit à petit des « smart grids », un contrôle automatisé du trafic aérien et une locomotion sans pilote sur route. Toutes ces évolutions nécessitent l'accès à un réseau le plus ouvert possible, alors que jusqu'ici, ces systèmes étaient restreints à des écosystèmes restreints, fermés et propriétaires (Akella et al., 2010). Parmi les menaces principales envisagées, l'injection de données erronées et l'intrusion dans le réseau sont particulièrement évoqués (Liu et al., 2015). (Zhang et al., 2013) propose une classification des menaces de sécurité en fonction de la couche applicative à laquelle elle s'attaque : les capteurs et actionneurs sont vulnérables dans la couche Perception-Exécution, les fuites et modifications de données dans la couche Transport et les intrusions et pertes de confidentialité de données dans la couche Application-Contrôle. (Yampolskiy et al., 2015) a poursuivi cet effort de spécification et a développé le Cyber-Physical

Attack Description Language (CP-ADL), qui se veut un fondement de la sécurité future des CPS, basé sur une taxonomie des sémantiques d'attaques possibles. Une taxonomie a également été présentée par le Carnegie Mellon Computer Emergency Response Team (CERT) (Brooks et al., 2012) dans le domaine de la production automobile.

Le réseau attenant aux futures « smart grids » est le plus exposé, le plus stratégique et donc le moteur historique des travaux du domaine (Rice and AlMajali, 2014). La smart grid est composée d'un réseau de données couplé au réseau de distribution électrique, qui collecte et analyse les données capturées en temps-réel auprès des équipements de transmission, distribution et consommation d'énergie (Figure 13). En se basant sur ces données, la technologie smart grid fournit des prédictions et des recommandations aux équipements, fournisseurs et consommateurs sur la meilleure manière de gérer leur énergie (Gao et al., 2012). Cette smart grid est par nature un réseau de CPS, et probablement l'un des plus complexes systèmes de systèmes en perspective. Le NIST (National Institute of Standards and Technology⁶) a développé une architecture conceptuelle pour pouvoir analyser les phases d'usage, identifier les interfaces pour lesquelles des normes d'interopérabilité sont nécessaires et faciliter le développement de stratégies de cyber-sécurité. Des travaux à base d'émulateurs, tels qu'EMULAB (Genge et al., 2012) ou ELIMET (Zonouz and Haghani, 2013), sont développés afin d'anticiper le déploiement du réseau smart grid à grande échelle.

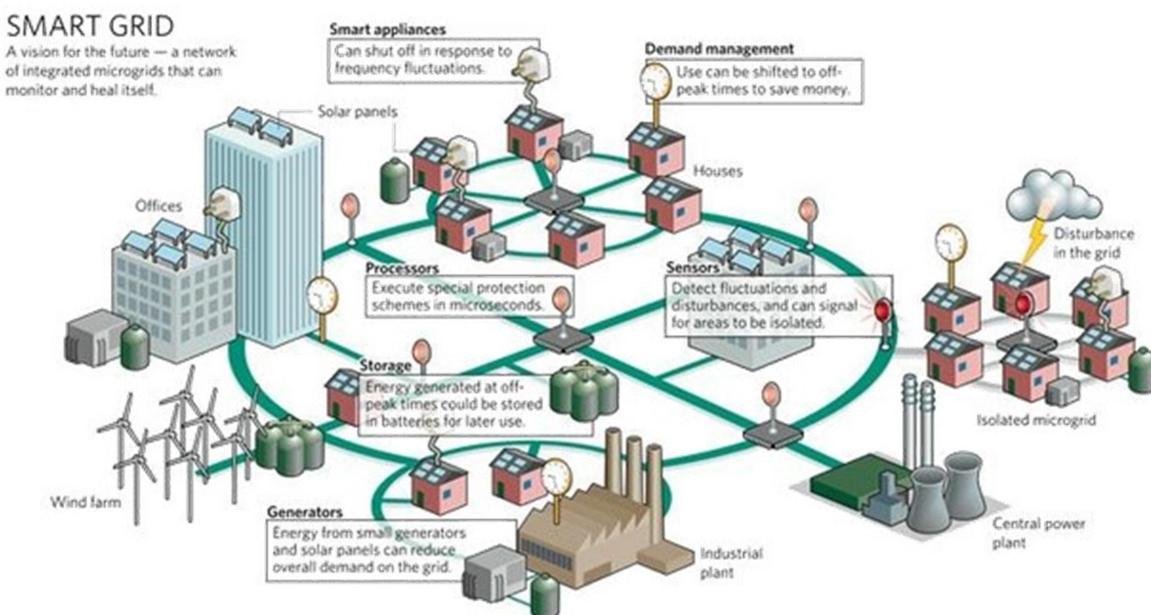


Figure 13 Vue fonctionnelle des smart grids (Vijayapriya and Kothari, 2011)

1.2.3 Infrastructures de communication

La performance du réseau de données connectant les CPS entre eux ou avec les réseaux de capteurs est un enjeu majeur pour la performance globale du CPS. En effet, l'objectif des CPS est d'être capables de traiter un grand nombre de données, et donc d'en faire transiter un nombre plus important qu'actuellement au sein de réseaux ayant des limitations technologiques certaines. De plus, le couplage avec le monde physique implique une incohérence entre la notion de

⁶ http://www.nist.gov/public_affairs/releases/upload/smartgrid_interoperability_final.pdf

temps dans le domaine physique et la considération du temps sur le réseau, qui n'ont pas les propriétés d'inexorabilité du temps passé et de parallélisme intrinsèque entre événements (Lee, 2008).

Ainsi, (Schmitt et al., 2014) propose TinyIPFIX, une extension du protocole IP adapté aux CPS basés sur des réseaux de capteurs sans fil. Cette extension a pour objectif d'améliorer la qualité de la transmission des données sur le réseau. Un nouveau mode de communication au sein des réseaux de capteurs sans fil a également été proposé par (Shakshuki et al., 2014) avec pour objectif de diminuer la consommation des capteurs en modifiant leur stratégie de scrutation des événements réseau. (Jatzkowski and Kleinjohann, 2015, 2014) travaillent sur l'hétérogénéité des réseaux. En effet, l'objectif de coupler les systèmes au sein d'un réseau global fait que l'on peut observer des réseaux ayant des matériels, voire des protocoles complètement différents (Ethernet, CAN, Zigbee par exemple pour les réseaux locaux industriels) devoir communiquer. L'objectif est de réussir à adapter les concepts Plug-and-Play pour ce qui deviendrait un Plug-and-Produce. Une extension de ces travaux peut être identifiée dans la négociation entre CPS hétérogènes et les infrastructures de communication nécessaires (Håkansson and Hartung, 2014)

1.2.4 Business model

Beaucoup de travaux sont également présentés concernant le business model qui pourrait être couplé au déploiement des systèmes cyber-physiques. Comme indiqué précédemment, la smart grid constitue un cas à part, largement traité par les industriels du secteur. Cette section s'intéresse aux autres façons d'aborder ce déploiement sur un aspect un peu plus financier.

Le premier axe identifié est la rentabilité à long terme. Pour cela, une gestion énergétique plus fine des bâtiments est prototypée. Ainsi, le bâtiment cyber-physique présenté précédemment par (Wang et al., 2011) permet, sur un prototype de la taille d'une université, d'évaluer les apports en gain de consommation sur le poste HVAC. Au niveau des bâtiments industriels, (Mukherjee et al., 2010) étudie la coordination et la répartition de la consommation énergétique au sein d'un datacenter. Les résultats présentés montrent qu'une coordination fine entre les équipements peut amener une réduction de consommation pouvant aller jusqu'à 18% par rapport à une gestion simpliste de l'énergie. Ces modèles et évaluations de performance permettent de comprendre en quoi l'investissement nécessaire à l'installation de CPS peut être profitable sur du moyen ou long terme.

En plus de vendre des produits physiques, les entreprises de production commencent depuis quelques années à rivaliser pour offrir des services liés au produit tout au long de son cycle de vie. Dans ce contexte, les CPS notamment apportent des opportunités inédites dans le marché des services, et tout particulièrement dans le marché traditionnel de la maintenance/réparation/révision (Herterich et al., 2015). Il y a donc de plus en plus de perspectives dans la servitisation de l'utilisation des CPS (Mikusz, 2014), très bien illustré par (Lee et al., 2014) grâce à l'exemple de l'entreprise Komatsu présenté Figure 14. Cette entreprise vend de la disponibilité de véhicules utilitaires lourds pour le forage et la construction. Ils ont donc installé sur chaque véhicule un CPS de prognostic et surveillance du composant moteur afin d'évaluer et prédire la durée de vie restante avant nécessité de remplacement. Grâce à ce système, l'entreprise peut à la fois anticiper un maximum de pannes et donc augmenter le temps de disponibilité de leurs équipements et retarder au maximum le changement de ces moteurs afin d'optimiser le coût d'équipement.

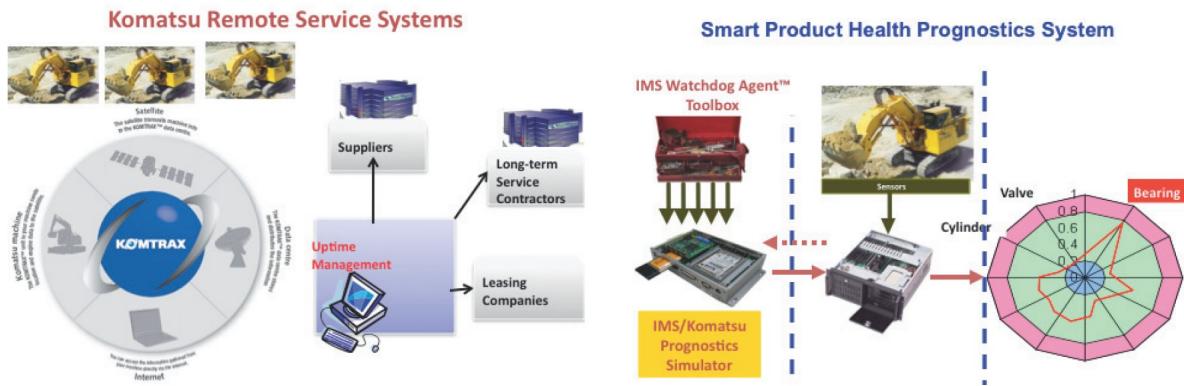


Figure 14 Servitisation des CPS version Komatsu (Lee et al., 2014)

Dans le domaine de la logistique, les CPS peuvent également avoir un impact important, en facilitant l’implémentation de fonctions de contractualisation décentralisée entre partenaires de la supply chain (Lanza et al., 2013). Par exemple, un réseau de CPS avec un élément chez chaque partenaire permettrait de mettre en commun les informations permettant une gestion adéquate des approvisionnements (prévisions de vente, niveaux de stocks, etc.) en évitant des effets tels que le Bullwhip Effect par exemple, tout en conservant la confidentialité recherchée par chacun des partenaires. Un effort est également fait pour essayer de développer un modèle non seulement applicable aux grandes entreprises mais aussi aux TPE/PME (Rudtsch et al., 2014).

1.3 Projets internationaux traitant des CPS

À ce jour, plusieurs initiatives à l’échelle mondiale tentent de répondre aux besoins inhérents au développement des CPS. Parmi ces initiatives, on peut citer :

- Intelligent Manufacturing Systems : IMS est un programme d’innovation, de recherche et développement international, dirigé par l’industrie ayant pour objectif le développement des technologies futures de production au travers de collaborations multilatérales. IMS fournit des services globaux aux institutions des régions partenaires (Union Européenne, Mexique, Afrique du Sud, USA)⁷ ;
- Horizon 2020 : H2020 est l’instrument de financement d’Europe 2020 concernant les projets ayant pour objectif de sécuriser la compétitivité de l’Union Européenne⁸ ;
- Factories of the Future : Partenariat Public-Privé fondé à partir du 7^e programme de recherche de l’Union Européenne (FP7) comprenant environ 150 projets⁹ ;
- Electronic Components and Systems for European Leadership : Partenariat Public-Privé à destination des industries des systèmes électroniques. ECSEL opère depuis 2014 pour 10 ans, remplaçant les projets ENIAC et ARTEMIS-JU pour la nano-électronique et les systèmes embarqués¹⁰ ;

⁷ www.ims.org

⁸ ec.europa.eu/programmes/horizon2020/

⁹ ec.europa.eu/research/industrial_technologies/factories-of-the-future_en.html

¹⁰ ec.europa.eu/digital-agenda/en/time-ecsel

- EIT Digital : EIT Digital est une organisation européenne pour l'innovation, dont la mission est d'encourager l'innovation et l'entreprenariat autour des technologies digitales au travers d'un partenariat entre 130 entreprises, PMEs, start-ups, universités and instituts de recherche européens¹¹ ;
- Programme CPS : Ce programme, soutenu par le NSF américain, a pour objectif de développer les connaissances de base nécessaires pour la conception de CPS complexes aptes à être utilisés par des humains, notamment en mettant en place une communauté dédiée à la fois à la recherche et à l'éducation autour des CPS¹² ;
- Industrial Internet : Le consortium Internet Industriel (IIC) a été fondé en 2014 pour rassembler les organisations et technologies nécessaires pour accélérer la croissance d'Internet Industriel en identifiant et faire la promotion des meilleures pratiques¹³ ;
- Advanced Manufacturing Partnership 2.0 : Fondé en 2011, les USA ont commencé une série de discussions au niveau national et d'actions entre les secteurs publics et privés pour préparer la future évolution de la production industrielle, activités qui ont été finalement regroupées sous l'intitulé Advanced Manufacturing Partnership¹⁴ ;
- Industry 4.0 : Ce groupe de travail a été initié en Allemagne par le KOMMUNIKATION Promoters' Group de l'Industry-Science Research Alliance (FU) fin 2011. Son objectif est d'esquisser des recommandations stratégiques globales pour l'implémentation du projet « Industry 4.0 », conçu à partir de la stratégie Haute Technologie du gouvernement allemand d'abord vers l'informatique, puis vers la production manufacturière ;
- Collaborative Research Centre 653 "Gentelligent Components in Their Lifecycle" : Depuis 2005, groupé en 17 sous-projets en 5 domaines de recherche, des chercheurs de la Leibniz Universität Hannover et du Laser Centre Hannover (LZH Hannover) développent les technologies nécessaires au développement des composants mécaniques futurs.

Au sein de ces initiatives, et des autres non citées dans ce document, plusieurs projets pluriannuels ont été lancés sur la thématique (non-exclusive) des CPS. Les Table 1, Table 2 et Table 3 présentent respectivement les projets nationaux en Europe, les projets hors Europe et les projets à l'échelle européenne. Bien entendu, le panorama des projets n'est probablement pas exhaustif, mais le nombre de projets présentés permet de tirer quelques enseignements intéressants.

Tout d'abord, la Table 1 présente les projets développés au plan national en Europe. Cette table regroupe ainsi pour la France tous les projets ANR, FUI, CPER, etc. Seulement deux projets français ont pu être listés : l'un qui utilise les CPS dans un process de conception beaucoup plus large (EONAV) et l'autre développé par le LAAS, dans ce qui constitue tout autant un projet de laboratoire qu'un projet de recherche traditionnel. Les thématiques abordées majoritairement tournent autour des transports, et notamment les systèmes autonomes mobiles. Dans ce pano-

¹¹ www.eitdigital.eu

¹² www.nsf.gov/funding/pgm_summ.jsp?pims_id=503286

¹³ www.iiconsortium.org

¹⁴ www.whitehouse.gov/sites/default/files/microsites/ostp/PCAST/amp20_report_final.pdf

rama, et bien que quelques projets ont été écartés de cette liste du fait de leur envergure réduite, l'Allemagne a bien évidemment une position prédominante, issue de sa stratégie volontariste Industrie 4.0. De ce fait, l'ensemble des contributions traitent des problématiques de l'implémentation des CPS en atelier de production.

Table 1 Projets CPS nationaux européens

Acronyme	Date	Pays	Eléments de contexte	Domaines d'application
ADREAM	2010 - ?	France	Architectures dynamiques reconfigurables pour systèmes embarqués autonomes mobiles. Développé au LAAS de Toulouse avec la construction d'un bâtiment à énergie positive et intelligence ambiante dédié (Arlat et al., 2014)	Energie, Transport
CyProS	2012 - 2015	Allemagne	« CyberPhysical Production Systems » - Amélioration de la productivité et de la flexibilité en mettant en réseau des systèmes intelligents en atelier (Bergweiler, 2015) Projet FUI « Exploitation Optimisée des NAVires » - Le projet Eonav mettra à la disposition des armateurs et des équipages un outil d'aide à la décision permettant de réduire les consommations d'énergie à bord des navires et leurs rejets atmosphériques. Une partie du projet a été dédié à la méthodologie de conception de CPS dans le cadre de la construction de bateaux (Bernard and Chenouard, 2014; Larroudé et al., 2013)	Production
EONAV	2010 - 2014	France		Transport
Intelligent Technical Systems Ost-Westfalen-Lippe	2012 - 2017	Allemagne	174 partenaires publics/privés conduisent des recherches dont le composant-clé est le SmartFactoryOWL, une usine prototype d'environ 2000m ² visant à implémenter les CPS dans un cadre de production manufacturière (Paelke and Röcker, 2015)	Production
MSM7088352102	2005 - 2011	République Tchèque	Modélisation et Contrôle des procédures de traitement de Polymères Synthétiques et naturel – Une partie de ce projet a concerné la commande de systèmes hydrauliques (Klimeš, 2014)	Production
Planning and monitoring of shape cutting manufacturing processes based on inherent part information	2005 - ?	Allemagne	Sous-projet K2 du CRC 653: une partie de ce projet traite du data mining dans l'environnement big data d'un atelier CPS (Denkena et al., 2014)	Production
RES-COM	2012 - 2014	Allemagne	« Resource Conservation by Context-Activated M2M-Communication » : Création de scénarios prototypes pour évaluer l'efficacité de ressources contextualisées sont implantées au moyen de systèmes dotés de capteurs et d'actionneurs intégrés et connectés (Bergweiler, 2015)	Tous types
Smart Tools	N/A	Allemagne	Une plateforme de capteurs modulaire pour CPS orientés-services est développée pour faciliter l'incorporation de technologies de capteurs de la littérature dans un moule d'injection (Schuh et al., 2014a)	Production

Enfin, la Table 3 présente les projets européens, qui se trouvent être soit issus du FP7 du CORDIS, soit financés par l'EIT Digital. Dès 2008, le projet CONET a introduit les notions CPS sur le plan technologique, mais c'est à partir de 2012 que des projets ont réellement pris corps directement axés sur les CPS. La thématique Infrastructures est particulièrement portée par l'EIT Digital. En ce qui concerne l'Union Européenne, et dans la même mesure que dans les projets nationaux des pays européens, la thématique d'application est clairement axée sur la production manufacturière. Ce constat est intéressant, car cela ne concorde pas vraiment ni aux axes de recherche mis en avant au niveau mondial et exprimés dans les sections précédentes, ni aux projets menés aux USA.

Déploiement des Systèmes Cyber-Physiques

Table 2 Projets CPS internationaux hors UE

Acronyme	Date	Pays	Eléments de contexte	Domaine d'application
ActionWebs	N/A	USA	Pour améliorer la coordination entre de multiples centres de décision, ce projet développe une théorie appelée « ActionWebs », qui utilise des systèmes stochastiques hybrides pour identifier les interactions entre dynamiques continues et états finis des éléments considérés, visant les bâtiments intelligents et le trafic aérien. Ce projet a donné lieu au développement d'un cosimulateur hybride (Broman et al., 2015), CyPhySim, mêlant simulations à événements discrets et classique (Runge-Kutta) (Brooks et al., 2015),	Infrastructures, Transport
Addressing Design and Human Factors Challenges in Cyber Transportation Systems	N/A	USA	Les objectifs de ce projet sont doubles. Le premier (Wagh et al., 2014) est d'évaluer les applications de CPS de transport par rapport aux questions de trafic et sécurité. Le second (Zhao et al., 2014) est de développer un simulateur implémentant ces notions de trafic, afin de tester les algorithmes de détection, et notamment travailler sur la diminution de la probabilité d'occurrence de fausses alarmes (Qiao et al., 2010).	Transport
Architecture and Distributed Management for Reliable Megascale Smart Grids	N/A	USA	Construire un framework pour les smart grids de manière à supporter la pénétration des ressources d'énergie renouvelable et apporter une flexibilité dans le déploiement d'applications Plug&Play (He et al., 2011)	Energie
Assuring the Safety, Security and Reliability of Medical Device Cyber Physical Systems	2010-2015	USA	Concevoir un nouveau paradigme de développement pour la conception et l'implémentation de CPS médicaux sûrs (Lu et al., 2014)	Santé
ATS	N/A	USA	« Autonomous Transportation Systems » - Développer et implémenter des CPS intra-véhiculaires pour le contrôle autonome des véhicules (Azimi et al., 2014; Kim et al., 2013).	Transport
Dependability Techniques for Instrumented Cyber-Physical Spaces	2010-2013	USA	Développer les fondations sémantiques, une architecture multicouche et les services d'adaptation pour améliorer la fiabilité des CPS dans des environnements instrumentés.	Tous types
Enabling and Advancing Human and Probabilistic Context Awareness for Smart Facilities and Elder Care	2010 – 2013	USA	Permettre aux CPS d'être conscients du contexte humain de l'environnement et d'utiliser les données stochastiques issues des capteurs.	Santé
Establishing Integrity in Dynamic Networks of Cyber-Physical Devices	2009-2013	USA	Développer des techniques énergétiquement efficaces pour des réseaux dynamiques de CPS	Tous types
Foundations of Cyber-Physical Networks	2009-2012	USA	Etudier les fondations, méthodologies, algorithmes et implantations de réseaux cyber-physiques pour les applications médicales.	Santé
Foundations of Secure CPS	2011-2015	USA	Trouver des motifs répétitifs de mouvement et en déterminer les activités des CPS	Tous types
LoCal	N/A	USA	« A Network Architecture for Localized Electrical Energy Reduction, Generation and Sharing » - Exploiter l'information ambiante pour optimiser la production, utilisation et distribution d'énergie (Katz et al., 2011).	Energie
Monitoring Techniques for Safety Critical CPS	2010-2013	USA	Optimiser la surveillance de CPS en termes de temps de réponse, coût et efficacité de la sécurité obtenue.	Tous types
Study of Security Countermeasure for CPS	2010-2013	USA	Incorporer des techniques de trafic temps-réel dans le service de sécurité, améliorant à la fois les capacités temps-réel et la sécurité du système en environnement hostile.	Tous types
The Cyber-Physical Challenges of Transient Stability and Security in Power Grids	2011-2014	USA	Développer de nouveaux principes d'ingénierie cyber-physique en se concentrant sur les instabilités de l'énergie électrique	Energie
Towards Robust CPS	2010-2013	USA	Développer les fondations théoriques, définir la notion et concevoir les méthodes et outils de CPS robustes.	Tous types

Table 3 Projets CPS à l'échelle de l'Europe

Acronyme	Date	Eléments de contexte	Domaines d'application
ARUM	2012-2015	« Adaptive Production Management » : L'objectif principal d'ARUM est d'améliorer de manière significative les performances opérationnelles et économiques de la mise en production et des productions en petits lots. (Leitao et al., 2015)	Production
CONEt	2008-2012	« Cooperating Objects Network Of Excellence » : Le consortium CONET travaille à établir une communauté forte dans le domaine des objets coopérants, incluant la recherche et les secteurs publics et industriels.	Tous types
cPAS	2014- ?	« Cyber-physical Production Assistance System » : Utiliser les CPS comme lien entre la production et la supply chain	Production
CPS integrated information engineering	2014- ?	Créer des opportunités et un business model grâce à l'intégration de l'information au travers du développement et de la production de CPS	Tous types
CPS for Smart Factories	2014- ?	Implémenter des contrôleurs CPS multi-adaptatifs pour améliorer la détection d'anomalies dans des domaines d'application industriels (robotique, assemblage, acieries) (Bergweiler, 2015)	Production
CyPhERS	2013-2015	« Cyber-Physical European Roadmap and Strategy » : combiner et étendre la compétence de l'Europe en informatique embarquée, mobile et connectée (Gengarle et al., 2013)	Transport, Energie, Santé, Production, Infrastructures
GRACE	2012-2015	« InteGration of pRocess and quAlity Control using multi-agEnt technology » : implémentation d'un système intégré de contrôle et de suivi qualité basé sur les produits intelligents, où une solution multi-agent a été testée dans une usine de machines à laver (Leitão et al., 2015).	Production
IMC-AESOP	2010-2012	« ArchitecturE for Service-Oriented Process - Monitoring and Control » : Définition d'une approche orientée-services pour les futurs systèmes Supervisory Control and Data Acquisition - SCADA (Colombo et al., 2014).	Production
Intelligent integrated critical infrastructures for smarter future cities	2014- ?	Solutions innovantes pour le contrôle et la surveillance intelligents des environnements (naturels et construits) (Dall'Ora et al., 2014)	Infrastructures
Reference Communication & Application Platform	2014- ?	Conception d'une plateforme de référence pour la communication entre services connectés entre voitures et services de transport intelligents	Infrastructures
Reliable IP for time synchronized channel hopping network	2014- ?	Développer des communications fiables basées sur IP depuis l'essaim de CPS jusqu'au cloud pour infrastructures critiques	Infrastructures

1.4 Bilan

Les CPS sont considérés par de nombreuses institutions nationales ou internationales comme le moyen technologique permettant de mettre en œuvre la prochaine révolution sociétale et industrielle, permettant de modifier en profondeur la société et le bien-vivre de la population. Les domaines d'application potentiels de ces systèmes sont nombreux, mais la littérature scientifique montre que les applications principalement étudiées le sont au niveau :

- des transports avec les véhicules autonomes ;
- de l'énergie avec le futur réseau intelligent smart grid ;
- de la santé avec l'amélioration de la sécurisation des procédures de surveillance et de traitement ;
- des infrastructures avec les bâtiments intelligents ;
- de la production manufacturière avec les systèmes de production agiles.

Les axes de recherche recensés montrent un intérêt particulier actuellement autour des méthodologies innovantes de conception à mettre en place pour ce type de systèmes (Lee, 2008), de la technologie à développer pour augmenter la puissance et la performance des sys-

tèmes et de la cyber-sécurité pour permettre une dissémination à moindre risque de la technologie dans la société.

Au niveau européen, l'accent est mis sur les applications des CPS au niveau de la production manufacturière. L'impact de ces technologies sur le renouveau industriel se décline en Systèmes de Production Cyber-Physiques (CPPS). Le chapitre suivant a pour objectif de présenter ce concept en détails et les différents axes de recherche qui y sont directement ou indirectement liés.

Chapitre 2. Introduction aux Systèmes de Production Cyber-Physiques

Le chapitre précédent a permis de mettre en avant l'intérêt porté aux CPS dans le monde académique, à la fois par les applications et la réponse aux appels à projets faites par les équipes partout dans le monde. Parmi ces applications, les systèmes manufacturiers ont été petit à petit mis en avant, au point de devenir au cours des années un enjeu majeur dans le développement des systèmes industriels futurs. Récemment, le concept de système de production cyber-physique (CPPS) a été introduit et devrait permettre dans les années à venir de centraliser les développements réalisés autour de ce concept, qui étaient jusqu'ici traités de manière éparses.

L'objet de ce chapitre est de présenter un état de l'art sur les développements récents autour des CPPS, d'identifier les axes de recherche actuels et de proposer une réflexion sur l'apport de la communauté française dans ce domaine sur les dix dernières années et notre positionnement vis-à-vis de cette dynamique.

2.1 Définition

La définition la plus communément admise et qui sera également retenue dans ce document est celle proposée par (Monostori, 2014). A partir de la définition de CPS, il spécifie par rapport au contexte de la production qu'un « *CPPS consiste en entités et sous-systèmes autonomes et coopérants, connectés au travers d'une relation contextualisée, au sein et au travers de tous les niveaux de la production, du process aux réseaux logistiques* » (Figure 15).

Selon (Rudtsch et al., 2014), les bénéfices pouvant être attendus de l'utilisation des CPPS sont de plusieurs ordres :

- Optimisation des process de production, dans lesquels chaque entité autonome a des capacités cognitives, permettant de détecter l'évolution des contraintes de l'environnement et ainsi adapter sa configuration dans une zone d'application dont elle a conscience ;
- Optimisation de la personnalisation des produits par une composition intelligente de systèmes de production individuellement optimisés, sous des considérations d'objectifs tels que les propriétés des produits, le coût, la fiabilité, le délai, etc. ;
- Production efficiente au niveau des ressources utilisées par la minimisation des allocations de ressources imparfaites ;
- Recentrage des process de production sur l'humain, avec des machines s'adaptant aux capacités et aux instructions de l'opérateur.



Figure 15 Vision synthétique de l'organisation d'un CPPS selon (L. Wang et al., 2015)

Tous ces objectifs opérationnels soulèvent de nombreuses questions et pistes de réflexion sur les prérequis à l'implémentation à large échelle des CPPS.

Outre les thématiques de technologie de réseau ou de cybersécurité, la question fondamentale est l'exploration des relations existant entre les entités, que ce soit sur des critères d'autonomie, de coopération, d'optimisation ou de réactivité (Monostori, 2014). L'utilisation d'outils de prévision du comportement émergent de l'architecture va ainsi probablement devenir de plus en plus centrale dans l'évaluation de la réponse du CPPS à un événement inattendu (Cardin et al., 2015; Monostori, 2014). Une question importante est également soulevée au niveau de la gestion du Big Data (Lee et al., 2013) issu de la surveillance des procédés et de l'environnement rendue possible par la dissémination des facultés de perception dans des réseaux de capteurs, qui sont souvent la base du réseau de communication du plus bas niveau de l'architecture. Enfin, de nouveaux modes de communication entre l'humain et la machine doivent être établis (Monostori, 2014), que ce soit au niveau de la communication directe au travers d'ordres ou d'informations, ou bien la mise en forme et la présentation de données structurées d'un haut niveau afin d'augmenter la richesse et la complexité des interactions (Pirvu et al., 2015).

La section suivante propose de faire une étude sur les développements récents publiés autour de ces questions.

2.2 Axes de recherche autour des CPPS

En préambule de cette section, il est nécessaire de préciser que les travaux présentés dans cette section se focalisent sur la thématique stricte des CPPS. L'état de l'art proposé est donc relativement succinct, étant donné que la thématique n'est apparue que très récemment. La section suivante proposera une étude sur l'état de l'art de ces questions dans des thématiques connexes à celle des CPPS, qui viendra donc en complément de ce qui suit. Quatre axes de recherches ont été mis en avant, allant du plus proche de l'opération de production au point de vue plus éloigné relatif à l'agilité des organisations.

2.2.1 Amélioration des procédés et équipements

Au sein des procédés de production, le premier procédé historiquement étudié a été l'assemblage. En effet, les procédés d'assemblage reposent généralement sur des technologies de préhension relativement simples et existantes, donc plutôt aisées à mettre en œuvre. La problématique qui est associée est celle d'assemblage adaptatif, autrement dit d'assemblage prenant en compte la géométrie réelle des produits à assembler, et non leur géométrie nominale. De tels procédés sont aisément illustrables par un fuselage d'avion, cylindre réalisé en matériau composite, qui, lorsqu'il est démoulé en posé sur les palettes de manutention, se déforme sous son propre poids jusqu'à obtenir une section ovale. La problématique est de réussir à assembler deux parties différentes d'un fuselage (tronçon central et pointe avant par exemple) qui n'ont pas la même déformation. Pour cela, deux solutions sont utilisées : soit les pièces sont conformées, c'est-à-dire que leur géométrie est contrainte par des éléments presseurs, ce qui ne garantit pas de performances optimales de l'assemblage en termes de précision lorsque la contrainte se relaxe, soit on utilise des technologies type Laser Tracker afin d'identifier la géométrie réelle des éléments et corriger en temps réel les processus d'assemblage à réaliser.

Bien évidemment, ces processus de recalage sont actuellement longs et coûteux, et ne sont réservés qu'à des pièces à très forte valeur ajoutée et à faible cadence. Toutefois, il est possible de retrouver ces mêmes problématiques dans un environnement industriel en grande série. Par exemple, des travaux ont porté sur l'assemblage d'un pion de centrage dans un alésage par robot industriel, que l'on retrouve dans la littérature sous le nom de « peg-in-hole problem ». La Figure 16 illustre ce problème par l'une des solutions proposée récemment de robotisation de l'assemblage (Abdullah et al., 2015). Les travaux portent plus largement sur la prise en compte par les CPPS de données provenant de mesures (type Laser par exemple) à haute cadence pour corriger la trajectoire d'insertion du pion par le robot ou pour choisir le pion ayant les caractéristiques dimensionnelles appropriées pour réaliser de l'appairage (Lanza et al., 2015).

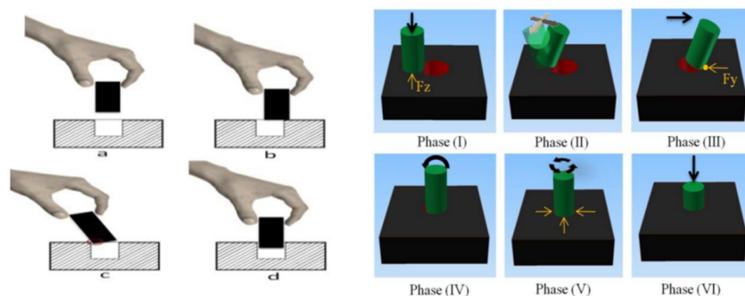


Figure 16 « Peg-in-hole problem » : insertion robotisée d'un pion de centrage guidée par les efforts et les couples (droite) pour reproduire les étapes humaines (gauche) (Abdullah et al., 2015)

Des développements ont été également réalisés sur l'utilisation des CPPS pour la génération automatique de programmes de fabrication. Ces programmes ont là encore été validés sur des robots d'assemblage (Michniewicz and Reinhart, 2014), mais la finalité est bien d'étendre ces fonctionnalités à tout type de machine de production (assemblage, enlèvement de matière, ajout de matière, etc.). L'idée est de travailler directement à partir du modèle géométrique du produit final sur CAO, et de générer automatiquement les tâches nécessaires à l'assemblage sans prendre en compte les capacités exactes de chaque CPPS (Michniewicz and Reinhart, 2015). Ce n'est qu'ensuite que les CPPS vont s'accorder sur la faisabilité ou non des tâches selon leurs capacités, la répartition des tâches entre chacun et la génération des programmes. La Figure 17 présente la cellule robotisée cyber-physique qui a servi de démonstrateur pour des process de désassemblage. Les zones rouges représentent les zones d'évolution des robots, chaque robot a à sa disposition plusieurs pinces selon la géométrie du produit récupérée depuis la CAO et les convoyeurs servent à l'alimentation en produits à désassembler (1-3) ou à leur évacuation (4).

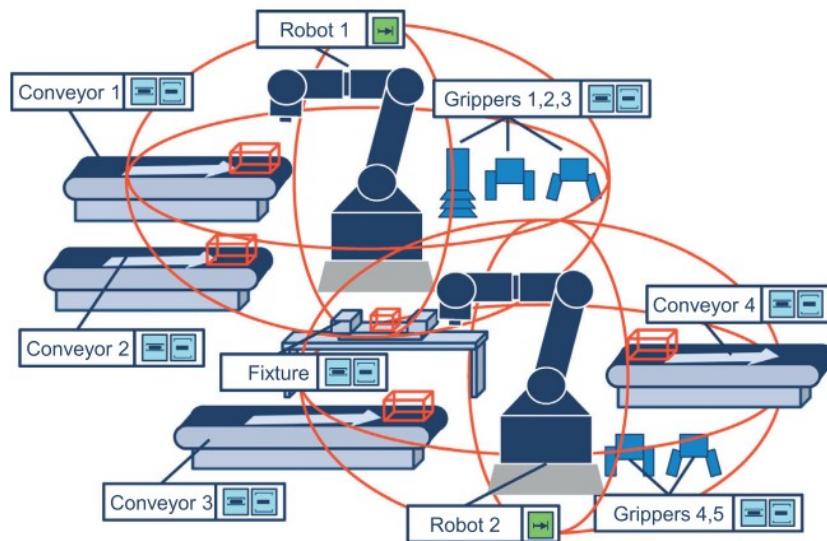


Figure 17 Cellule robotisée cyber-physique (Michniewicz and Reinhart, 2015).

2.2.2 Gestion du Big Data en atelier

L'implémentation de CPPS en atelier donne l'opportunité d'utiliser un plus grand nombre de capteurs et détecteurs, ce qui implique la conception de stratégies (logicielles ou matérielles) de gestion de ces données.

Cette thématique se rapproche de celle du Big Data très étudiée à l'heure actuelle dans la communauté. (Denkena et al., 2014) utilise par exemple des outils de Data Mining sur l'ensemble des données de l'atelier pour une planification des process en ligne se basant sur les connaissances extraites. Les données considérées dans ces travaux sont relatives à la qualité des produits usinés et à l'état capabilités des machines et outils. Ainsi, disposant d'informations à jour sur la capacité des moyens de production, une association est déterminée entre les tolérances des process à réaliser et les moyens à disposition afin d'optimiser le placement des ordres de fabrication sur les moyens en terme de qualité finale obtenue.

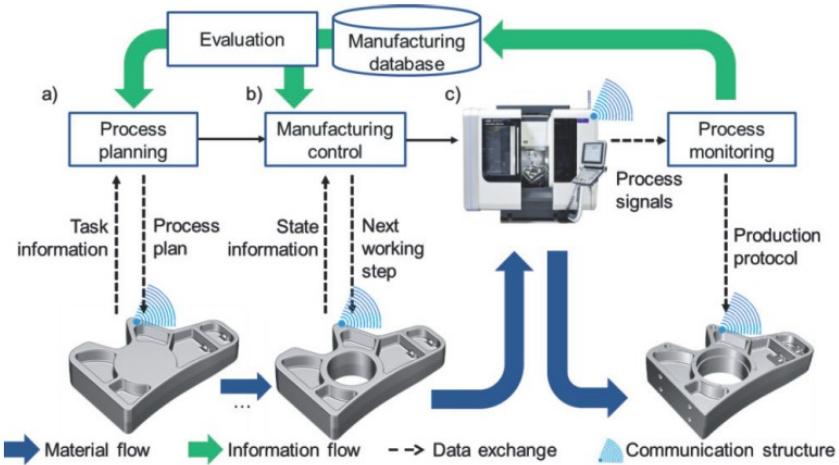


Figure 18 Planification de process basée sur les connaissances (Denkena et al., 2014).

Ces informations peuvent également être utilisées dans un objectif de maintenance. (Lee et al., 2013) proposent un modèle cyber-physique (Figure 19) basé sur une infrastructure décentralisée dans le cloud et permettant de déterminer en ligne les meilleures stratégies de maintenance prédictive des équipements à partir de relevés de mesure effectuées directement sur les machines. L'élément principal de cette infrastructure est un agent « chien de garde » (*watchdog*) qui a pour objectif de traiter les grandes masses de données pour en retirer de la connaissance relative à la santé des équipements. Cette génération de connaissance est très dépendante des algorithmes utilisés, c'est pourquoi des algorithmes type « Machine Learning » tels que l'analyse topologique sont étudiés dans le cadre d'études sur les CPPS (Spezzano and Vinci, 2015).

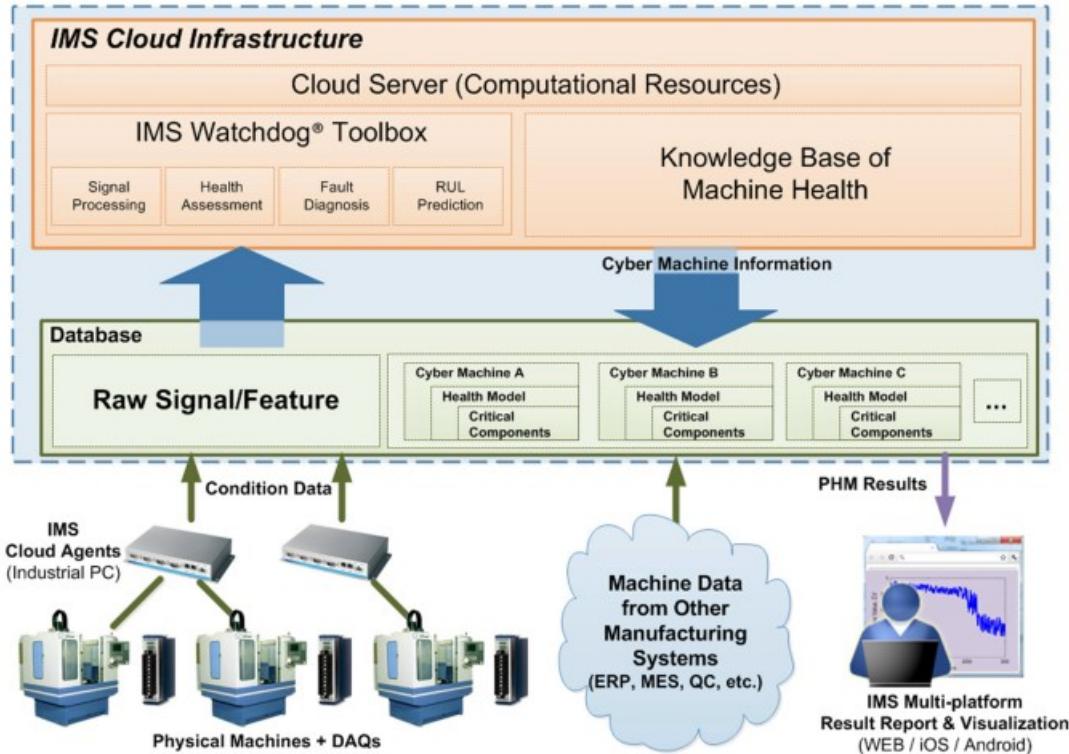


Figure 19 Modèle cyber-physique de système de production prédictif (Lee et al., 2013).

Dans la même veine, l'idée est également de pouvoir générer automatiquement la documentation technique au travers des remontées d'informations de tous les éléments de l'entreprise (Barthelmey et al., 2014), avec pour objectif de les intégrer dans la planification de l'atelier, que ce soient les machines, l'outillage ou les éléments de transferts de produits. Le cloud est également porteur d'opportunités dans le cadre du contrôle des CPPS. Ainsi, le transfert total de la commande des machines dans le cloud (Verl et al., 2013) avec pour objectif de proposer une commande des machines telle un service (Machine Control as a Service – MCaaS) (Schlechtendahl et al., 2014) ont été proposés. Cette perspective est intéressante, car elle amène l'utilisation de la connectivité des CPPS à un niveau supérieur, cohérent avec la définition des CPS suggérée précédemment (Monostori, 2014).

2.2.3 Intégration au contexte de coopération avec l'humain

Les objectifs d'intégration des systèmes a évolué dans les quelques dernières années, passant d'un modèle où le système devait être capable de s'adapter automatiquement et être doté de capacités de raisonnement et de prise de décision visant à remplacer celles de l'humain à un modèle où les CPPS se recentrent sur des scénarios d'utilisation impliquant pleinement l'humain. Ainsi, (Dworschak and Zaiser, 2014) définissent deux scénarios possibles sur l'utilisation des CPPS.

Dans le premier scénario (appelé *Automation scenario*), l'humain est guidé par le CPPS, c'est-à-dire que la prise de décision globale est réalisée par le CPPS et que l'humain réalise l'opération en tant que telle. C'est également un humain qui est responsable de la mise en place et de la maintenance des CPPS. Ce scénario correspond peu ou prou à une transposition à un contexte en ligne et orientée production en flux tiré des fonctions classiques de planification et d'ordonnancement telles que l'on peut les rencontrer actuellement en industrie. Ce scénario s'adaptera probablement bien aux ateliers impliquant une forte activité manuelle ou semi-automatisée dans un environnement de production visant une flexibilité importante. Un exemple du bassin ligérien sont les EMS (Electronic Manufacturing Services) ou ODM (Original Development Manufacturer - concepteur et fabricant de matériels d'électronique sur cahier des charges clients) développant des services industriels en électronique professionnelle. Les séries sont petites, le nombre de postes différents nécessaires à la réalisation des produits est relativement restreint, mais la gamme des produits est systématiquement différente. Petit à petit, ce type d'entreprise intègre la culture Lean à leur production, mais nul doute qu'une utilisation pertinente des CPPS apportera dans les années futures une plus-value à ce type de production.

Le second scénario (*Tool scenario*) met l'humain au cœur de la boucle de décision. L'idée est que le CPPS soit guidé par un humain initié à la coopération avec le CPPS, tout en participant activement à la prise de décision en assistant l'humain. Ce scénario s'adaptera ainsi parfaitement aux activités où les opérations seront partiellement ou totalement automatisées, mais où l'expertise de l'opérateur apportera une plus-value non-négligeable en termes d'adaptabilité et d'augmentation de la qualité notamment. Le bassin industriel ligérien a par exemple une grosse activité dans le domaine du composite en aéronautique. A la fin des opérations de drapage et d'assemblage des grands ensembles, une opération difficile et fastidieuse consiste à poncer le plan de joint du matériau jusqu'à obtenir le même effet miroir que ce que l'on peut obtenir sur les surfaces en contact avec le gel-coat. Outre les notions de compliance des efforts qui rendent la tâche difficile à automatiser, la géométrie de la zone et le contrôle qualité avant d'éventuelles retouches se reposent entièrement sur l'expertise humaine car les critères physiques mesu-

rables n'ont pas encore été correctement identifiés. Une coopération pleine et entière entre l'humain qui assigne les tâches et le CPPS qui les réalise donnera des résultats très intéressants dans un futur proche.

Que ce soit pour le premier ou le second scénario, c'est bien la combinaison des capacités de calcul des CPPS et des facultés de communication avec l'humain qui permettent l'augmentation des performances du système de coopération. Des frameworks tels que HilCP2sC (Human-in-the-Loop Cyber-Physical Production Systems Control) sont ainsi en train de se développer (Gaham et al., 2015), afin de fournir la possibilité d'intégrer les préférences de l'humain dans un contexte de prise de décision multi-objectifs menée par le CPPS. Plus qu'un framework, il est probablement indispensable de modifier le paradigme de conception des systèmes de production distribués, en utilisant des modèles de référence de CPPS anthropocentriques tels que ceux proposés par (Zamfirescu et al., 2014) ou (Pirvu et al., 2015) par exemple.

Quel que soit le scénario vers lequel les entreprises vont tendre, il y aura inévitable une évolution des tâches et donc des qualifications et compétences des opérateurs (Dombrowski and Wagner, 2014) en charge de la coopération avec les CPPS. En parallèle, la formation (initiale et professionnelle) de ces opérateurs devra également s'adapter afin de leur permettre notamment d'augmenter leurs compétences en résolution de problèmes, d'avoir une conscience plus accrue de l'interdépendance des process dont ils sont l'un des maillons et de prendre des initiatives encadrées d'auto-organisation en cas de perturbation du fonctionnement nominal du process.

2.2.4 Agilité des organisations

Les bienfaits des CPPS sont évidemment également étudiés du point de vue de l'organisation même de la production, et souvent considérés comme l'un des leviers principaux pour la hausse de la productivité de ces organisations (Schuh et al., 2014c).

A un niveau local tout d'abord, les CPPS s'avèrent précieux pour toutes les activités de planification, contrôle et surveillance. Un dispositif expérimental pédagogique de l'Institute of Production Systems and Logistics (IFA) d'Hanovre a par exemple montré l'impact de ces technologies sur la mise à jour des dates de livraison des ordres de fabrication en temps réel (Seitz and Nyhuis, 2015). Les CPPS, couplés à des technologies multi-agents, ont également été utilisés pour démontrer la possibilité d'améliorer l'utilisation de moyens de production hétérogènes et redondants (Vogel-Heuser et al., 2014) ou l'amélioration de la planification des activités de maintenance avec l'architecture CPS4MRO développée par (Trentesaux et al., 2015). Les perspectives mises en avant intègrent de plus en plus l'intégration d'outils de simulation pour la prévision à court terme du comportement émergent de ce type de systèmes, comme par exemple le projet allemand ProSense (Schuh et al., 2014b).

Au niveau de l'assemblage, il est envisagé que l'utilisation de facultés avancées sur chaque composant de l'assemblage, par exemple en utilisant des technologies telles que les réseaux de capteurs sans fil (Wright, 2014) permettrait d'améliorer l'efficacité de l'organisation. Le même constat a été fait au niveau plus large de la logistique, avec par exemple une étude ayant montré un gain potentiel de plus de 50% en kilomètres parcourus sur les planifications en ligne de tournées de véhicules par rapport à un système expert (Harjes and Scholz-Reiter, 2014).

L'aspect collaboratif s'exprime aussi au niveau multi-entreprise. La notion de Systèmes de systèmes cyber-physiques a ainsi été proposée dans le cadre d'un framework collaboratif entre CPPS (Nazari et al., 2015). Le projet européen FP7 IMC-AESOP (Colombo et al., 2014) a également contribué à définir les fondations d'une production collaborative, notamment en avançant

dans l'utilisation des architectures orientées-service (SoA), fixant un objectif aux alentours de 2025 pour une généralisation des outils. Cette généralisation passe nécessairement par une standardisation des protocoles et interfaces, commencée par IMC-AESOP et poursuivie par des projets tels que le projet européen FP7 ARUM (Leitao et al., 2015). Néanmoins, des études remettent en cause le fait que les SoA puissent convenir à toutes les couches du contrôle des systèmes (Morgan and O'Donnell, 2015), même si en parallèle les notions de Cloud Manufacturing ont été largement mises en avant, avec (Wang, 2008) en précurseur du couplage CPPS-technologie cloud.

Cette section a mis en avant les quelques axes de recherche actuels identifiés autour des CPPS. Le constat qui peut être fait est que le nombre de thématiques abordées est relativement large pour un volume de travaux relativement faible. Toutefois, il convient de remarquer que du point de vue thématique, la notion de CPPS hérite de beaucoup de travaux connexes réalisés notamment au cours des deux dernières décennies autour de la thématique générale des systèmes de production dits « intelligents ».

2.3 Un concept traité diffusément

Cette notion d'intelligence a particulièrement été mise en avant depuis la mise en œuvre de la classification proposée par (Wong et al., 2002) lors de travaux sur l'intelligence ou de l'activité du produit (Sallez, 2014) et largement acceptée depuis au sein de la communauté. L'idée était de classer les produits actifs en fonction de leurs capacités en deux niveaux d'intelligence, mais cette classification a eu comme écho majeur de définir des niveaux qui sont transposables à d'autres entités que les simples produits.

Le programme IMS (Intelligent Manufacturing Systems) est bien entendu un symbole international de cette tendance par sa précocité. L'objectif était de résoudre, dans certaines limites, des problèmes jamais rencontrés ou envisagés sur la base d'informations à la fois incomplètes et imprécises. Les outils d'intelligence artificielle et d'auto-apprentissage automatisé ont bien évidemment joué un rôle important dans la démarche IMS (Wuest, 2015).

2.3.1 Contexte international

Dans la section 1.3, nous avons présenté un ensemble d'initiatives proposant régulièrement des appels à projet relevant de la communauté CPS. Ceux-ci révèlent un intérêt croissant de la communauté internationale pour les systèmes industriels de prochaine génération.

La programmation de l'Union Européenne se base sur quatre paradigmes à long terme sensés guider les transformations vers lesquels l'industrie européenne tend à évoluer selon la Manufacturing Vision 2030 (EFFRA, 2013) : usine et environnement (développement durable); usine en bon voisinage (proche de l'opérateur et du client) ; usine au sein de la chaîne de valeur (collaborative) ; usine et humains (centrée sur l'humain). Depuis ces objectifs, plusieurs verrous scientifiques ont été identifiés :

- comment les technologies de l'information et de la communication peuvent-elles être utilisées par les opérateurs pour augmenter l'efficience de leur travail quotidien ;
- comment les technologies cloud peuvent-elles impacter la production ;

- comment la production manufacturière peut-elle devenir un levier d'amélioration du bien-être de la société ;
- comment améliorer les process de recyclage et intégrer les notions de développement durable dans la production manufacturière.

Plusieurs programmes, principalement articulés autour de FoF (Factory of Future) ou SPIRE (Sustainable Process Industry) et dans une moindre mesure EEB (Energy-efficient Buildings), coordonnent les efforts scientifiques et industriels dans ces différentes directions.

De manière similaire à l'Europe, le « *recovery plan* » lancé aux USA intègre un chapitre spécifique intitulé « Production et travail durable », qui établit un fond spécifique pour le développement des technologies et stratégies avancées de production. Afin de permettre l'implantation opérationnelle de ce programme, le « *Council of Advisors on Science and Technology* » a suggéré de soutenir d'importantes initiatives de recherche dans les secteurs manufacturiers liés au développement de nouvelles technologies et la conception de méthodologies de production de produits et matériaux hautement innovants (Anderson, 2011). Le NIST a également énoncé plusieurs défis au sein d'une feuille de route générale incluant les CPS. Récemment, un groupe de travail public sur les CPS¹⁵ a été mis en place de manière à encourager les activités autour de ce concept. Ce groupe a été décomposé en sous-groupes, définissant ainsi une trame de la vision américaine sur les systèmes industriels du futur, dont nous pouvons extraire les 4 les plus emblématiques :

- Définition d'un vocabulaire commun et d'une architecture de référence des CPS ;
- Interopérabilité entre les données ;
- Cybersécurité et vie privée ;
- Cas d'études.

En France, l'Agence Nationale de la Recherche (ANR¹⁶) édite chaque année une feuille de route intitulée « Stimuler le Renouveau Industriel » au sein de son plan d'action générique. Cette feuille de route est dérivée de la Stratégie Nationale de Recherche¹⁷. Depuis 2010, une vision systémique de l'industrie a pris forme, traitant le concept d'Usine Système, connectée à une supply chain globalisée, en parallèle du développement de technologies pour l'utilisation d'usines virtuelles. Tout comme le NIST, l'accent est porté sur les usines intelligentes et connectées, incluant des sujets tels que les modèles d'information génériques et la cybersécurité. Enfin, la flexibilité et l'agilité des systèmes sont étroitement connectées au développement de process et technologies innovantes et efficientes. Le projet “Factory of the Future” a également été approuvé par le Comité Interministériel de Planification Economique (CIPE) du Programme Nationale de Recherche (PNR) italien. Le PNR a mis en place d'importantes actions de recherche orientées vers le développement de technologies et de secteurs industriels innovants, le soutien d'industries existantes avec pour objectif d'améliorer leur efficacité et leur compétitivité et soutenir les nouvelles entreprises de haute technologie¹⁸. La feuille de route pour l'initiative straté-

¹⁵ www.cpspwg.org

¹⁶ www.agence-nationale-recherche.fr/fileadmin/aap/2016/ANR-Plan-Action-2016-details-defis.pdf

¹⁷ www.enseignementsup-recherche.gouv.fr/cid78802/strategie-nationale-de-recherche-bilan-des-travaux-des-10-ateliers.html#atelier3

¹⁸ www.miur.it/UserFiles/3239.pdf

gique allemande « Industrie 4.0 »¹⁹, ActionPlanT, a établi dans le cadre d'Horizon 2020 une vision des systèmes de production futurs, au sein de laquelle les innovations-clés ont pour objectif de rendre possible les cinq ambitions majeures des entreprises européennes : à la demande, optimales, innovantes, durables et centrées sur l'humain. Cette vision va plus loin que l'atelier et met l'accent sur l'entreprise membre d'un réseau de partenaires collaborant au sein d'une supply chain globalisée. Basée sur les concepts de CPS, d'Internet of Things et de l'Internet des Services, Industrie 4.0 définit une vision de l'Entreprise Intelligente (Lee et al., 2015). Les feuilles de route asiatiques, en particulier provenant de Chine, ne sont pas disponibles à la consultation traduite, ce qui explique leur absence dans cette analyse.

La Table 4 classe ces feuilles de route internationales vis-à-vis des axes principaux qu'elles mettent en avant. Plusieurs conclusions peuvent être tirées de cette étude comparative. Tout d'abord, on peut remarquer que même si différentes terminologies sont utilisées, ces différentes feuilles donnent une vision assez cohérente et identique à la fois des objectifs et des moyens d'atteindre ces objectifs. De plus, les objectifs d'innovation peuvent être classifiés en trois axes majeurs de développement, relativement stables quelle que soit la feuille de route étudiée au travers de la dernière décennie.

Table 4 Feuilles de route internationales liées aux CPPS

Axes Feuille de route	Technologie		Développement durable		Agilité		
	Cyber-sécurité	Process avancés	Humain & Société	Durabilité	Interopérabilité / collaboration	Enterprise en réseau	Modèle d'information
EU		X	X	X	X	X	
NIST	X			X	X		X
ANR	X	X			X	X	X
PNR		X	X	X			
ActionPlanT		X	X	X	X	X	

Le premier axe est le développement de technologies avancées pour la production. L'idée de proposer de la haute technologie dans les procédés de fabrication est supposée avoir dans un futur proche un impact important sur les systèmes de production de prochaine génération. Les tendances actuelles se focalisent sur les structures à échelle nanométrique, la fabrication additive (e.g. le projet PHOCAM- Photopolymer-based Customized Additive Manufacturing Technologies) ou les matériaux intelligents (e.g. projet AMITERM(Parton and Verpoest, 2005)). Tous ces process ont la particularité d'être de plus en plus connectés, ce qui implique des notions de cyber-sécurité qui sont présentes de manière transversale dans de nombreux projets.

Le second axe traite de la production durable. De manière à diminuer l'impact de la production sur l'environnement, une première idée est d'augmenter l'efficience énergétique des procédés, comme dans des projets tels que Co2PE! (Cooperative effort on Process Emissions in manufacturing)(Kellens et al., 2011a, 2011b), DAPhNE (Development of Adaptive ProductioN systems for Eco-efficient firing processes), EEM (Energy Efficient Manufacturing) ou Factory Ecomation (Factory ECO-Friendly and energy efficient technologies and adaptive automation solutions). Une seconde idée est de développer les concepts de cycle de vie en boucle fermée (Closed-Loop PLM) dans le contexte d'une supply chain dynamique (e.g. PROMISE (Jun et al.,

¹⁹ www.actionplant-project.eu

2007)). L'objectif est d'être capable d'identifier, extraire et réutiliser des composants utiles de matériels obsolètes ou dysfonctionnant pour diminuer l'impact environnemental de la conception et de la production de nouveaux équipements (e.g. projet SuPLIGHT: Sustainable and Efficient Production of Lightweight Solutions). La place des humains dans les nouveaux ateliers est également étudiée, car il est nécessaire de concevoir les futurs environnements dans lesquels les opérateurs humains et les nouvelles technologies pourront évoluer dans une totale coopération. L'objectif est d'arriver à créer des systèmes de production centrés sur l'humain, tel que l'illustre parfaitement le projet SO-PC-PRO (Subject-Orientation for People-Centred Production), étudier les implantations respectives de chaque élément, avec par exemple MAN-MADE (MANufacturing through ergonoMic and safe Anthropocentric aDaptive workplacEs for context aware factories in Europe), et toute la phase d'entraînement virtuel des opérateurs, avec VISTRA (Virtual Simulation and Training of Assembly and Service Processes in Digital Factories).

Enfin, le troisième axe de développement vise l'agilité des systèmes, i.e. des systèmes collaboratifs, mobiles, intelligents et adaptatifs. Ils sont censés être capables de changer, se reconfigurer et évoluer rapidement au cours du temps, selon la demande du marché. Beaucoup de travaux sont dédiés à l'interopérabilité de ces systèmes, dans un contexte de production ouvert (e.g. ACMN – Automation Competency Model Network ou LinkedDesign – Linked Knowledge in Manufacturing, Engineering and Design for Next-Generation Production), ou à la personnalisation de masse, de l'atelier à la supply chain comme par exemple MIGOOGDS (Manufacturing Intelligence For Consumer Goods: Fit4U, SShoes, A-Footprint). Enfin, le besoin de systèmes reconfigurables et flexibles s'exprime au travers de concepts tels que l'intelligence distribuée, les agents industriels ou les produits intelligents. Des projets tels que ARUM (Leitao et al., 2013; Stellingwerff and Pazienza, 2014), PABADIS (Lüder et al., 2004), GRACE (Matthias et al., 2013) ou encore ERRIC (Giuseppe et al., 2012) ont montré de grandes avancées dans l'introduction des technologies et paradigmes distribués/holoniques/multi-agents en contrôle manufacturier. La Table 5 présente quelques éléments-clés sur d'autres projets remarquables suivants ces axes de développement.

Table 5 Autres projets internationaux relevant des axes de développement identifiés

Acronyme	Date	Axe			Eléments de contexte
		1	2	3	
IADP	2011	X			Amélioration de la phase de conception de systèmes automatisés
ISMA	2011	X			Matériaux durables connectés avec capteurs embarqués
MANUELA	2012	X			Systèmes de production hautement efficaces en ressources
SuPLIGHT	2011		X		Écoconception globalisée
DiFAC	2012		X		Environnement de production collaboratif
IProSPER	2015		X		Production économique en énergie et durable
INET	2011		X		Réseaux de production non hiérarchiques
NGMS	2011		X		Usine digitale
ADDFACTOR	2013		X		Conception centralisée basée sur les connaissances et production locale distribuée

Ces trois axes de recherche permettent de classifier assez simplement les efforts de recherche au niveau international. Cette classification sera conservée lors des sections suivantes, que ce soit pour le positionnement national ou le positionnement de nos travaux vis-à-vis de cette thématique.

2.3.2 Positionnement de la communauté française

Dans ce contexte, la communauté française mène de nombreux travaux dans le domaine du contrôle manufacturier. L'activité est actuellement structurée principalement autour des activités du groupe de travail IMS² du GDR MACS²⁰. Notre activité s'inscrit pleinement dans cette direction et s'insère dans le cadre de recherche collaborative national décrit dans cette section. En cela, la création et l'animation du groupe IMS² au niveau strictement national et la dynamique créée autour du workshop SOHOMA avec la communauté roumaine tout d'abord puis avec de nombreux partenaires européens ont joué un rôle prépondérant dans l'orientation des travaux présentés ci-dessous.

Initialement, ces travaux ont démarré autour du projet transversal « Systèmes contrôlés par le Produit ». De ce fait, ils se situent principalement au niveau de l'axe Agilité identifié précédemment (Table 6). Les notions de haute technologie ne sont étudiées que par le prisme de l'organisation des systèmes de production et sont donc peu représentées. Ces notions sont par contre traitées d'un point de vue process par d'autres communautés, notamment autour de groupes tels que Manufacturing'21²¹ ou le GDR Robotique²² par exemple. La communauté n'a démarré les questions autour de la durabilité des systèmes de production que depuis quelques années, ce qui explique le peu de références sur le sujet. Toutefois, la tendance est clairement à l'augmentation dans les années à venir au regard des thématiques actuellement développées au sein des laboratoires concernés.

Table 6 Analyse du positionnement de la communauté française

Axes	Positionnement	Nombre de références	Articles de référence
Technologie	+	<10	(El Haouzi et al., 2009; Gamboa Quintanilla et al., 2013a; Pach et al., 2012; Pujo et al., 2015)
Durabilité	++	<10	(Ounnar et al., 2013; Pach et al., 2014b; Thomas and Trentesaux, 2014)
Agilité	++++	>80	(Cardin and Castagna, 2009; Klein et al., 2011; Pach et al., 2014a; Pujo et al., 2009)

L'activité est principalement concentrée autour de quatre laboratoires, et un certain nombre d'autres intervenant ponctuellement selon les opportunités. Ces laboratoires ont la particularité d'avoir leur activité structurée autour du développement et de l'exploitation de plateformes expérimentales permettant de souligner les apports des approches proposées (Berger et al., 2010; Ounnar et al., 2004). Ces plateformes (illustrées Figure 20) représentent 4 jobshops et 1 flowshop permettant une production flexible et reconfigurable, et ont été conçues initialement lors de travaux qui à cette époque se concentraient sur le Produit Intelligent (Herrera et al., 2011; Huet et al., 2013; Pannequin and Thomas, 2012; Trentesaux et al., 2013a; Trentesaux and

²⁰ <http://www.univ-valenciennes.fr/gdr-macs/node/4416>

²¹ <https://sites.google.com/site/manufacturing21>

²² <http://www.gdr-robotique.org>

Thomas, 2012), autrement dit sur l'activité du produit lors de sa production (Sallez, 2014; Yves Sallez et al., 2010; Sallez et al., 2009a). Ces ateliers sont tous construits autour de boucles de convoyeurs transportant les produits sur des palettes entre 3 à 12 machines, manuelles, robotisées ou automatisées. L'intelligence est soit embarquée sur la palette (puces RFID (Cardin and Castagna, 2011; Dubromelle et al., 2014), processeur embarqué (Y. Sallez et al., 2010), puces Arduino (Gamboa Quintanilla et al., 2013a), réseau de capteurs sans fils (Pujo et al., 2015)) ou même directement sur le produit (puces RFID directement noyées dans le matériau bois ou textile par exemple (Kubler et al., 2013)).

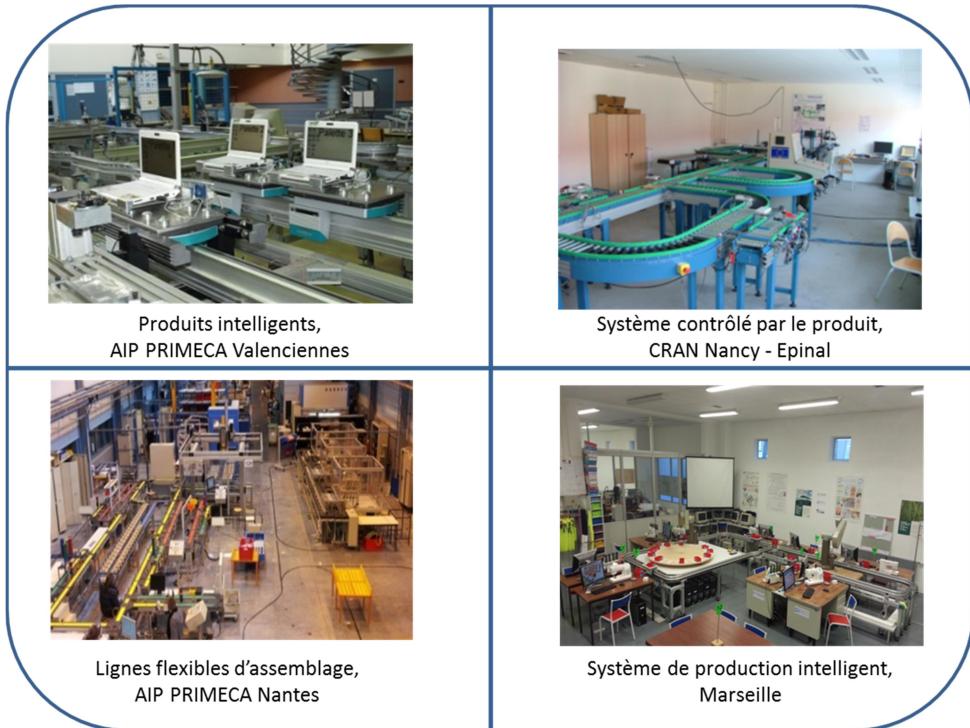


Figure 20 Plateformes expérimentales de la communauté française.

Ce paradigme a été rapidement étendu vers le développement d'architectures de contrôle hétérorarchiques (Aissani et al., 2008) utilisant peu à peu les outils conventionnels de l'informatique (et plus tard du web) pour leur application à l'informatique industrielle. La conception de ces architectures a naturellement mené à la question de la prise de décision, qui a été traitée de différentes manières, que ce soit par des approches stigmergiques (Pannequin and Thomas, 2009; Sallez et al., 2009b), des champs de potentiel (Berger et al., 2010), des méthodes d'aide à la décision multicritère (Ounnar et al., 2007) ou de la négociation via des protocoles tels Contract Net (Borangiu et al., 2014). La communauté s'est emparée du concept de systèmes de production holoniques (HMS), dérivé des résultats du projet IMS Holonic Manufacturing Systems de la fin des années 90. De par cette prise en main tardive de l'outil, la communauté s'est plutôt focalisée sur une implémentation efficace des HMS, ce qui explique la très forte activité au niveau de l'axe Agilité, avec notamment des résultats remarquables dans la définition d'architectures de référence, où des travaux comme ORCA-FMS (Pach et al., 2014a), PROSIS (Pujo et al., 2009) ou ADACOR² (Barbosa et al., 2015) se sont faits une place aux côtés des architectures classiques telles que PROSA (Van Brussel et al., 1998), ADACOR (Leitão and Restivo, 2006), HCBA (Chirn and McFarlane, 2000) ou D-MAS (Verstraete et al., 2008).

L'évaluation de performances des architectures et approches proposées tient une grande part dans l'activité de la communauté. Tout d'abord, un travail sur le développement d'émulateurs a été mené, que ce soit à partir de langages informatiques tels que Java ou de simulateurs tels NetLogo, Witness ou Arena (Berger et al., 2015; Herrera et al., 2014; Klein and Thomas, 2007; Pannequin et al., 2009). Un benchmark, dénommé Bench4Star (Trentesaux et al., 2013b), a également été développé. Ce benchmark, en accord avec l'une des résolutions de l'IFAC Technical Committee 5.1, est basé initialement sur la plateforme AIP PRIMECA de Valenciennes mais a pour objectif de s'adapter aux autres plateformes précédemment citées. Ce benchmark remplit un manque de la communauté dans la définition d'instances permettant une réelle comparaison des performances entre les différentes approches, et devrait ouvrir de belles perspectives dans les années à venir.

Cette évaluation a également été menée par le biais d'implémentations industrielles de ces concepts dans des industries locales ayant des problématiques de gestion d'un comportement dynamique complexe pour lequel les outils classiques d'ordonnancement ne donnaient généralement pas de solution satisfaisante. Parmi les applications les plus marquantes, nous pouvons relever :

- L'implémentation d'un MES holonique dans une usine de fabrication de vitres de voitures sécurisées en Amérique Latine (Blanc et al., 2008) à l'IRCCyN qui constitue un CPS : {C3 ; Manufacturing ; Tool ; Ethernet} ;
- La gestion du comportement dynamique des procédures d'ordonnancement de la maintenance d'industries pétrochimiques en collaboration entre l'Algérie et le LAMIH : {C3 ; Manufacturing ; Tool ; Ethernet} (Aissani et al., 2009) ;
- Le développement d'un outil de contrôle d'un système de traitement de surface de pièces aéronautiques à l'IRCCyN : {C3 ; Manufacturing ; Tool ; Ethernet} (Chové et al., 2009) ;
- La surveillance temps-réel et l'aide au diagnostic d'un système de transport complexe au LAMIH : {C4 ; Transportation ; Tool ; Ethernet} (Le Mortellec et al., 2013).

Si l'industrie a été le domaine d'application préférentiel de la communauté, ses activités se diversifient peu à peu et trouvent des applications de plus en plus nombreuses dans le domaine médical (Huet et al., 2013) ou encore en logistique, où l'implémentation d'intelligence directement sur les produits donne des résultats encourageants à plusieurs niveaux (Brahim-Djelloul et al., 2013), et où des concepts novateurs tels que l'Internet Physique (Crainic and Montreuil, 2016; Pach et al., 2014c; Sallez et al., 2016) peuvent se développer et amener une réelle plus-value.

2.4 Bilan

La notion de système cyber-physique de production est relativement récente, et donc relativement peu traitée dans la littérature. Toutefois, l'évolution du nombre de références constatées au cours des dernières années montre un intérêt réel et croissant de la communauté internationale pour ce sujet. L'analyse que l'on peut faire de cet intérêt est que la notion de CPPS arrive à fédérer beaucoup de concepts et idées traitées auparavant plus ou moins indépendamment autour d'une même terminologie. De ce fait, de nombreuses équipes se retrouvent autour

de la notion de CPPS alors que les domaines scientifiques étaient précédemment relativement cloisonnés.

Au niveau français, la notion de CPPS n'a pas encore été pleinement intégrée par la communauté. Toutefois, les thèmes de recherche abordés par des groupes tels qu'IMS² dans le GDR MACS sont pleinement ancrés dans la thématique, et nos travaux s'ancrent également pleinement dans celle d'IMS². La section suivante a pour objectif de détailler ces travaux et montrer en quoi ils constituent un préalable à des travaux ciblés sur les CPPS dans les années à venir.

Chapitre 3. Contributions scientifiques principales

Ce chapitre expose nos principales contributions scientifiques et les résultats obtenus suivant les trois axes majeurs définis lors de la synthèse précédemment décrite. Ces travaux ont été réalisés au sein de l'équipe ACSED (Analyse et Commande des Systèmes à Evénements Discrets) de l'IRCCyN. Cette équipe a depuis sa création (1998) une identité affirmée sur deux thèmes (parmi d'autres) que sont la simulation de flux et le développement de plateformes expérimentales automatisées à l'échelle 1. Au fur et à mesure des travaux qui sont décrits dans ce document, un thème relevant du pilotage des systèmes de production a pris corps, ce qui a amené l'équipe à être rebaptisée PSI (Pilotage de Systèmes Industriels) à partir de 2017 au sein du LS2N (Laboratoire des Sciences du Numérique de Nantes). Des compétences en termes de recherche opérationnelle ont été insérées dans certains de ces travaux, notamment grâce à l'apport de membres de l'équipe SLP (Systèmes Logistiques et de Production) de l'IRCCyN, concourant à la naissance de travaux communs qui ont vocation à perdurer et s'intensifier.

De manière générale, une grande partie des résultats présentés ont été obtenus grâce à la mise en place graduelle de collaborations locales, régionales, nationales et internationales. L'Annexe 1 propose des présentations détaillées des thèses de doctorat soutenues (3) et en cours (1) qui seront présentées dans ce document. La notion de collaboration prend ici tout son sens puisque, au travers des conditions de chacune des thèses, on peut s'apercevoir que 2 d'entre elles sont des co-encadrements (avec Lorient et le Venezuela) et qu'une troisième est au sein d'un projet collaboratif avec un autre laboratoire de l'Université de Nantes.

Au niveau régional, le thème traitant de la simulation de flux nous a permis de répondre à certaines problématiques industrielles locales et ainsi approfondir notre connaissance des problématiques d'industries spécifiques comme l'aéronautique dans le bassin ligérien notamment. Cela nous a également donné la possibilité de nouer une collaboration solide avec le laboratoire Lab-STICC de Lorient au sujet des méthodologies de conception de modèles de simulation et avec le GEPEA de Saint-Nazaire au sujet de l'évaluation de performances énergétiques de systèmes industriels.

Le thème traitant du développement de plateformes s'inscrit dans le cadre de l'animation des plateformes au sein du projet transversal SCP (Systèmes Contrôlés par le Produit) du GDR MACS, qui est par la suite devenu le groupe de travail IMS², dont nous assurons l'animation générale depuis 2015 et pour lequel nous avons dressé récemment une roadmap des perspectives futures (Cardin et al., 2016). Une partie des travaux présentés ici provient de collaborations nationales ayant trait directement à cette dynamique nationale, et la plupart se positionnent directement vis-à-vis des travaux des laboratoires partenaires du groupe de travail, comme le chapitre précédent a pu l'illustrer.

Enfin, au niveau international, de fructueuses collaborations ont été établies avec l'Algérie et le Venezuela au travers de projets TASSILI et Ecos-Nord. Ces collaborations nous ont permis d'encadrer conjointement plusieurs étudiants sous la forme de coencadrements de thèse ou d'accueil de séjours longs durant la préparation du doctorat étranger, et qui ont été matérialisées par plusieurs publications communes (Cardin et al., 2012; Indriago et al., 2016a, 2016b, 2016c).

3.1 Développement de CPPS

Le premier axe que nous avons développé correspond au développement de technologies innovantes pour l'implémentation de CPPS. Ces travaux se déclinent en deux thèmes, l'un plutôt matériel avec le développement de plateformes expérimentales innovantes, alors que l'autre se concentre plutôt sur les méthodologies de conception d'un observateur à événements discrets, que nous considérons comme une brique élémentaire nécessaire dans l'objectif d'atteindre un CPPS de niveau C5.

3.1.1 Plateformes expérimentales

Comme indiqué précédemment, nos activités se sont basées pour nombre d'entre elles sur le développement de plateformes expérimentales à l'échelle industrielle. L'implantation de ces plateformes a systématiquement été réalisée dans le hall technologique de l'IUT de Nantes. De ce fait, l'objectif a toujours été double, à la fois de recherche et pédagogique pour les étudiants en logistique du département QLIO. Ceci constitue à la fois une contrainte évidemment en terme de disponibilité des moyens, mais surtout une opportunité car les plateformes sont utilisées à un taux plus élevé que traditionnellement, ce qui oblige à accentuer le degré de robustesse de développement nécessaire à la manipulation par des étudiants de niveau BAC+1 à BAC+3 et qui offre des opportunités plus larges en termes de financement des développements. Les résultats obtenus et présentés dans la suite de ce document ont sans nul doute bénéficié de cette situation.

3.1.1.1 *Ligne flexible d'assemblage*

La ligne flexible d'assemblage a été conjointement financée par l'IUT et L'Atelier Inter-établissement de Productique (AIP PRIMECA) des Pays-de-Loire, puis développée au sein du département QLIO. Ce système fait partie d'un ensemble de production plus large (Figure 21), comprenant un magasin dynamique automatisé AS/RS, et un ensemble de transport comportant deux chariots optoguidés. La finalité de cet ensemble est à la fois la formation des étudiants de l'IUT et la recherche. Ce système, de type job shop avec transferts automatisés, est composé de six postes de travail. Les produits sont transportés par 42 palettes se déplaçant sur des convoyeurs unidirectionnels. Un magasin de palettes (composé d'un convoyeur à accumulation) permet le stockage des palettes inutilisées.

Chaque palette est munie d'un système de stockage d'information type puce RFID, lui permettant de transporter les informations permettant de l'identifier (identification de la palette, du produit à fabriquer), d'informations de traçabilité (gamme réalisée, résultat des contrôles qualité, temps de traversée du système, temps opératoire, de transfert et de stockage) et sur son avenir (opérations restant à réaliser). Les palettes permettent le transfert de poste en poste des produits. Ceux-ci sont composés d'un empilement de quatre rondelles de couleur en bois sur une quille métallique (Figure 22).

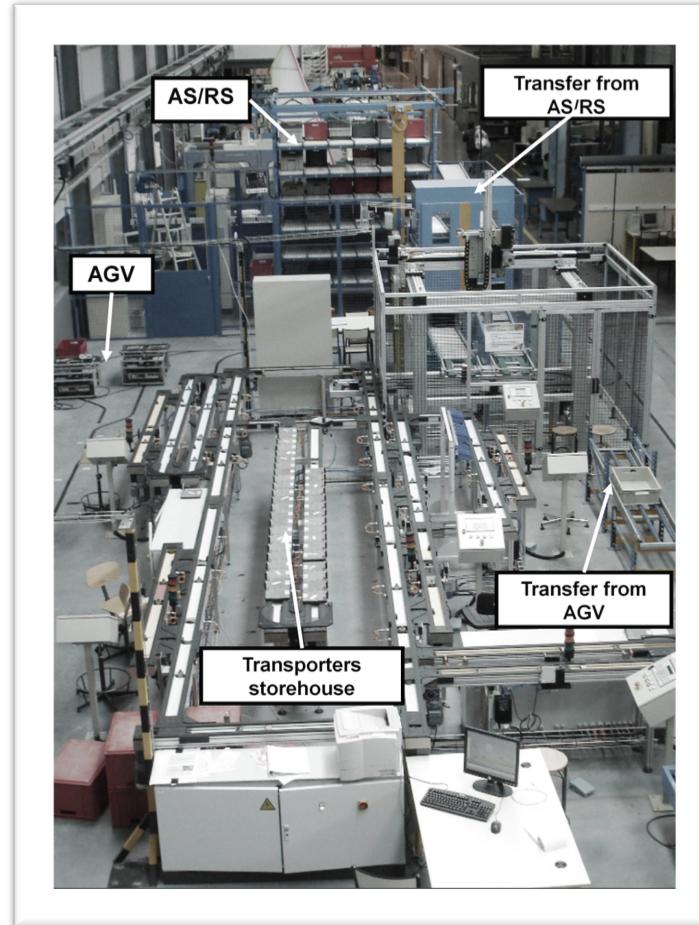


Figure 21 Intégration de la ligne flexible d'assemblage au sein du hall expérimental.

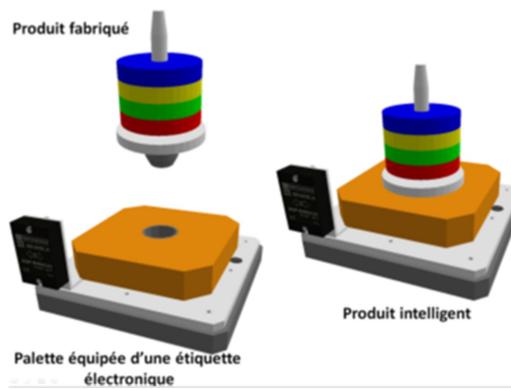


Figure 22 Produit fabriqué sur la ligne flexible d'assemblage.

La Figure 23 présente une représentation schématique de la ligne permettant de représenter les postes de travail et les points où des décisions sont prises concernant le produit. Sur le poste 1, un robot cartésien permet le chargement ou le déchargement de la palette et l'échange avec le magasin AS/RS. Les postes 2, 3 et 5 permettent le dépôt des rondelles colorées. Le poste 4 est un poste automatisé de contrôle qualité à base de vision, alors que le poste 6 est un poste manuel permettant une reprise des produits au cas où ce ne soit pas possible de le faire automa-

tiquement. Si les quilles métalliques sont automatiquement livrées au poste 1 via l'AS/RS, les rondelles sont, elles, livrées depuis l'AS/RS via le réseau d'AGV optoguidés disponible au sol.

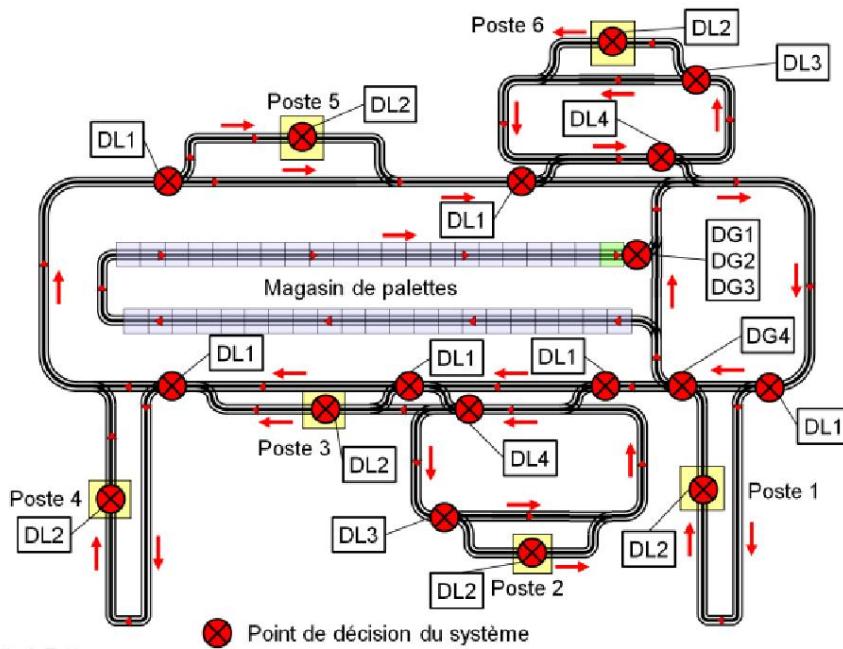


Figure 23 La ligne d'assemblage, avec ses points de décision.

Le pilotage fait largement appel au concept de pilotage par le produit et se situe au niveau d'intelligence 1 de la classification proposée par (Wong et al., 2002). Nous parlerons donc de système informé par le produit. Les palettes sont ici utilisées comme bases pour le transport et la communication des produits avec le système. De ce fait, la production d'un ordre de fabrication (OF) commence par l'union d'un produit avec une base. Cette union s'accompagne d'un échange d'informations entre le produit et sa base, comprenant un transfert partiel des informations relatives au produit à l'étiquette électronique disposée sur la base. Ces informations concernent la gamme du produit. En fin de production, les données du produit sont mises à jour pour permettre la traçabilité de la fabrication de celui-ci. Parallèlement, la base est réutilisée pour la fabrication du produit suivant, jusqu'au solde de l'OF où la palette retourne au magasin. Pour que cela soit possible, l'étiquette contient également des données relatives à la vie de la palette, indépendamment des produits qu'elle transporte.

Le produit pilotant se déplace ensuite sur la boucle centrale afin de trouver un poste de travail capable de réaliser la prochaine opération de la gamme du produit et à même de l'accueillir (en termes de capacité, de panne, etc.). Cette négociation est initiée par le produit à son arrivée à l'entrée du poste. La palette indique l'opération à réaliser. Le poste indique s'il sait faire l'opération et dans combien de temps il pourra traiter la palette. La commande du poste considère à la fois les informations qui lui sont relatives dans la base de données du MES, les données relatives au produit dans l'étiquette électronique et la règle implantée dans la commande pour prendre la décision de laisser rentrer le produit ou non dans le poste.

Ainsi, c'est le produit qui provoque les décisions le concernant durant son évolution sur la chaîne. On ne décide pas au préalable quel poste réalisera une opération, ni quand cette opération sera réalisée. C'est le cheminement du produit sur la ligne qui induira la prise de ces déci-

sions par les entités constituant le système. Lors du lancement d'un OF, l'entité « magasin » doit prendre trois décisions :

- DG1 : À quelle date sera lancé l'OF ?
- DG2 : À combien de produits de l'OF seront affectées chacune des palettes ?
- DG3 : Quelle priorité sera donnée à l'OF ?

Cette entité a de plus une décision à prendre en cours de production :

- DG4 : La palette se trouvant à l'entrée du magasin doit-elle y revenir ou doit-elle rester sur la boucle centrale ?

Lors du cheminement de la palette, les entités « poste » devront eux même prendre deux décisions :

- DL1 : Le poste doit-il prendre le produit qui se présente à l'entrée ?
- DL2 : En fin d'opération, le produit doit-il passer à l'opération suivante ou doit-il subir une opération additionnelle de retouche ?

Les stocks en amont des postes 1, 3, 4, et 5 ont une gestion qui est nécessairement en FIFO. Par contre, les stocks des postes 2 et 6 peuvent avoir une règle de gestion quelconque. Ainsi, ces derniers devront prendre deux décisions supplémentaires:

- DL3 : Le poste doit-il faire entrer dans la zone de travail le produit qui se présente ou doit-il le laisser dans le stock tampon ?
- DL4 : Le produit se trouvant dans le stock tampon doit-il y rester ou aller vers la boucle centrale ?

Ce système a permis d'initier les travaux menant à terme aux CPPS, en partant de la notion de produit actif au cours de sa production. L'objectif était à cette époque plutôt axée sur l'utilisation de la simulation à évènements discrets au sein du pilotage de ces systèmes (Cardin and Castagna, 2009). Relativement à la classification définie précédemment, ce système se situe dans la catégorie {C2 ; Tool ; Manufacturing ; Ethernet}.

3.1.1.2 Palette intelligente

La structure de la ligne d'assemblage étant remarquablement adaptée, nous avons ensuite procédé à de nouveaux développements afin d'essayer de porter ce système à un niveau {C3 ; Tool ; Manufacturing ; Zigbee}. Pour ce faire, nous avons conçu et réalisé ce que nous avons appelé une « Palette Intelligente » (Gamboa Quintanilla et al., 2013a), capable de se déplacer de manière autonome sur le système sans intervention physique extérieure. L'objectif (Figure 24) était d'intégrer des fonctionnalités de traitement de l'information directement au sein des entités mobiles, qui jusqu'ici n'étaient que des éléments inertes. Ainsi, les capacités de prise de décision concernant son avenir étaient déportées au sein de la palette, qui était donc dotée de capteurs et actionneurs lui permettant de détecter son environnement et d'interagir physiquement avec celui-ci (Figure 25). Au travers d'un réseau sans fil, les palettes peuvent dialoguer ensemble ou négocier avec la plateforme holonique (basée sur PROSA) disponible sur le réseau au travers du protocole Contract Net.

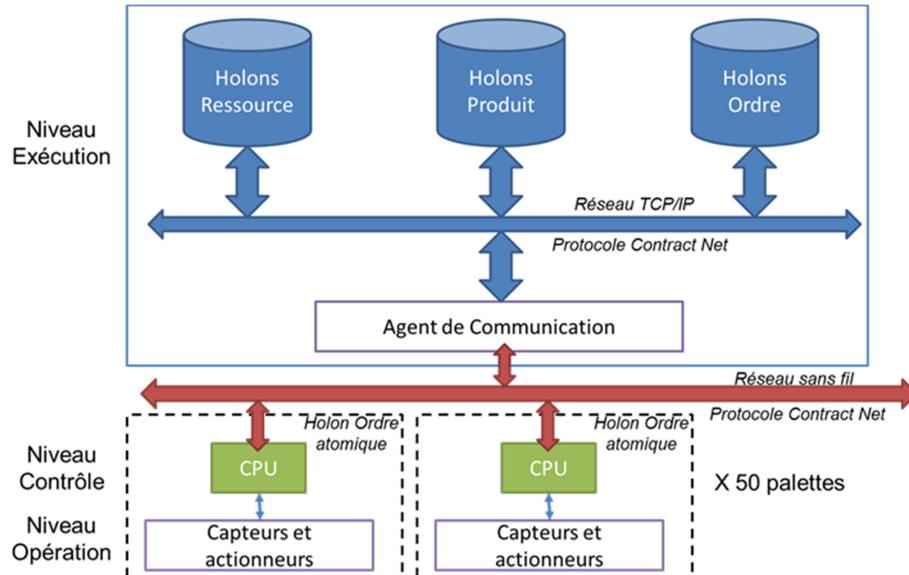


Figure 24 Architecture visée d'intégration de la palette intelligente.

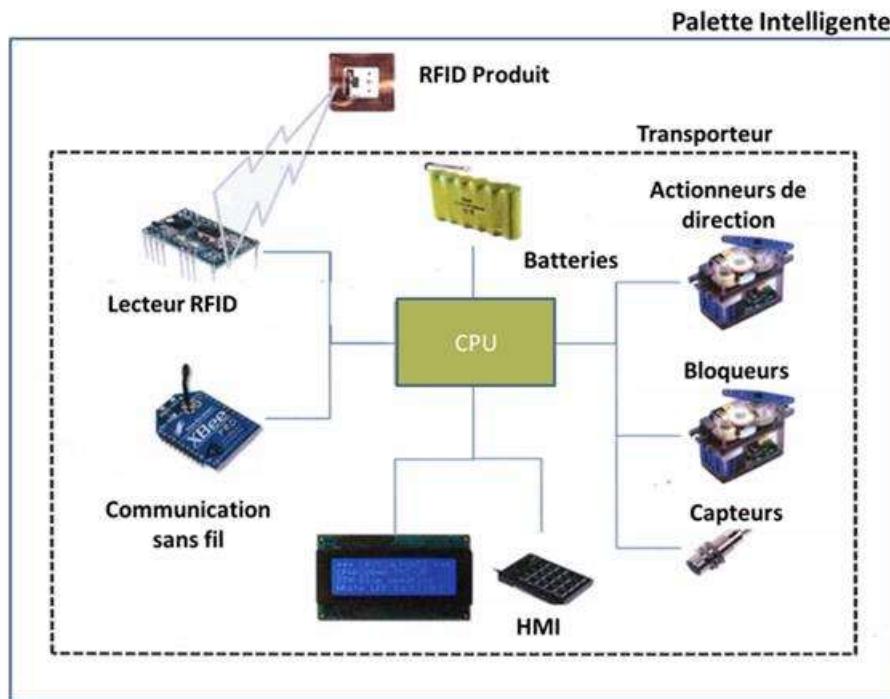


Figure 25 Vue fonctionnelle de la palette intelligente.

La palette a été réalisée au sein de l'IUT de Nantes (départements GMP, GEII et QLIO) au travers de projets étudiants et d'un stage de Master 2 Recherche (F. Gamboa Quintanilla). La palette finalement obtenue a été intégrée via un module Arduino et une communication sans fil type Zigbee entre les palettes et avec le système de contrôle. Des actionneurs de direction pilotés par électro-aimants permettaient de se déplacer en virage, alors que le bloqueur actionné par servomoteur permettait de s'arrêter aux différents points de prise de décision afin de détecter le changement de position de la palette dans le circuit.

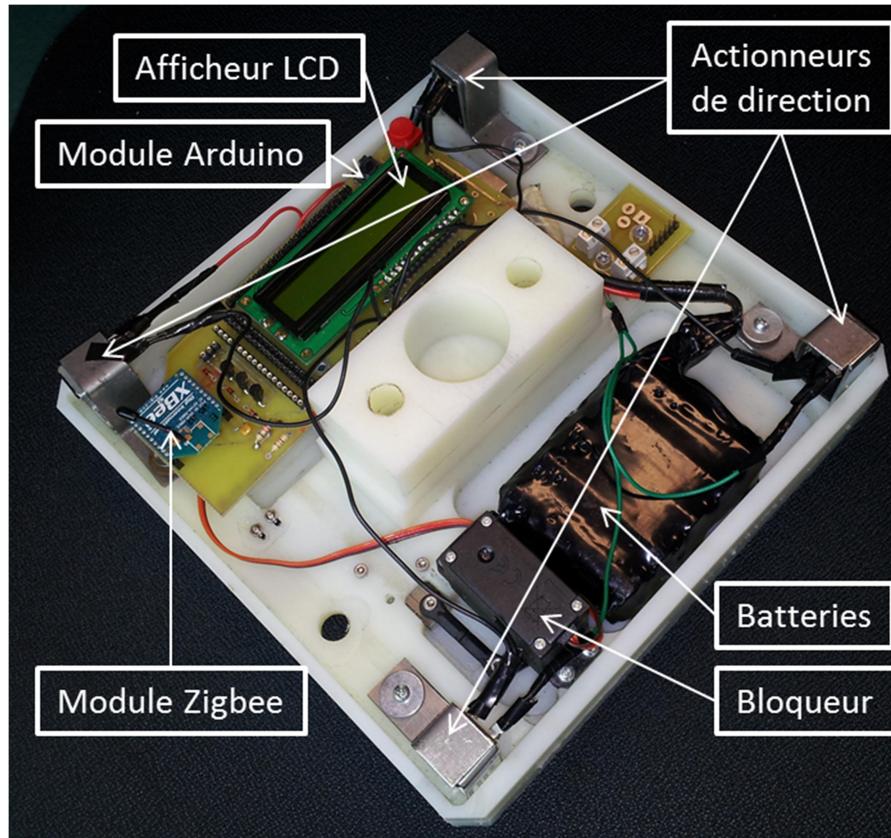


Figure 26 Structure interne de la palette intelligente.

Ce développement a été notre premier pas vers les CPPS en déportant physiquement l'intelligence et les capacités d'actuation vers l'élément agile du système. Relativement en avance de phase au niveau industriel, le projet n'a pas réussi à trouver encore d'écho auprès des entreprises partenaires contactées, ce qui a ralenti son développement.

3.1.1.3 SOFAL

SOFAL (Service-oriented Flexible Assembly Line) est une ligne d'assemblage située au sein de l'atelier de production du département QLIO de l'IUT de Nantes (Figure 27). Cette ligne a été construite autour d'un système de convoyeurs à segments recyclé de l'atelier de l'Ecole des Mines de Nantes. Quatre convoyeurs ont été disposés, munis de 3 systèmes de transfert entre convoyeurs (échangeurs) et de 3 systèmes de transfert entre les convoyeurs et les postes (feeders) comme indiqué sur la Figure 28. Sur ce convoyeur circulent environ 25 palettes, capables chacune d'accueillir un produit et de le transporter de poste de travail en poste de travail pour compléter sa production. A chaque poste de travail, l'AIP PRIMECA, le laboratoire IRCCyN et l'IUT de Nantes ont installé un robot de type Pick&Place dédié à la manipulation de blocs Lego.



Figure 27 Vue d'ensemble de SOFAL.

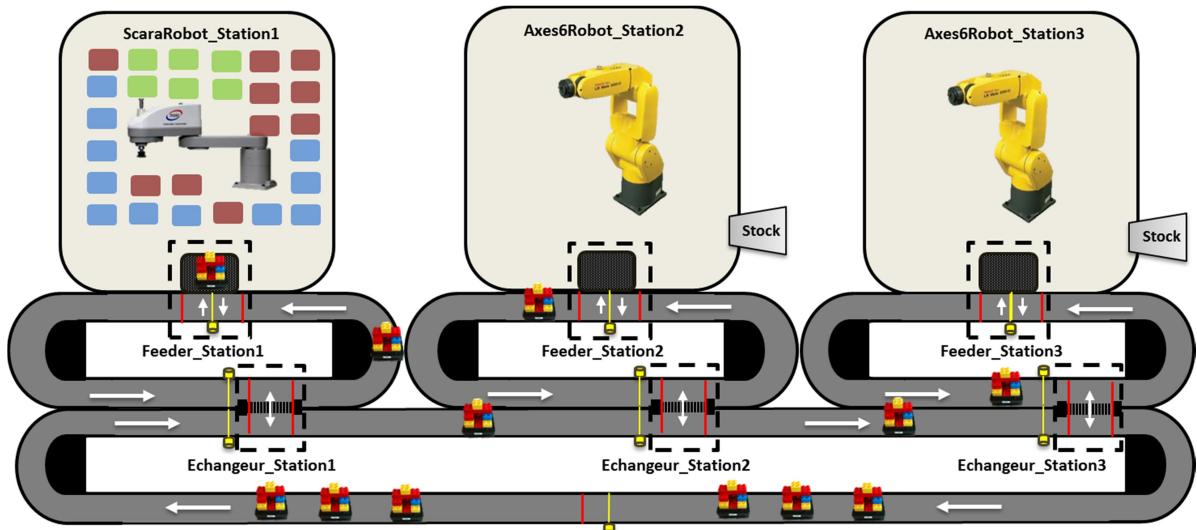


Figure 28 Vue schématique de SOFAL.

Parmi ces postes de travail, deux types peuvent être identifiés. Le poste numéroté 1 (Figure 29) est équipé d'un cobot Universal Robot et d'un stock plan, muni d'emplacement pouvant accueillir des bases, munies ou non de structures de Lego, finies ou semi-finies. Le robot effectue donc des opérations de Pick&Place permettant de déposer des bases sur les palettes vides ou de les retirer.

Les postes 2 et 3 (Figure 30) sont strictement identiques. Ils sont constitués d'un robot FANUC LR Mate 200 équipé de 6 axes et d'une pince électrique. Ces robots effectuent également des opérations de type Pick&Place. Un stock fixe d'alimentation en blocs Lego (6 emplacements, 2 par taille) et un stock tampon au pied du robot permettent de gérer l'aléa provenant des inadéquations entre couleurs requises et couleurs disponibles en sortie de stock. En effet, les stocks fixes sont constitués de goulottes gravitaires, ce qui fait que seul le bloc en sortie de goulotte est accessible pour la pince du robot. Il faut donc sortir ce bloc et le positionner sur le stock tampon pour accéder au bloc suivant.

Poste N° 1

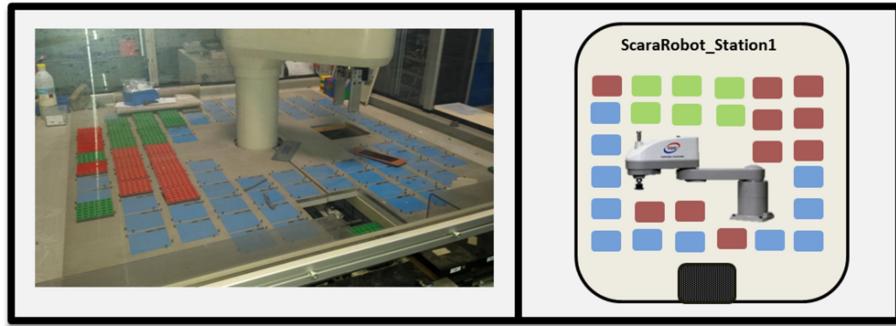


Figure 29 Poste de Travail N°1 : Stockage de produits semi-finis et déchargement de produits finis.

Postes N°2 & N°3

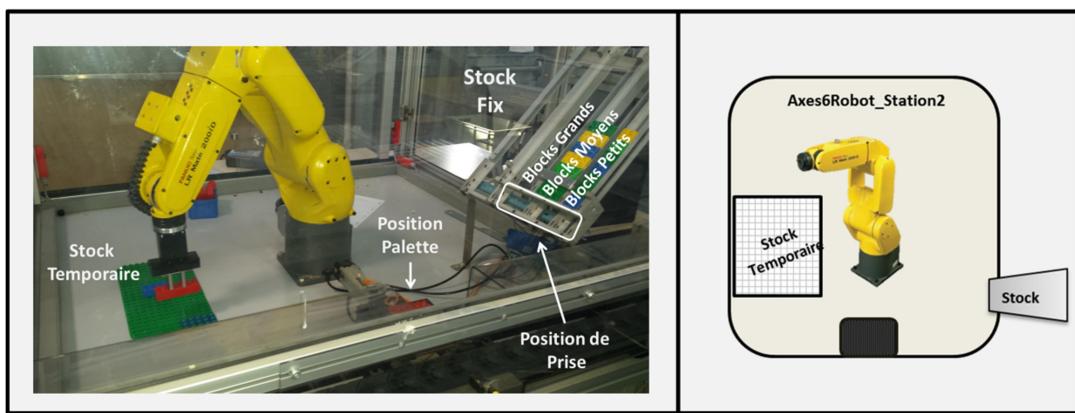


Figure 30 Postes de Travail N°2 et 3 (identiques) : Opérations d'assemblage.

Les produits fabriqués sont alors représentés par l’assemblage d’une structure de blocs Lego, qui peuvent être empilés dans différentes configurations. L’existence de l’interface d’assemblage universelle Lego permet la mise en œuvre de la modularité du produit final. Dans le domaine physique, les blocs représentent les composants du produit (ou de sous-produits) et les dépendances géométriques entre composants représentent les relations de dépendances généralisables à un assemblage classique. La structure Lego est de plus utilisée comme une représentation visuelle des précédences entre composants.

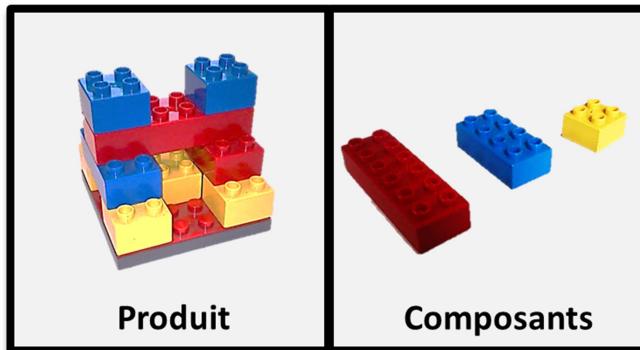


Figure 31 Produit étudié : structure Lego.

Trois types de blocs sont utilisés, de largeur 2 et de longueurs 2, 4 et 6. Chaque bloc est de plus disponible en quatre coloris : rouge, vert, jaune et bleu. Chaque structure est composée d'un maximum de quatre couches de blocs disposés sur une base initiale, de dimension 6x6 et de couleur rouge ou verte. Chaque bloc peut être assemblé dans n'importe quelle position sur la base ou sur d'autres blocs, tant que l'interface inférieure permet une stabilité de l'assemblage.

Au niveau de la commande, le choix fait sur ce système a été de remplacer les classiques automates programmables industriels (API) par des modules d'entrées-sorties sur IP Beckhoff. Ces modules ne sont que des passerelles multi-protocoles (gérant notamment le RS232 pour la lecture RFID, MODBUS TCP pour la partie IP...) et ne contiennent aucun programme de contrôle tel que ceux que l'on peut rencontrer dans les API classiques. Ceux-ci sont donc remplacés par des programmes ad hoc, capables de gérer des sémantiques de plus haut niveau que ce que les automates permettent et plus flexibles dans la partie configuration pour la partie expérimentale (Figure 32).

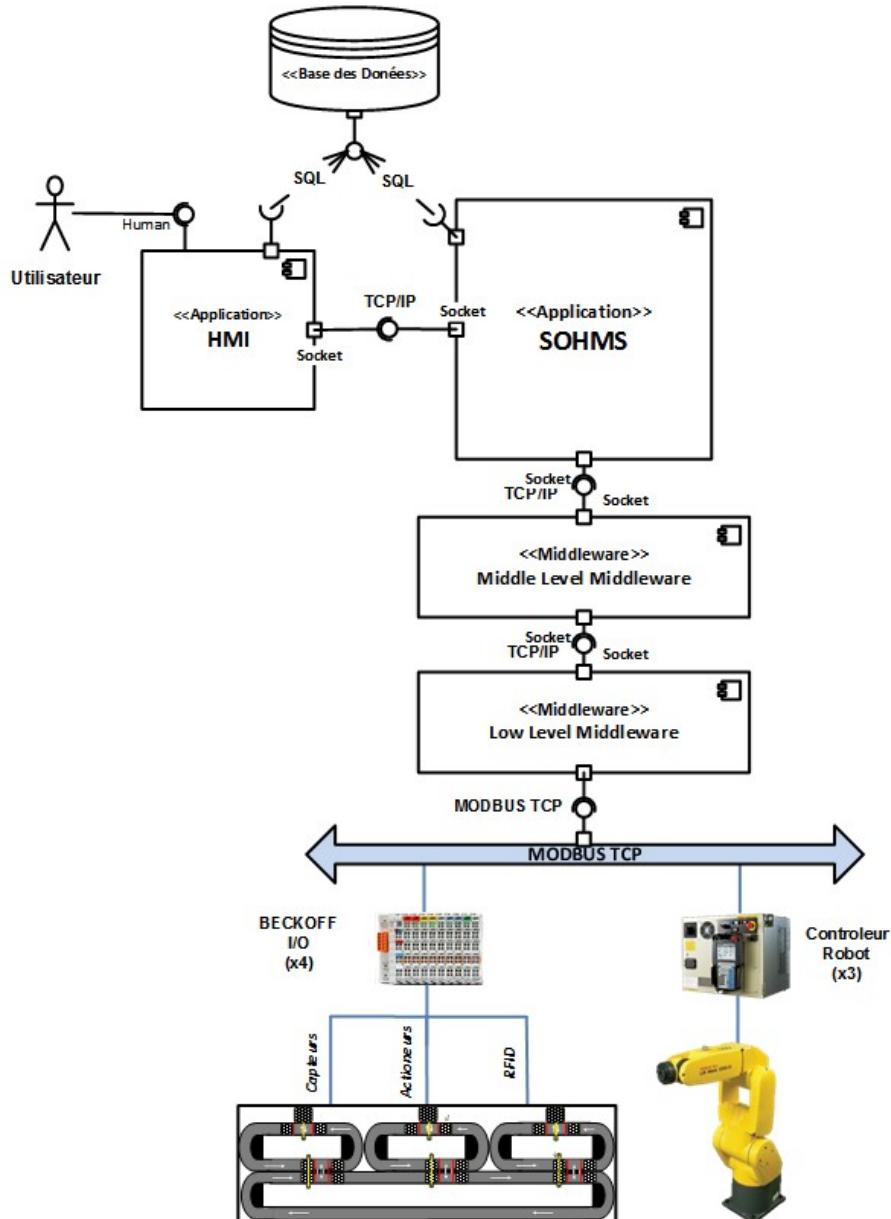


Figure 32 Architecture du système réel

Tout d'abord, un middleware de bas niveau (Low-Level Middleware – LLM) a été créé. L'objectif de LLM est de récupérer de manière synchrone l'état de l'ensemble des capteurs du système, informer de manière asynchrone les couches hautes du contrôle de tout changement de valeurs de ces capteurs et modifier de manière asynchrone l'état des actionneurs du système sur ordre des couches hautes. Fonctionnellement, ces fonctionnalités sont proches de ce qu'un serveur OPC²³ pourrait faire, mais adaptées à la configuration matérielle.

Puis, un middleware de niveau intermédiaire (Medium-Level Middleware – MLM) a été créé pour prendre en charge l'agrégation de données provenant de LLM en direction des couches hautes du contrôle et temporiser les macro-actions demandées par les couches hautes dans une sémantique de haut niveau en actions élémentaires exécutées ensuite par LLM. Par exemple, quand un service de Pick est demandé à un robot, cette requête de service est transmise à MLM, qui communique à LLM tous les octets de configuration à modifier sur le contrôleur du robot, puis attend les confirmations de modification déclenchées par la surveillance des données de LLM. MLM peut ensuite déclencher le démarrage du programme sur le contrôleur robot, mais doit pour cela suivre un protocole précis de mises à 1 et à 0 de données dans un timing constitués d'intervalles de temps inférieurs à 100ms. Lorsque le programme est lancé, MLM envoie un acquittement de démarrage du service à la couche supérieure, attend l'information provenant de LLM comme quoi le programme est terminé puis envoie lui-même l'information de fin de service. Ces fonctionnalités sont proches cette fois-ci de celles exécutées par un API, mais encore une fois elles permettent une complète flexibilité et une utilisation de sémantique de plus haut niveau.

Enfin, le module principal de contrôle, dénommé SoHMS, contient toute l'intelligence de pilotage. Les fonctionnalités et la structuration de ce module seront développées plus précisément dans les sections suivantes de ce document. A noter toutefois que ce module a été validé par virtual commissioning (Gamboa Quintanilla et al., 2015a) grâce au développement d'un émulateur du système sous Arena. Cet émulateur regroupait toutes les fonctionnalités du système, de LLM et de MLM pour permettre une mise au point la plus fidèle possible de SoHMS, et un passage type Plug&Play au système réel.

En parallèle de ces travaux, nous avons développé une interface homme-machine (HMI) basée sur les principes de supervision du système. Son objectif est de regrouper toutes les fonctions de paramétrage nécessaires au bon fonctionnement de SoHMS (Figure 33), ainsi que des outils de suivi de la production. Cette interface doit servir à la fois en recherche et en pédagogie (Bac+1 à +3), d'où certaines adaptations afin de simplifier son utilisation. Pour le développement de cet outil, nous avons reçu le soutien de deux stagiaires de niveau Bac+2 DUT Informatique de l'IUT de Nantes (A. Bouchet et B. Robert).

Les fonctions générales demandées à HMI sont :

- La conception de produits adaptés à l'application Lego (Figure 34) ;
- L'édition des gammes de production flexibles (encore en cours de développement)
- La définition des ordres de production (Figure 35) ;
 - Association d'un produit précédemment conçu à l'ordre ;
 - Définition des paramètres de l'ordre : échéance, nombre de produits à fabriquer, nombres de palettes utilisées ;
 - Transmission de l'ordre à un *SoHMS* précédemment connecté.

²³ www.opcfoundation.org

Contributions scientifiques principales



Figure 33 Menu de configuration – HMI



Figure 34 Conception de Produits - HMI



Figure 35 Crédit et Lancement des Ordres de Production – HMI

A l'heure actuelle, SOFAL peut être classifiée dans la catégorie {C3 ; Tool ; Manufacturing ; Ethernet}. Néanmoins, la flexibilité mise en place par le développement ad hoc de toutes les couches logicielles du système nous permet d'envisager dans les perspectives à moyen terme un fonctionnement tendant vers le niveau C5, et permettant une interaction avec l'opérateur plus évoluée que celle d'un simple pilote de la production tel qu'on le connaît actuellement.

3.1.2 Observateur

Les plateformes présentées ci-dessus ont montré une limitation du niveau de caractérisation fonctionnelle des systèmes développés à un niveau C3, ce qui est cohérent vis-à-vis des applications que l'on peut retrouver dans la littérature. Le passage à un niveau C4, voire C5, impose une élévation des fonctionnalités de cognition des éléments de l'architecture, c'est-à-dire des capacités à se diagnostiquer soi-même et à prédire sa propre évolution en fonction de l'application de tel ou tel changement sur sa configuration. La difficulté liée au développement de telles fonctionnalités est tout à fait identique à celle que nous avons mis en avant sur la pertinence de développer des architectures de contrôle hybrides (HCA) afin de coupler des comportements prédictifs et proactifs/réactifs et ainsi optimiser la réponse de l'architecture de contrôle en présence d'un aléa de production (Cardin et al., 2015). Ce travail découle du dépôt d'un projet collaboratif ANR avec le LAMIH de Valenciennes et le CRAN de Nancy.

Dans ces travaux, nous avons mis en avant le fait que l'une des difficultés majeures à laquelle la communauté faisait face était celle de la prévision à court terme de systèmes aussi complexes que ceux basés sur les CPPS et ayant un comportement émergent. Cette difficulté est directement liée à celle de l'observation en temps réel de l'état du système de production, et peut être décomposée en les trois verrous suivants :

1. Tout d'abord, il est nécessaire de disposer d'un outil permettant de reconstituer en temps réel l'état actuel du système considéré. Une proposition a été formulée pour créer ce qui a été dénommée un observateur à événements discrets, basée sur la simulation à événements discrets. De plus, il est nécessaire de prévoir sur un terme court le comportement du système. Pour cette fonctionnalité, nous avons proposé depuis plusieurs années un simulateur en ligne se basant sur les informations issues de l'observateur (Cardin and Castagna, 2011, 2009) ;
2. De plus, il est nécessaire de concevoir un outil de diagnostic, permettant de détecter et évaluer des différences entre le comportement théorique interprété par l'observateur et le comportement relevé depuis le système de contrôle (Zaytoon and Lafourture, 2013). Cet outil est relativement difficile à mettre en place au niveau CPPS, mais est encore plus difficile à concevoir au niveau coordination des CPPS, car il est nécessaire dans ce cas d'évaluer l'impact de la différence de comportement de chaque entité sur le comportement émergent du système global ;
3. Enfin, le constat tiré des deux premiers verrous est la complexité de conception de chacun de ces outils. De ce fait, un troisième verrou en découle au niveau de la conception de ces outils. Notre proposition a été d'intégrer aux méthodologies de conception classique de ce type de systèmes des outils d'ingénierie dirigée par les modèles (IDM) (Adam et al., 2012a, 2012b; M. Adam et al., 2011; Bevan et al., 2012).

Les travaux que nous avons menés sur ce dernier verrou ont été réalisés dans le cadre de la thèse de M. Adam coencadrée avec le Lab-STICC de Lorient. L'équipe avec laquelle nous avons collaboré a une compétence affirmée dans le domaine de la génération automatique par IDM de code de contrôle commande (IEC 61131-3). Ces travaux avaient notamment été concrétisés dans le cadre d'un partenariat avec un intégrateur local de systèmes automatisés (Lallican et al., 2007). Notre objectif a été de coupler à cet outil déjà existant la possibilité de générer automatiquement un observateur à événements discrets. Ce couplage prend tout son sens lorsque l'on identifie la complexité de conception manuelle d'un tel modèle :

- Les interactions avec le code de contrôle/commande sont très fortes, car de nombreuses informations sont remontées par les automates qu'il faut pouvoir intégrer dans le modèle pour la synchronisation. La génération couplée (Figure 36) permet de solutionner ce problème car le lien est établi dès que les variables sont créées dans l'automate, à un moment où l'on a la connaissance nécessaire à l'établissement du lien ;
- Les mécanismes internes à l'observateur liés à la synchronisation sont relativement complexes et très répétitifs à coder. Nous avons solutionné ce problème par la création de bibliothèques (Figure 37) permettant de modéliser tout type de système transitif (ce qui constituait la frontière technologique de notre étude). Ces bibliothèques sont ensuite directement instanciées par le transformateur de modèle lors de la création du modèle d'observation.

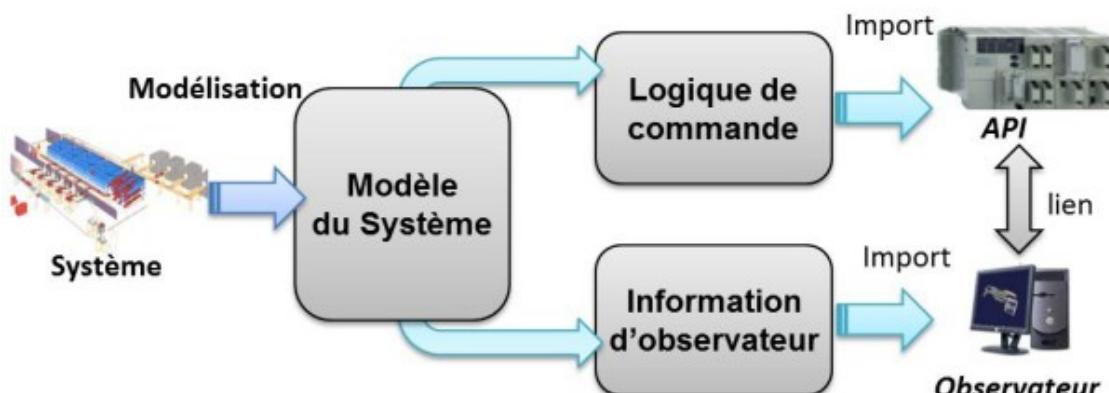


Figure 36 Flot de génération automatique d'un observateur et de la commande à partir d'un même modèle du système

Le système transitif étudié est la ligne flexible d'assemblage. Ce système est intéressant car, dans un volume relativement compact, le nombre de variables considérées est déjà élevé. Par exemple, la station 1, composée d'un système de 4 convoyeurs simples en dérivation de la boucle principale et d'un poste de travail, contient 8 capteurs, 5 bloqueurs, 3 lecteurs RFID (connectées via FipIO) et un aiguillage. Au total, la ligne comporte 20 convoyeurs, 50 bloqueurs, 59 capteurs et 18 lecteurs répartis sur 4 automates en réseau. Le résultat des transformations après l'import dans Arena est présenté Figure 38. Même si la ligne est relativement simple, le nombre d'éléments généré dans l'observateur est déjà conséquent: au total, 332 modules de la bibliothèque de simulation sont instanciés.

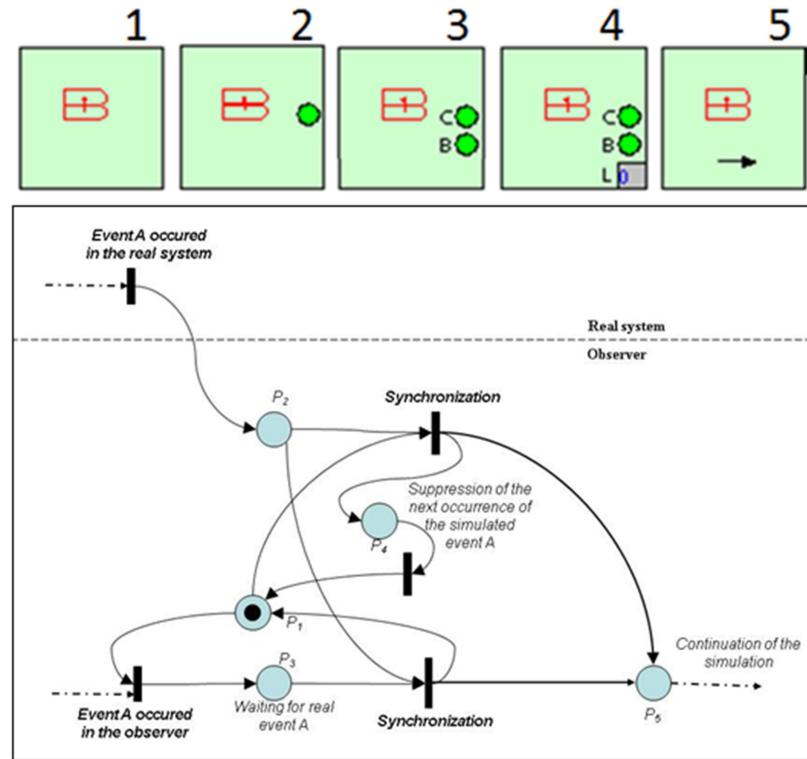


Figure 37 Différentes instances de la bibliothèque d'observation (haut) et le principe de synchronisation (bas)

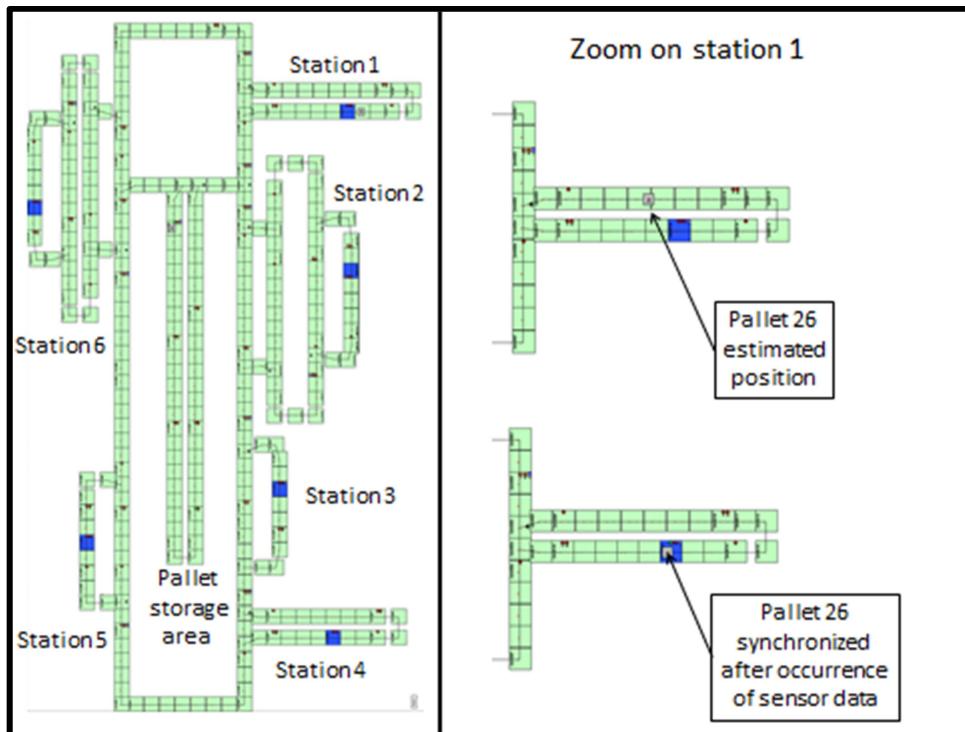


Figure 38 Observateur final du système complet (gauche) et un exemple de mécanisme de synchronisation (droite)

L'évaluation de performances de ce type de méthodologie est relativement complexe, car il ne s'agit pas de simplement comparer le résultat obtenu par génération automatique d'un résul-

tat obtenu à la main tel que celui de (Cardin and Castagna, 2011, 2009). En effet, dans ce cas, la comparaison se fait tout autant sur la méthodologie que sur les performances du codeur des solutions. De ce fait, nous avons défini comme indicateur de performance majeur les coûts de développement, séparés en deux indicateurs distincts mais complémentaires : le coût dû au temps passé par les développeurs pondéré par les compétences requises par ceux-ci et le temps d'implémentation de la solution sur le système. En effet, il est nécessaire pour développer un observateur à évènements discrets de disposer de compétences avancées et variées, que ce soit en contrôle basé sur automates, simulation à évènements discrets ou encore architecture réseau. Il est de plus très intéressant de pouvoir préparer en amont le développement afin de diminuer au maximum le temps d'intervention sur site et donc l'immobilisation du système de production avant lancement.

La méthodologie que l'on propose introduit une séparation simple et efficace en terme de compétences et responsabilités entre un développeur hors-site qui prépare les bibliothèques et transformations de modèle et un spécialiste terrain qui va procéder à l'implémentation en ne faisant qu'exécuter sur site les transformations préparées auparavant. Une estimation du temps de déploiement a été proposée, comparant la durée de développement en partant de zéro de chaque méthode. Les développeurs choisis sont des docteurs, auteurs respectifs de chaque méthode. Un observateur entièrement réalisé à la main nécessite 10 hommes.jour. Utilisant notre méthodologie, le développement se décompose ainsi :

- Développement des métamodèles: 1 homme.jour, étant donné qu'il est très proche de celui de la génération du contrôle ;
- Développement des bibliothèques de simulation : 7 hommes.jour ;
- Développement des transformations : 2 hommes.jour ;
- Implémentation : 0 homme.jour, car il n'y a aucune étape supplémentaire par rapport au développement du contrôle.

La comparaison entre notre méthodologie et un développement ad hoc est donc relativement identique à 10 hommes.jour, mais notre méthodologie permet une réutilisabilité presque totale des composants et méthodes développés. De ce fait, dans le cadre d'un intégrateur tel que celui avec lequel le Lab-STICC travaille, le gain est immédiat dès le second développement réalisé. De plus, le passage par des transformations de modèles assure une validation beaucoup plus rapide des modèles développés, et ce d'autant plus rapide que le nombre de modèles générés aura été grand.

L'Ingénierie des Modèles trouve donc très bien sa place dans la conception d'éléments d'architectures de contrôle pour CPPS, à la fois pour la génération du code de contrôle/commande mais aussi pour la programmation de certaines fonctions cognitives nécessaires au développement de CPPS de haut niveau fonctionnel.

3.2 Apport des CPPS à l'agilité des systèmes de production

Nos contributions principales se sont focalisées sur l'agilité des systèmes, et plus particulièrement sur la définition d'architectures de contrôle capables d'accueillir les capacités de flexibilité nécessaires au fonctionnement des systèmes. Ces travaux ont été menés principalement sur les plateformes expérimentales présentées précédemment.

Dans le processus de développement d'une architecture de contrôle, trois étapes globalement successives sont nécessaires :

1. Définition d'un modèle d'information commun aux éléments de l'architecture ;
2. Définition de l'architecture en elle-même, du rôle de chacune des entités du système et des relations entre elles ;
3. Développement des méthodes de comportement de chacune des entités et des dynamiques d'interaction entre celles-ci.

La présentation de nos contributions se fera suivant cette décomposition dans les sections suivantes.

3.2.1 Définition d'un modèle d'information

Les travaux présentés ici ont été majoritairement concrétisés durant la thèse de F. Gamboa Quintanilla. Tout comme le présentait déjà la définition de CPPS de (Monostori, 2014) que nous avons retenue dans ce document, nous plaçons le concept de service au centre des interactions entre entités de l'architecture de contrôle. En effet, tous les objectifs visés par les systèmes industriels de prochaine génération, Plug&Produce, cognition ou auto-reconfiguration pour n'en citer que quelques-uns, se basent sur une définition accrue des capacités des moyens et leur communication aux autres entités. De ce fait, nous nous sommes tout d'abord intéressés à cette notion de services dans le contexte de la production et avons proposé la définition de Manufacturing Services (MServices). Dans un second temps, nous avons proposé un modèle se basant sur les Réseaux de Petri (RdP) pour définir des gammes de fabrication de produits se basant sur ces Mservices et accroître la flexibilité apportée par le modèle d'information au système de contrôle.

3.2.1.1 Définition des MServices

Ces travaux ont été menés dans le cadre de la thèse de F. Gamboa Quintanilla (Gamboa Quintanilla et al., 2016a).

Dans le domaine de l'informatique, le paradigme de l'orientation-services définit les principes pour concevoir des architectures de contrôle décentralisées qui décomposent des process computationnels en sous-process, appelés services, pour les distribuer ensuite parmi les ressources disponibles (Komoda, 2006b). L'intérêt de ces services est d'inciter à la création de blocs-fonctions réutilisables et interopérables de manière à réduire les efforts de reprogrammation. De nombreux travaux pointent les bienfaits potentiels de l'application d'un tel paradigme en production (Bellifemine et al., 2007; Jammes et al., 2005; Jammes and Smit, 2005), voire même plus précisément du couplage entre architectures orientées-services (SoA) et systèmes de production holoniques (HMS) (Morariu et al., 2013a), ce dont la communauté SOHOMA²⁴ s'est emparé depuis quelques années déjà (Borangiu et al., 2012).

La problématique mise en avant dans ces travaux provient du fait qu'il ne nous a pas été permis de trouver de travaux proposant une description formalisée des éléments informationnels formant et décrivant un service adapté au cadre de la production manufacturière, ni comment ces services peuvent être utilisés pour former des spécifications de process en atelier. Ce

²⁴ www.sohoma15.cimr.pub.ro

nouveau type de service, dénommé MService, doit devenir à la fois la brique de base de la construction des architectures de contrôle (étape 2), mais surtout l'élément central des négociations et méthodes d'optimisation au sein de l'architecture (étape 3).

De manière similaire à OWL-S (ontologie web sémantique développée par le W3C, fournissant le vocabulaire standard pouvant être utilisé pour créer des descriptions interprétables informatiquement de services), le modèle est composé, selon les besoins, de différents types d'informations concernant le MService. L'information est distribuée parmi différentes perspectives de MServices, c'est-à-dire *Type (TypeMServ)*, *Profil (ProfMServ)*, *Spécification (SpecMServ)* et *Implémentation (ImpMServ)*. Le diagramme UML présenté dans la Figure 39 décrit les relations entre les différentes perspectives de MService.

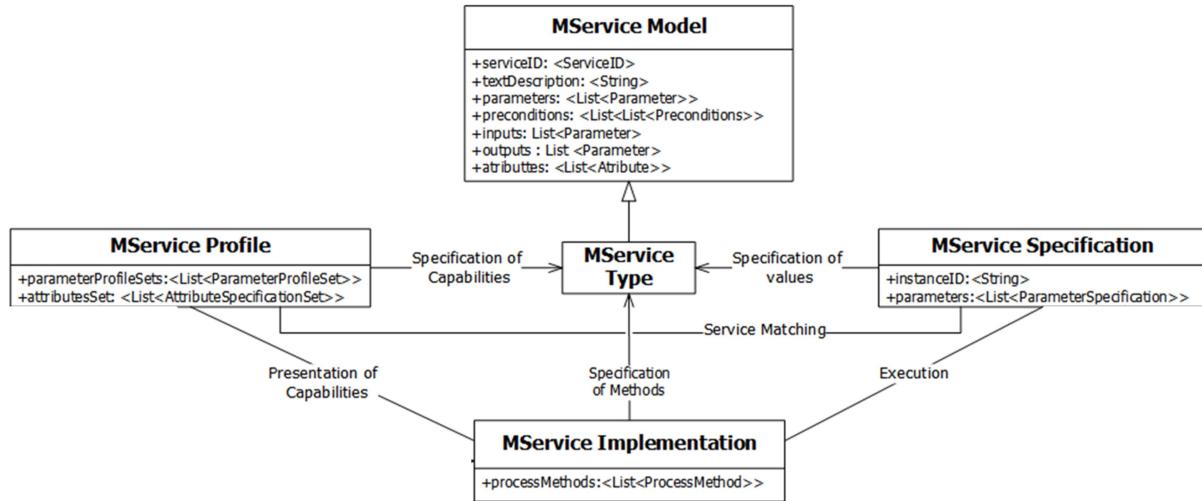


Figure 39 Perspectives de MService

En haut de la Figure 39, le *Modèle de MService* spécifie les éléments comprenant un service de production. La définition de ses champs, tels que le nom, la catégorie, le type de paramètres, les entrées, les sorties, etc., produit un *Type de MService* qui appartient à une application ou un domaine. Le modèle de cette perspective, *TypeMServ*, représente une classe spécifique de service à l'intérieur d'une ontologie de services qui reproduit les transformations indiquées dans sa description. Il détermine quelles sont les propriétés qui caractérisent une instance de MService de ce type, i.e. les propriétés qui doivent être spécifiées de manière à créer une *Spécification de MService*.

Cette dernière perspective, *SpecMServ*, est donc associée à un *TypeMServ* qui fournit des informations sur la valeur de ses propriétés. Le *SpecMServ* est définie par un client, qui décrit ses besoins et utilise cette perspective pour effectuer des requêtes de services. D'un autre côté, les fournisseurs utilisent des *Profils de MService* de manière à exposer leurs capacités de transformation au reste des acteurs du système. Un *ProfMServ* fournit de l'information sur la plage de valeurs de paramètres, défini par le *TypeMServ*, qu'une ressource peut reproduire. En d'autres mots, il indique l'ensemble des *SpecMServs* qu'une ressource peut fournir selon ses ressources internes et sa technologie. De ce fait, la découverte des associations potentielles entre fournisseurs et demandeurs de service est réalisée au travers d'une association entre *SpecMServ* et *ProfMServ*, selon un mécanisme décrit ci-après.

Enfin, la perspective *Implémentation*, *ImpMServ*, est possédée par les Holons Ressource (HR) et contient toutes les informations sur les méthodes utilisées par la ressource de manière à produire la transformation décrite par le *TypeMServ* associé. De telles méthodes sont propriétaires de la ressource car cela représente sa technologie interne, et le type de méthode peut varier selon le type de processus, comme décrit dans la prochaine section. Pour synthétiser, un modèle d'*Implémentation* exécute les opérations pour fournir la transformation requise avec une *SpecMServ*, tandis que le *ProfMServ* expose ses capacités à reproduire différents résultats, tous les deux associés au même *TypeMServ*.

Chacune de ces perspectives a été également définie (Figure 40 à Figure 44) de manière à compléter le modèle de MService et le rendre implémentable dans l'architecture de contrôle.

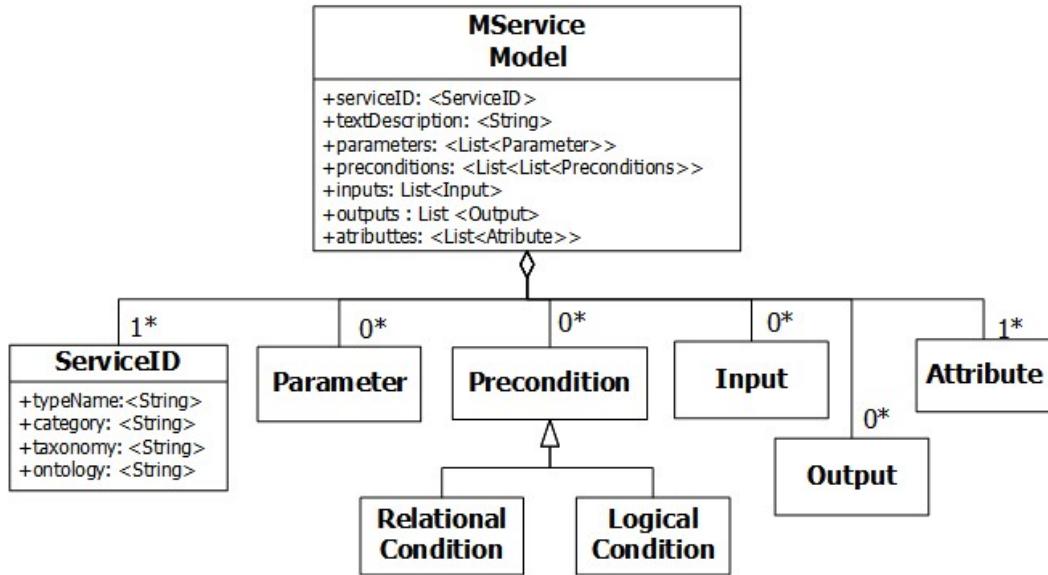


Figure 40 Modèle de MService

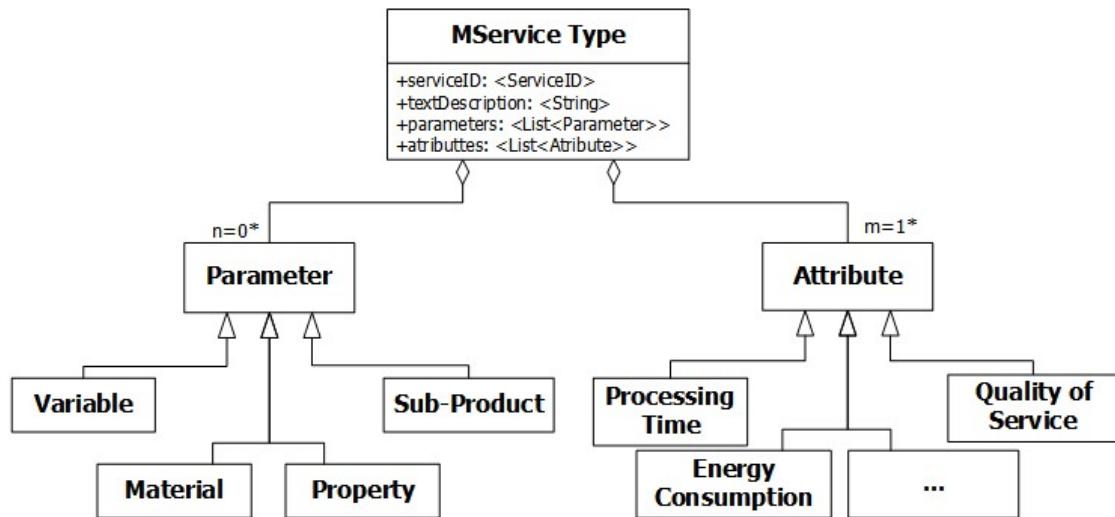


Figure 41 Type de MService

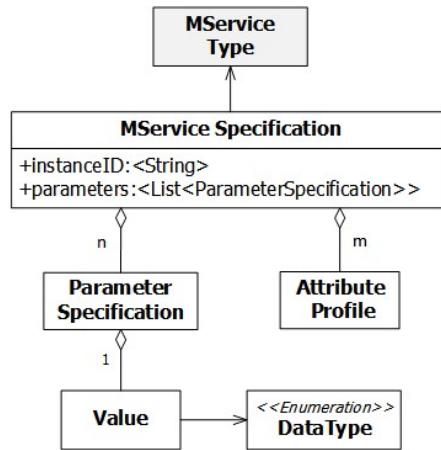


Figure 42 Spécification de MService

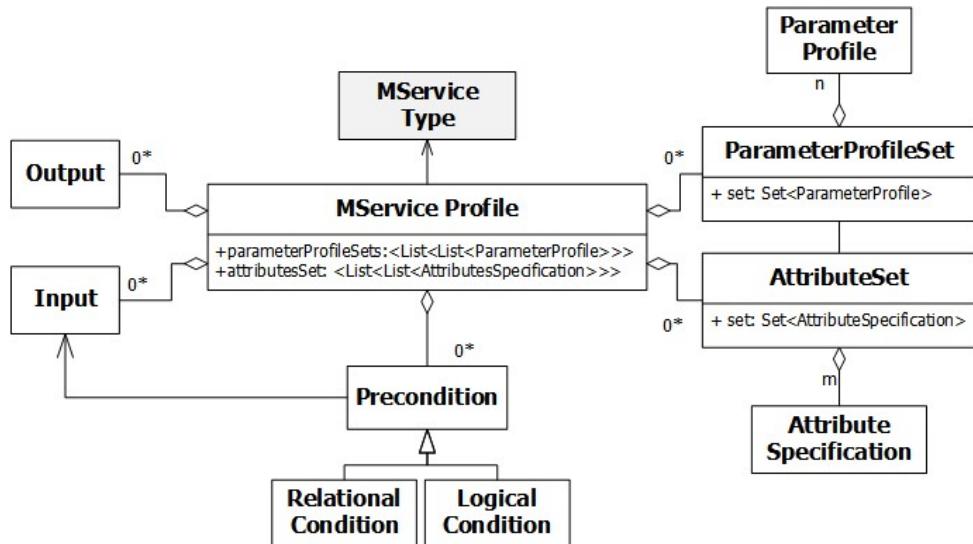


Figure 43 Profil de MService

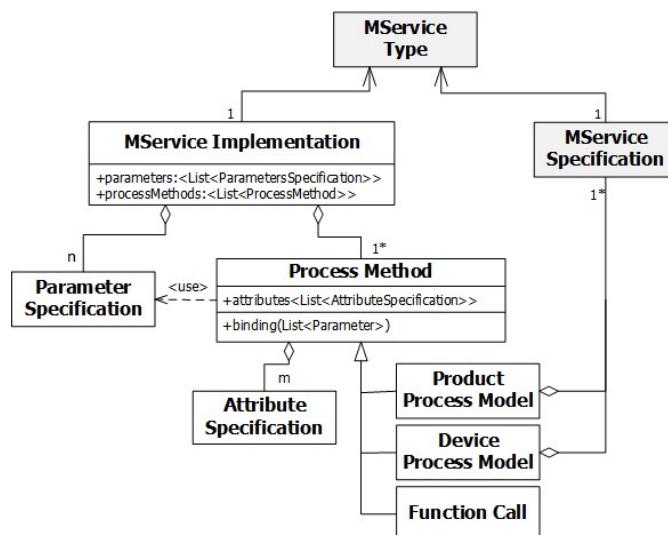


Figure 44 Implémentation de MService

L'objet de ces travaux a été de créer la brique de base de tous nos travaux futurs sur l'agilité des systèmes. Alors que la preuve de concept a été présentée et mise en avant de nombreuses fois dans la littérature, nous avons proposé (à notre connaissance) la première définition globale et formelle de la notion de services dans le domaine de la production manufacturière.

3.2.1.2 Définition de gammes flexibles basés sur les MServices

Ces travaux ont été menés dans le cadre de la thèse de F. Gamboa Quintanilla (Gamboa Quintanilla et al., 2016b, 2015b, 2014a, 2013b)

La motivation principale de nos travaux provient du fait que nous pensons que la flexibilité d'une architecture de contrôle provient principalement du modèle d'informations qui en est la base et de la manière dont les informations sont présentées aux autres entités du système. Parmi ces modes de représentation en production, la gamme de fabrication des produits est un élément extrêmement important, car c'est celui qui structure l'organisation de la production au niveau de l'atelier global. De ce fait, les travaux menés ici ont pour objectif de proposer, sur la base du MService présenté précédemment, une méthodologie de définition de gammes de fabrication les plus flexibles possibles, c'est-à-dire permettant non seulement la concurrence entre ressources exécutant chaque opération de la gamme mais également une concurrence entre opérations dans l'enchaînement de celles-ci. Il n'est en effet pas rare d'avoir des choix qui sont faits lors de la conception des gammes non pas sur des considérations strictes de précédence entre opérations mais du fait de considérations toutes autres, anticipant généralement le comportement en ligne du système de contrôle. Notre proposition est d'ouvrir les possibilités au niveau de la gamme elle-même en introduisant une flexibilité structurelle dans la conception des gammes.

Le formalisme que nous avons choisi pour modéliser les gammes est le Réseau de Petri (RdP). Le modèle de RdP choisi est décrit par le 5-tuple: $PN = (P, T, A, W, Inh, Read, Fl, M0)$ où :

- $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ est un ensemble fini de places. Il y a trois types: *Places de Permission*, *Places d'Exclusion Locale LE()*, et *Places d'Exclusion Mutuelle ME()*. Les places de permission enregistrent l'exécution de tous les services ayant un minterme (ET logique) dans leur condition de précédence. Ce sont les leviers principaux d'exécution. Les places d'Exclusion Locale sont utilisées pour enregistrer l'exécution d'un service avec un maxterme (OU logique) ou un opérateur de négation dans sa condition de précédence. Les places d'exclusion mutuelles sont utilisées pour éviter des situations de verrou ;
- $T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$ est un ensemble fini de transitions. Chaque transition, sauf les transitions Start et Finish, est associée à un service: $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\} \rightarrow T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$, S étant l'ensemble des services formant le modèle de processus ;
- $A \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$ représente l'ensemble fini d'arcs des places aux transitions et des transitions aux places. Ils capturent toutes les relations de précédence déclarées dans la table de précédence ;
- $W: A \rightarrow \{k\}$ est la fonction de pondération des arcs, avec k le poids des arcs. Dans un arc $(P \times T)$, le poids représente le nombre d'éléments capturés par l'entrée de la place de Permission, i.e. le nombre d'éléments dans la condition minterme ;
- $M0$ est le marquage initial du réseau, ce qui correspond à un jeton dans chaque place ME() et LE() et la place P(Init), le reste des places restantes vides ;

- $Inh:(P \times T)^* W \rightarrow (N \setminus \{0\}) \cup \{+\infty\}$ est la fonction d'inhibition. Les arcs inhibiteurs, aussi appelés arcs zero-test, servent à limiter l'exécution de certains services qui pourraient amener le réseau dans une situation de blocage. Ils testent si une place dans le réseau n'a pas de jeton ;
- $Read:(P \times T)^* W \rightarrow N$ est la fonction de lecture. Les arcs de lecture sont utilisés pour tester la présence de jetons dans les places. Elle est utilisée pour réduire le nombre de places dans le réseau et le rendre plus facile à lire.

Dans ce formalisme de RdP étendu, une transition t est validée si et seulement si :

$$Inh(\bullet, t) \leq (M \geq Pre(\bullet, t) + Read(\bullet, t))$$

De ce fait, la fonction d'état de transition $f:Nn \times T \rightarrow Nn$ reste la même que dans le formalisme classique de RdP:

$$M' = M - Pre(\bullet, t) + Post(t, \bullet), \text{ soit } \forall p \in P \quad M(p)' = M(p) - Pre(p, t) + Post(t, p)$$

où $Pre(\bullet, t) = (P \times T)^* W \rightarrow N$ est la relation de précondition et $Post(t, \bullet) = (T \times P)^* W \rightarrow N$ est la relation de post-condition.

Il est important de noter que les places ne représentent pas l'état des processus comme il est classiquement d'usage dans la modélisation en RdP. L'état de la production est représenté par le marquage du réseau $M = [M(p1), M(p2), \dots, M(pn)]$ indiquant les valeurs des places de permission et d'exécution, ce qui exprime quels services ont déjà été exécutés.

Toutes les transitions sont en parallélisme structurel, exceptées celles liées à des places LE() ou ME() qui sont en conflit structurel. Toutes les transitions qui sont en parallèle sont permutables. Un marquage M est considéré comme un état de décision si et seulement si $\neg (t1, t2 \in T), t1 \neq t2$ pour lequel $Pre(\bullet, t1) \leq M \geq Post(\bullet, t2)$. Ceci signifie qu'un marquage représente un état de décision s'il permet le tir de plus d'une transition pour lesquelles le moteur d'orchestration doit faire un choix sur laquelle exécuter en suivant dans la séquence.

En se basant sur les concepts généraux de familles de produits et de familles de processus, nous avons également proposé une méthodologie de conception des gammes se basant sur la génération de tables de précédences entre les différents services à exécuter. Ce choix s'explique par la simplicité d'utilisation de l'outil en phase de conception. En effet, il suffit pour chaque service d'exprimer une expression booléenne indiquant les services devant être absolument réalisés avant le service considéré. Cette approche a vocation à s'intégrer ainsi plus facilement dans le futur avec des algorithmes de découverte automatique de gammes de fabrication ou d'assemblage en complément de l'expertise humaine. A partir de cette table de précédences, nous avons défini un ensemble de 9 règles permettant, à notre connaissance, de passer de n'importe quelle table de précédence et équations booléennes à un RdP utilisable au sein de l'architecture.

La Figure 45 présente un exemple synthétique de génération de gammes permettant de produire la famille de produits illustrée par les assemblages Lego en haut à gauche de la figure. A partir de l'assemblage, un ensemble de considérations géométriques sont prédéfinies, les choix modulaires permettant de proposer les variantes de produits sont intégrés et une contrainte a été rajoutée par l'humain concernant l'assemblage du bloc A1.5 qui doit se faire impérativement avant l'assemblage des blocs B2.1 et B2.2 pour des contraintes d'outillage. La table de précédence est alors construite et les règles de modélisation permettent de générer (sans ambiguïté) le RdP présenté à droite de la figure. Un algorithme de génération automatique se basant sur les 9 règles de transformation est clairement trivial à programmer, mais n'a pas été réalisé à ce jour.

Ce RDP a ensuite vocation à être décliné en plusieurs plans de production, selon la configuration dynamique du système de contrôle.

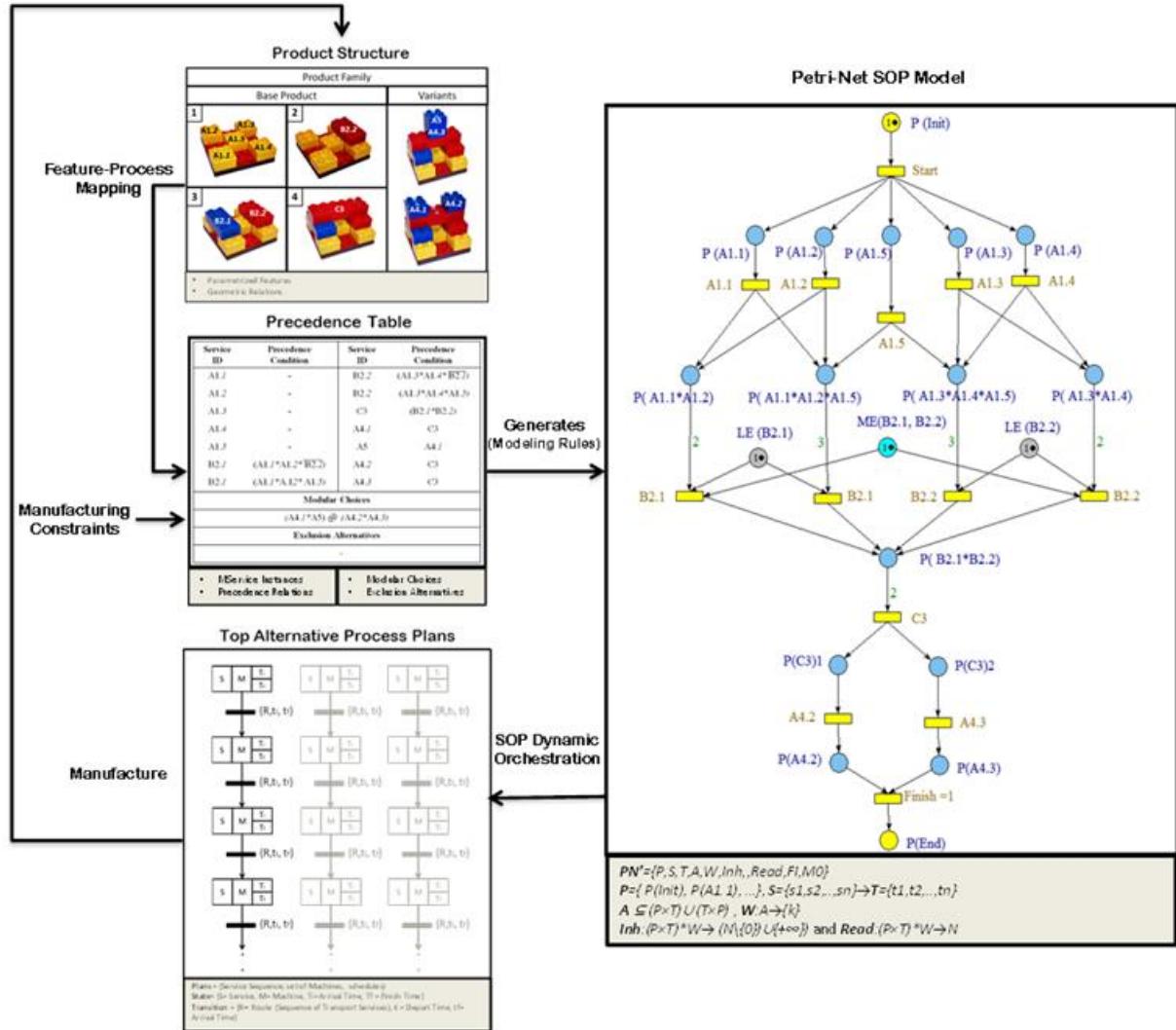


Figure 45 Exemple de génération de gammes flexibles

Le formalisme que nous avons proposé permet une représentation compacte d'un grand nombre d'alternatives (pour applications embarquées notamment) sous une forme facilement interprétable automatiquement et relativement facile à générer, même pour quelqu'un peu familier avec le formalisme.

L'origine de ces travaux a été l'idée d'insérer dans les architectures holoniques la notion de gammes flexibles, afin d'augmenter encore la flexibilité de ces architectures. Au travers de ces travaux, la notion de MService a été naturellement abordée et formellement définie, ce qui nous a conduit par la suite à proposer une architecture holonique orientée-services permettant d'accueillir cette flexibilité. La section suivante présente cette architecture.

3.2.2 Définition d'une architecture de contrôle flexible

Ces travaux ont été menés dans le cadre de la thèse de F. Gamboa Quintanilla (Gamboa Quintanilla et al., 2016a).

L'architecture conçue se base principalement sur les principes et concepts introduits par l'architecture PROSA, en combinant quelques concepts d'interaction des architectures HCBA et ADACOR. Cette proposition d'architecture reprend les concepts de Holon Produit (HP), Holon Ressource (HR), et Holon Ordre (HO) provenant de PROSA, ainsi que le concept de Directory Facilitator (DF) des architectures multi-agents. Même si les concepts de base restent proches de leurs origines, nous avons adapté leur comportement pour faire du MService le principal élément d'échange dans les interactions, orienté vers les activités de planification et d'ordonnancement. La Figure 46 montre le diagramme de classe de l'architecture, les relations et échanges d'informations entre les différents acteurs. Chaque classe a également été définie, mais ces éléments ne sont pas présentés dans ce document. Nous nous focaliserons sur les fonctionnalités de ces éléments.

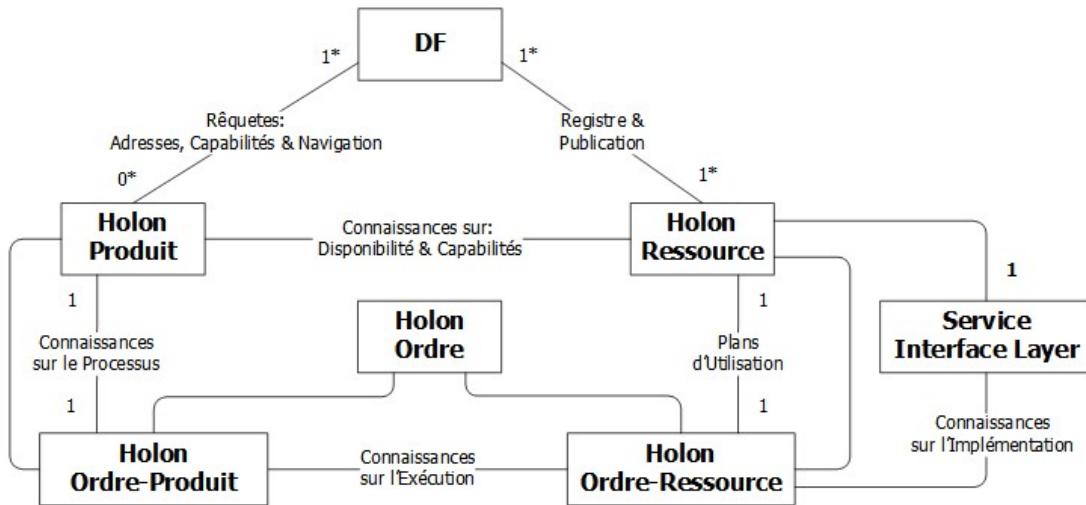


Figure 46 Diagramme de Classes UML de l'architecture *SoHMS*

En haut de la Figure 46, on peut voir le DF avec les HP et HR. La relation DF-HR consiste en l'enregistrement des capacités des HR pour les rendre visibles au reste du système à travers un système de « pages jaunes ». Les HP peuvent accéder à cette information au travers du DF, en sollicitant des services d'identification de capacités, d'adressage (directions virtuelles), et d'information sur la navigation (information de transport pour se diriger à un port spécifique). Une fois mis en relation, le HP et le HR échangent directement de l'information sur la disponibilité de la ressource pour inscrire des intentions. A la différence de PROSA, le SoHMS compte deux types de Holons Ordre : Holon Ordre-Produit (HOP) et Holon Ordre-Ressource(HOR).

Ces deux types permettent de répondre aux besoins d'exécution des plans. Ainsi, un HP possède un HOP à qui il délègue la responsabilité d'exécuter les plans de production issus des négociations du HP. De même, un HR possède un HOR, à qui il délègue la responsabilité de répondre aux requêtes d'exécution de services par les HOP en contrôlant la satisfaction des plans d'utilisation de HR. Un nouvel élément ajouté à l'architecture est le « Service Interface Layer » (SIL), servant d'interface entre les descriptions de services et les commandes au niveau de l'atelier (réseaux de terrain). Du fait de sa singularité, chaque ressource possède un élément SIL, contenant toute l'information sur la manière d'implémenter un service au niveau terrain. Ainsi, le HOR envoie tous ses ordres et reçoit toutes les notifications d'exécution au travers du SIL.

La Figure 47 propose une représentation verticale de cette architecture. La couche la plus abstraite, en haut, est identifiée comme étant la plateforme holonique. À l'intérieur de cette couche, nous retrouvons l'ensemble des fonctions explicitées ci-dessus, classées en fonction de

leur niveau d'abstraction, i.e. leur éloignement vis-à-vis du contrôle du processus. Le plus haut niveau correspond donc à la spécification produite au niveau des HP. À partir de cette spécification, la relation HP-HO permet de générer l'orchestration flexible du processus, via une interaction avec le DF. A l'intérieur de ce DF, deux niveaux d'abstraction sont présents : le nuage de services, ne contenant que les Profils de chaque MService, et le DF, contenant également un nuage avec l'ensemble des parties logiques des ressources s'étant annoncées dans le système.

Cette première couche est en étroite relation avec une seconde couche ayant la particularité d'être soumise à de plus fortes contraintes temporelles. Dans cette couche, le premier niveau d'abstraction contient les HO spécialisés en HOP et HOR pour le suivi temps-réel de la production. Le lien vers la couche temps-réel strict est assuré par le SIL, qui permet de lier la notion de service à la méthode d'implémentation de l'opération sur le processus.

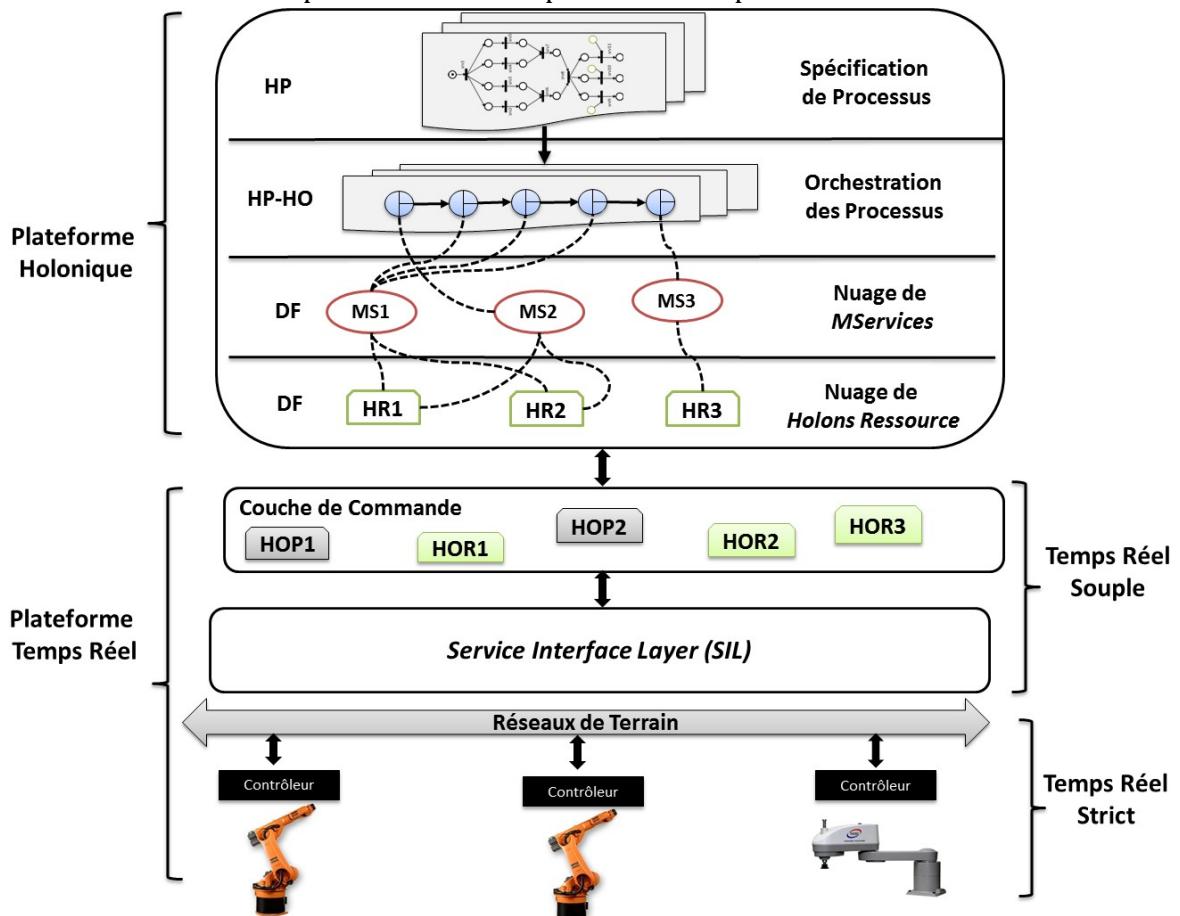


Figure 47 Architecture de contrôle de SoHMS

L'orchestration de cette architecture (Pahl and Zhu, 2006) se situe au niveau des interactions entre HP : plusieurs produits interagissant de manière simultanée, chacun cherchant la réalisation de son parcours de production. Il existe sans doute le besoin d'un mécanisme de coordination permettant d'éviter les conflits d'utilisations de ressources de production ou de transport. Dans le SoHMS, les HP forment une chorégraphie à travers un mécanisme de coordination indirecte basé sur la stigmergie. Nos travaux proposent un protocole d'orchestration basé en grande partie sur le protocole d'interactions Contract-Net (CN-P) de FIPA (Foundation for Intelligent Physical Agents) et l'approche de prévisions à court terme présentée dans (Belle et al., 2009; Holvoet and Valckenaers, 2006; Valckenaers et al., 2006) inspirée par l'organisation

des colonies de fourmis. Le protocole CN-P est utilisé pour régir et coordonner l'échange d'informations dans les interactions de négociations entre les HP (clients) et les HR (fournisseurs). Les principes de l'approche de vision à court terme sont utilisés pour réduire le comportement myopique (E. Adam et al., 2011; Zambrano Rey et al., 2014, 2013), caractéristique des systèmes distribués, et rendre aux participants une vision globale du système pour la durée de son cycle de vie.

Le développement preuve de concept de ce SoHMS a été réalisé sur SOFAL. L'ontologie de services d'assemblage créée est représentée Figure 48, ce à quoi s'ajoutent des services de transport et de gestion du produit fini. La configuration générale du SoHMS a été entièrement paramétrée par l'intermédiaire de fichiers XML, ce qui permet une généréricité de l'approche qui en fait un logiciel capable de s'adapter à tous les problèmes de systèmes de production à rouages multiples.

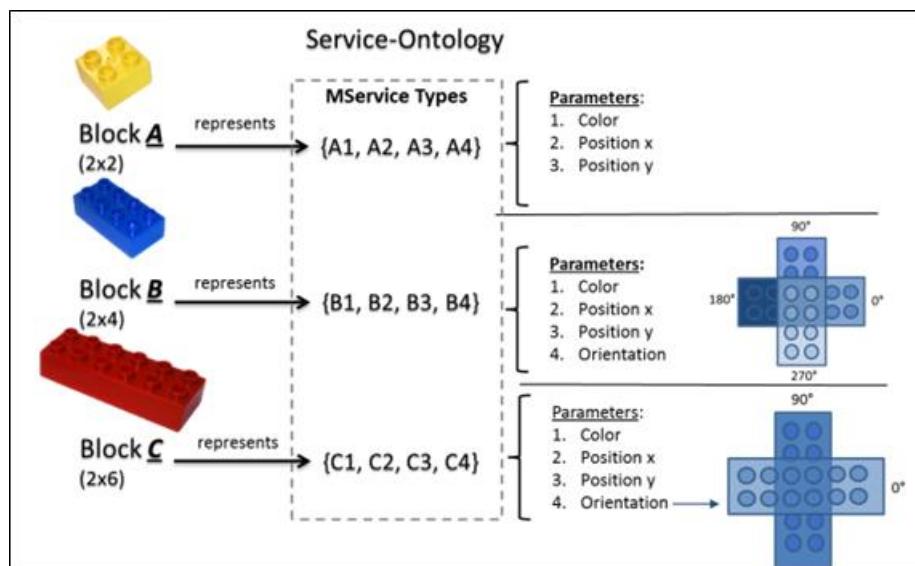


Figure 48 Ontologie de services d'assemblage sur SOFAL

A l'heure actuelle, seul un comportement heuristique a été programmé, permettant à chaque produit de s'orienter vers le prochain fournisseur de service le plus avantageux en terme de date de réalisation. Ce comportement, proche d'un comportement purement réactif, a l'inconvénient de ne pas garantir de bonnes performances du système, mais nous a permis de valider l'approche via virtual commissioning (Gamboa Quintanilla et al., 2015a) et le système physique via son implémentation réelle.

Ces travaux nous ont permis de décliner l'orientation services au niveau d'une architecture holonique, et de proposer une architecture cohérente permettant de coupler efficacement les deux approches. Ils nous ont également permis d'ouvrir de nombreuses pistes, que ce soit par exemple sur l'évaluation de performances du système via programmation de comportements intégrant une dimension prédictive ou sur le passage de la notion de service à la notion d'opération au niveau atelier.

3.2.3 Méthodes : Evaluation de performance d'un pilotage prédictif-réactif

En parallèle des implémentations d'architectures flexibles présentées précédemment, nos travaux ont également porté sur l'évaluation de performance de méthodes d'optimisation de la production de systèmes industriels. Les supports d'expérimentation ont successivement été la ligne d'assemblage flexible présentée précédemment et le magasin cartésien à rack profond qui lui est connecté et qui permet de stocker les produits semi-finis et finis. L'objectif était de trouver des méthodes permettant une haute performance des systèmes dans un contexte de fortes incertitudes sur les données de production.

3.2.3.1 Performance d'un système de stockage cartésien à rack profond

Ces travaux ont été réalisés dans le cadre d'un projet Tassili avec le Manufacturing Engineering Laboratory de Tlemcen (MELT, Algérie), spécifiquement avec l'accueil de N. Meghelli pendant 18 mois au laboratoire dans le cadre de ses travaux de thèse (Cardin et al., 2012; Meghelli et al., 2010).

Les incertitudes prises en compte dans ce système sont relatives à la demande de sortie des éléments du système. En effet, si la distribution statistique des références de produits stockés dans le magasin est globalement connue à l'avance, l'ordre des entrées-sorties dans le magasin n'est connu qu'au dernier moment. Le critère de performance utilisé est le temps moyen de déstockage, c'est-à-dire le temps moyen nécessaire entre le début de prise en charge de la sortie d'une référence de produit du magasin et sa sortie effective.

Le système étudié est un magasin cartésien de type AS/RS à rack profond (Figure 49). Dans ce type de systèmes, le temps de déstockage d'un produit dépend non seulement de la position relative de son couloir gravitaire (bin) par rapport à la station de livraison (drop-off station), mais surtout de la position de celui-ci dans le couloir, i.e. sa proximité avec la face avant du magasin. L'ordre de stockage des produits, et l'historique de déstockage des produits précédents dans le couloir ont donc une grande influence sur le résultat final. C'est à partir de cette observation que nous avons construit une heuristique innovante pour le stockage et le déstockage des produits dénommée « In-deep class storage » (Cardin et al., 2012).

De nombreux travaux ont déjà traité de cette problématique, et une certaine convergence a pu être observée vers le stockage par classes (Eldemir et al., 2004; Park et al., 2006; Yu and Koster, 2009). Ces méthodes considéraient la face du magasin et la décomposait en zones géographiques regroupant un ensemble de couloirs et contenant les produits de classe généralement A, B ou C. A l'intérieur de ces zones, le stockage était soit aléatoire, soit en couloirs dédiés, c'est-à-dire ne contenant qu'un seul type de produit. Cette méthodologie proposait des performances intéressantes, mais des perspectives d'amélioration étaient ouvertes, notamment sur l'adaptabilité du système en cas de modification de la demande de chaque produit et donc du changement de classe des références.

C'est dans ce cadre que nous avons pu proposer de nouvelles heuristiques basées sur la décomposition des références en deux classes et permettant de déterminer la meilleure instance de produits à déstocker et le meilleur emplacement où stocker les produits entrants selon leur référence. L'originalité de notre approche est de ne pas considérer la géographie des classes comme un classement des couloirs, mais plutôt de décomposer chaque couloir en classes, l'avant étant dédié aux produits à plus fort turnover et l'arrière aux produits les plus rares.

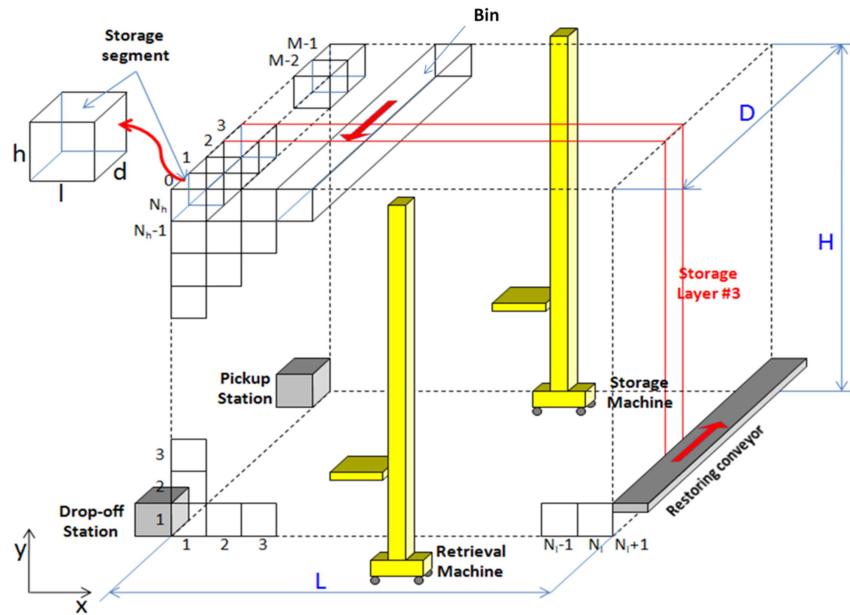


Figure 49 Configuration du magasin étudié

Cette manière de décomposer le magasin pose évidemment un souci dans l'aspect dynamique, puisque chaque mouvement d'entrée ou de sortie de produits a tendance à introduire du désordre dans le magasin, tous les produits étant insérés par la face arrière. Lorsqu'un produit de classe A doit être stocké, il y a une forte probabilité que l'on soit obligé de le stocker derrière un produit de classe B, ce qui est contraire à l'objectif précédemment évoqué. Nous avons donc défini un second critère de performance de notre système que nous avons dénommé Indice de Rangement. Cet indice est proportionnel au nombre de fois où l'on retrouve un produit de classe A derrière un produit de classe B.

Ainsi, nous pouvons évaluer la performance de nos deux heuristiques :

- Le déstockage en fonction du temps moyen de déstockage ;
- Le stockage en fonction de l'évolution de l'Indice de Rangement du magasin.

Une étude par simulation du comportement de l'heuristique sur des magasins de taille différente (Table 7) et avec une répartition statistique des produits variable (Table 8) a permis de montrer la performance de l'approche sur différentes configurations et une certaine robustesse face aux incertitudes dans les données d'entrée.

Table 7 Performance des heuristiques de stockage et déstockage en fonction de la configuration du magasin

Configuration du magasin				Indice de rangement		Temps de déstockage	
H	L	D	Rangement initial	Moyenne	Half-width	Moyenne	Half-width
5	5	5	Idéal	0	0	11.3	0.27
5	5	5	Aléatoire	16	1.2	11.9	0.33
10	10	10	Idéal	0	0	31.9	0.26
10	10	10	Aléatoire	145	2.9	35.7	0.60
25	25	10	Idéal	0	0	58.6	0.18
25	25	10	Aléatoire	900	7.0	67.8	0.70

Table 8 Performance de l'heuristique de déstockage en fonction de la répartition statistique des références

Distribution statistique		$P(X_1)$	Temps de déstockage	
			Moyenne	Ecart-type
Uniforme		0.03%	542.4	16.1
Pareto	k=0.01	8.98%	293.0	4.2
	k=0.05	10.33%	275.9	3.8
	k=0.1	12.15%	257.0	2.9
	k=0.2	16.21%	227.5	2.9
	k=0.5	29.83%	190.5	2.2
	k=1	50.02%	171.8	4.2

Il est également remarquable que, quelle que soit la configuration initiale du magasin et les stockages/déstockages déclenchés, le comportement de l'indice de rangement a toujours tendance à évoluer positivement jusqu'à atteindre une asymptote horizontale après un grand nombre de déstockage. La Figure 50 illustre ce comportement sur un magasin ($H=15$; $L=15$; $D=10$; Rangement initial aléatoire) avec l'asymptote horizontale figurée en rouge.

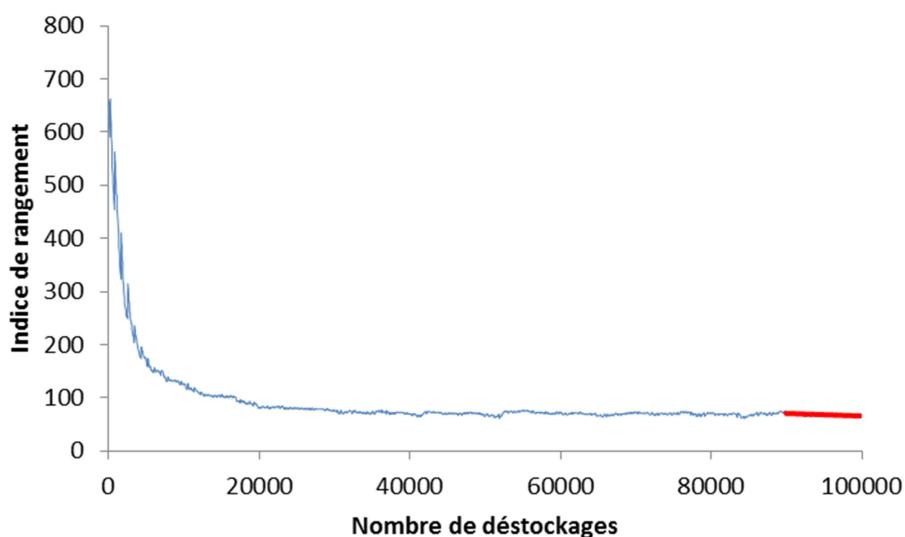


Figure 50 Exemple d'évolution de l'indice de rangement en fonction du nombre de déstockage

Le développement de ces heuristiques a été réalisé dans un cadre de collaboration internationale avec un laboratoire ayant une expertise spécifique dans l'étude analytique des magasins de stockage. Cette collaboration avait pour objectif de coupler à cette expertise une compétence en simulation à événements discrets afin de créer une plateforme de validation des heuristiques proposées permettant la variation de nombreux paramètres géométriques. Cette plateforme nous a permis d'évaluer la performance d'une heuristique innovante proposant des performances très intéressantes sur la durée et une flexibilité très importante. Le magasin complet a été considéré dans cette étude comme un CPPS membre d'un système de production plus large. L'une des pistes intéressantes qui pourront être développées par la suite concerne la

| modélisation de chaque produit comme un CPPS en lui-même au sein du CPPS magasin, capable d'interagir avec son environnement.

3.2.3.2 Performance d'une architecture de contrôle prédictive-réactive pour Job-shop

En parallèle à cette heuristique de stockage pour le magasin, nous avons travaillé sur le contrôle de la ligne d'assemblage flexible qui y est physiquement connectée. Ces travaux ont été menés dans le cadre de la thèse de G. Pinot (Cardin et al., 2013; Pinot et al., 2007).

L'architecture initiale de la ligne d'assemblage était entièrement contrôlée par le produit, avec un comportement réactif totalement myope (E. Adam et al., 2011; Cardin and Castagna, 2012; Zambrano Rey et al., 2014, 2013). Notre équipe ayant des compétences en recherche opérationnelle, et plus particulièrement autour de la thématique de l'ordonnancement de groupes, nous avons utilisé la ligne flexible afin d'évaluer à quel point la flexibilité introduite dans l'ordonnancement de groupes pouvait améliorer la robustesse du pilotage.

L'ordonnancement de groupes a ceci de différent d'un ordonnancement classique qu'il ne propose pas simplement à chaque opérateur (en faisant l'hypothèse d'un opérateur centre de décision par machine de production) une liste ordonnée d'opérations à effectuer sur un horizon temporel. L'opérateur se verra en effet proposer une liste ordonnée de groupes d'opérations. La contrainte pour l'opérateur est d'exécuter ces groupes dans l'ordre, i.e. ne pas changer de groupe si toutes les opérations du groupe ne sont pas terminées, mais l'ordre d'exécution au sein du groupe est laissé au libre choix de l'opérateur. Cette liberté donnée à l'opérateur a pour objectif de permettre d'absorber d'éventuels aléas au cours de la production qui n'avaient pas été prévus lors du calcul de l'ordonnancement.

Pour construire un ordonnancement de groupes, un ordonnancement classique est tout d'abord calculé, utilisant quelque méthode que ce soit. On modifie ensuite cet ordonnancement afin de créer des groupes. La création des groupes est réalisée de manière à atteindre un objectif de dégradation du pire ou du meilleur des cas. Cette notion prend tout son sens lorsqu'interviennent les groupes. En effet, selon l'ordre choisi par les opérateurs, l'indicateur de performance global de la solution finalement exécutée peut varier entre les différentes exécutions possibles. Des travaux antérieurs de l'équipe ont montré que l'évaluation du pire et du meilleur des cas se fait en temps polynomial, rendant acceptable le temps de calcul supplémentaire amené par la création des groupes (Pinot and Mebarki, 2008).

Pour cette expérimentation, nous avons choisi de perturber notre système en utilisant les temps de transfert entre les machines. En effet, chaque ordonnancement est calculé sans prendre en compte les temps de transfert, mais les exécutions sur la ligne sont bien entendues réalisées avec des temps de transport. En faisant les expérimentations sur simulateur, nous avons la possibilité de faire varier la vitesse de l'infini, ce qui correspond à un système sans temps de transfert, i.e. non perturbé, à une vitesse quasi-nulle, ce qui correspond à un système où les temps opératoires sont négligeables par rapport aux temps de transfert. Ce choix nous permet de maîtriser à loisir le degré avec lequel notre système est perturbé, et donc mesurer le degré d'absorption des incertitudes par le système de pilotage en fonction d'une perturbation estimée et surtout chiffrée du système physique.

La Figure 51 indique le protocole expérimental suivi. Les instances étudiées sont les instances la01 à la15 de Lawrence²⁵, qui constituent un benchmark reconnu en recherche opéra-

²⁵ <http://people.brunel.ac.uk/~mastjeb/jeb/orlib/files/jobshop1.txt>

tionnelle. Pour chaque instance, l'ordonnancement optimal (noté opt) est calculé, puis les ordonnancements de groupes sont créés. Trois ordonnancements différents sont calculés, avec respectivement 0% de dégradation du pire des cas autorisée ($d0$), 10% ($d0.1$) et 40% ($d0.4$). En pratique, l'augmentation du pourcentage revient à une augmentation de la taille des groupes, ce qui est sensé amener plus de flexibilité lors de l'exécution.

Pour chaque instance, 1000 vitesses différentes ont été testées. A chacune de ces vitesses, on calcule grâce au même algorithme de jobshop qu'utilisé précédemment quel devrait être le Cmax (qui est l'indicateur de performance choisi ici) optimal obtenu. On utilise alors une définition du problème prenant en compte les temps de transfert, calculés à partir de la vitesse choisie. Ce Cmax optimal nous servira de base de comparaison pour la suite des ordonnancements. Le simulateur exécute ensuite chaque ordonnancement sur le système et enregistre le résultat obtenu. Une dernière simulation, notée $reac$, est également réalisée, utilisant une heuristique FCFS (Premier arrivé premier servi), i.e. le comportement réactif myope implémenté sur la ligne.

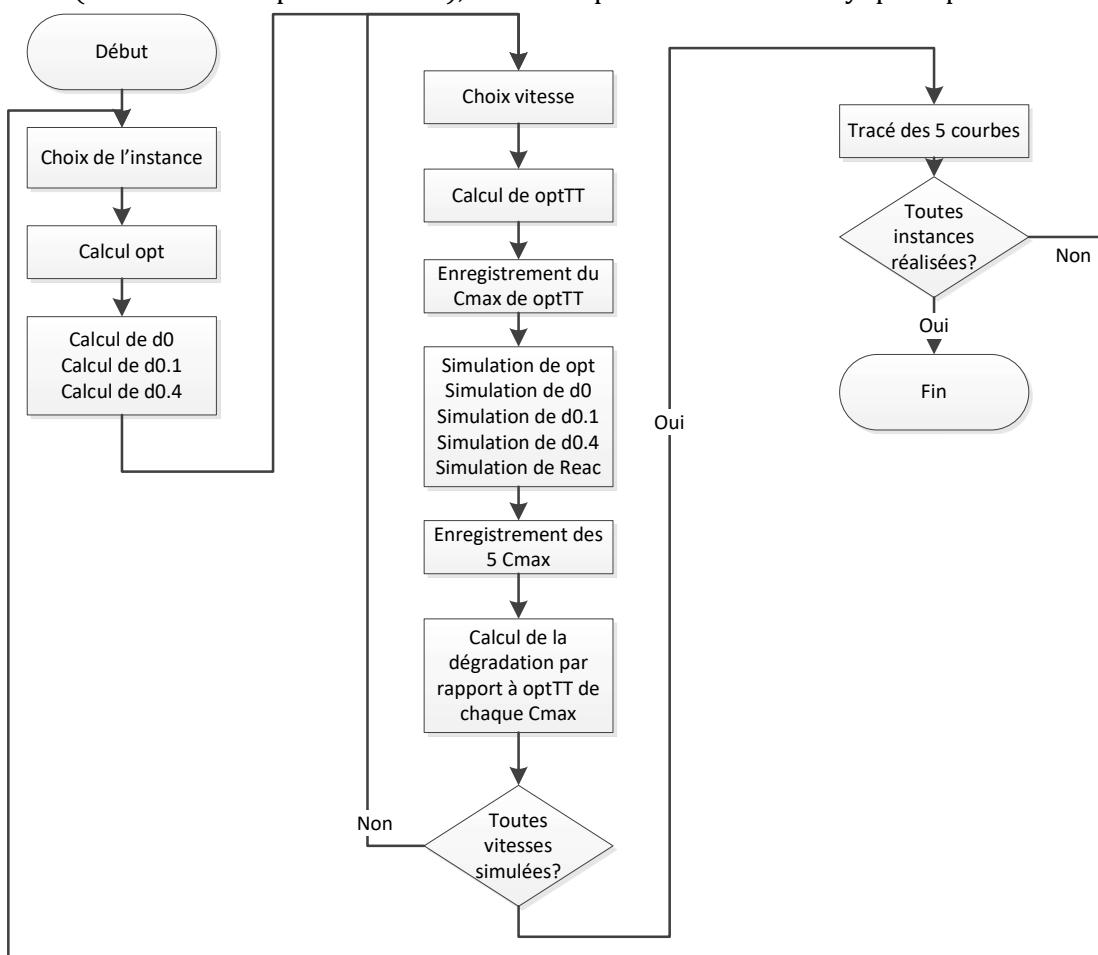


Figure 51 Protocole expérimental

Pour chacune des instances, on trace ensuite l'évolution de la dégradation de la performance par rapport à l'optimal en fonction de l'inverse de la vitesse (proportionnel au degré d'incertitude du système) :

$$\left(\frac{Cmax(ordo)}{Cmax(OptTT)} - 1 \right) \times 100 = f\left(\frac{1}{V}\right)$$

Avec :

$$ordo \in \{opt; d0; d0.1; d0.2; d0.4; reac\}$$

Au niveau des résultats obtenus, les 15 instances montrent un comportement global identique. La Figure 52 présente une vue partielle des résultats de l'instance la15, représentative de l'ensemble des résultats.

À très faible vitesse, c'est-à-dire à grande abscisse, on observe un comportement relativement asymptotique. Ce comportement signifie que l'on a atteint pour tous les ordonnancements le point où la performance n'est plus due qu'au ralentissement des convoyeurs, et non plus à un ordre spécifique de passage sur les postes, qui reste toujours le même quelle que soit la vitesse des transporteurs. On pourrait donc dire que, dans cette zone, les temps opératoires sont complètement négligeables vis-à-vis des temps de transport. On observe donc un rapport constant des Cmax vis-à-vis de l'optimal. Cette zone commence à une vitesse d'environ 0.2dm/s, soit une incertitude de 5. Les performances sont inversement proportionnelles à la flexibilité estimée des ordonnancements.

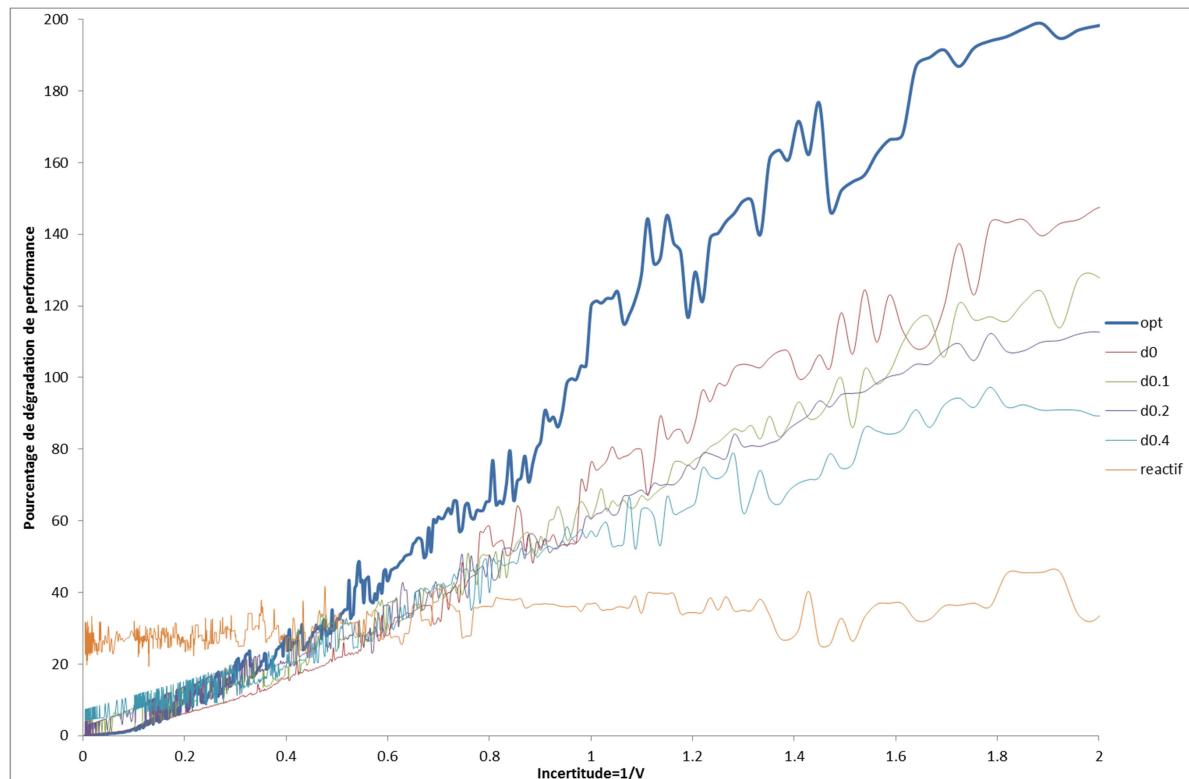


Figure 52 Evolution de la dégradation de performance de l'instance la15

Si l'on s'intéresse ensuite à la zone à haute vitesse, on s'aperçoit que les courbes sont très bruitées. Cela provient du fait que le Cmax est très impacté par les choix faits lors de la production, qui sont changeants selon la vitesse. Proche de l'origine, les ordonnancements prédictif (opt) et prédictif-réactif sans dégradation du pire des cas (d0) tendent vers l'optimal. A contrario, les autres ordonnancements s'échelonnent en fonction de la flexibilité croissante. La zone [0.4 ; 0.6] correspond à une zone où toutes les tendances s'inversent, et les courbes se croisent. Cet intervalle évolue quelque peu en fonction des instances étudiées, mais reste globalement stable. Enfin, le dernier élément remarquable est que la performance de reac reste globalement stable quelle que soit la vitesse.

L'ensemble de ces résultats nous a permis de qualifier la robustesse d'un système de pilotage basé sur l'ordonnancement de groupes vis-à-vis des pertur-

bations engendrées par le système réel. Les perspectives amenées par cette étude sont multiples. A court terme, il serait intéressant de valider le comportement de reac en faisant varier certains paramètres : nous travaillons actuellement à une comparaison avec l'utilisation des champs de potentiels sur la ligne AIP de l'université de Valenciennes (Pach et al., 2012). Au niveau de l'architecture de pilotage en elle-même, nous pensons utiliser la notion d'ordonnancement de groupes afin d'évaluer la faisabilité d'évolution d'architecture de pilotage en ligne, permettant de faire évoluer la hiérarchie de prise de décision en fonction du degré d'incertitude du système. Cette étude constitue la base de ce que nous pourrons développer concernant les méthodes de prises de décision des CPPS dans un environnement incertain.

3.3 Apport des CPPS à une maîtrise efficiente de l'énergie

En parallèle à la communauté internationale, nos travaux ont aussi été amenés à intégrer les notions de développement durable et de maîtrise de l'énergie. Plusieurs travaux différents sont en cours actuellement, mais la thématique par laquelle nous avons débuté cet axe est la génération de l'énergie. En effet, ces travaux ont été menés dans le cadre d'un projet ECOS-Nord avec l'Universidad de los Andes de Merida au Venezuela et avec la thèse de C. Indriago (Indriago et al., 2016a, 2016b, 2016c, 2015a, 2015b, 2014).

Les partenaires vénézuéliens du projet ont une compétence historique dans le contrôle de systèmes dynamiques hybrides, dont la principale application est la production d'énergie à partir de pétrole ou de gaz. Cette classe de systèmes englobe néanmoins beaucoup d'autres applications, telle que la distribution d'eau par exemple. Nous avons concentré notre étude sur une classe de systèmes dynamiques hybrides très représentative de ce domaine d'activité que sont les systèmes de contrôle hybride (HCS) (Antsaklis, 1998).

Les premiers travaux ont permis de définir une architecture de référence basée sur PROSA et dénommée H²CM (Holonic Hybrid Control Model) permettant de s'adapter aux spécificités des HCS. Une seconde partie présentera les différentes évaluations de performances que nous avons pu réaliser sur la base de systèmes de contrôle basés sur cette architecture.

3.3.1 Extensions du paradigme holonique aux systèmes de contrôle hybride

L'application du paradigme holonique aux systèmes hybrides démarre systématiquement par la même interrogation: Quel élément du système peut être considéré comme étant le produit? En effet, l'approche orientée événements discrets est focalisée sur les produits et sur les traitements que les différentes machines et humains opèrent sur ceux-ci (Pannequin et al., 2009; Sallez, 2014; Yang et al., 2009). La nature des produits considérés par les systèmes de contrôle hybrides ne permet pas l'application de ces mêmes concepts. De plus, la problématique d'interconnectivité est différente: soit la production se fait par lots (batch production), ce qui peut être vu comme une production discrète en containers, soit par l'intermédiaire d'un réseau de tuyauterie, où c'est un ensemble de capteurs qui renseignent sur l'évolution du produit. En se concentrant sur le seul comportement hybride, ce sont donc les machines qui sont vouées à prendre en charge la prise de décision, et non les produits eux-mêmes.

Comme indiqué précédemment, H²CM est basé sur PROSA, et plus précisément sur ses trois holons basiques. Le holon Staff n'est pas considéré ici, car son rôle est extrêmement dépendant du contexte et difficile à exprimer de façon générique. De plus, son objectif dans H²CM reste globalement le même que dans une configuration discrète, donc l'hypothèse faite dans ces travaux est de considérer que son modèle et son comportement restent les mêmes que dans un système holonique classique. La Figure 53 introduit le diagramme de blocs élémentaires de H²CM. Deux différences majeures avec la modélisation classique des holons dans PROSA apparaissent :

1. Chaque ressource est dotée d'un Ordre et d'un Produit tout au long de son existence. Le holon Ordre est en charge de la surveillance de la ressource tandis que le holon Produit est en charge de la gamme à appliquer au produit actuellement en fabrication. Le contenu et les objectifs de ces holons Ordre et Produit évoluent constamment pour s'adapter aux changements durant la production, mais cette structure reste en permanence la même;
2. Un lien de récursivité est présent au niveau du holon Ressource. En effet, il peut exister des ressources composées, qui peuvent être décomposées en une ou plusieurs holarchies, comprenant une ou plusieurs ressources et leurs holons Ordre et Produit associés. De manière similaire à la structure précédente, les relations d'agrégation créées ici peuvent changer au cours de l'exécution du système, i.e. des holarchies peuvent être créées, modifiées ou détruites en ligne.

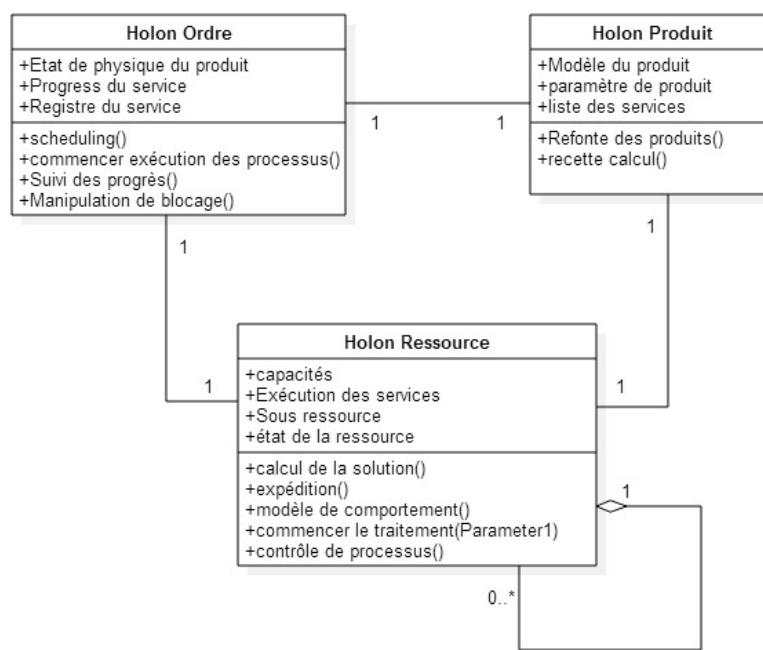


Figure 53 Diagramme de blocs élémentaires de H²CM.

A partir de cette modélisation, plusieurs précisions peuvent être apportées. Tout d'abord, le holon Ordre a exactement le même comportement qu'en discret, car il ne manipule que des variables discrètes. Le seul holon ayant à manipuler des variables discrètes est le holon Ressource (Figure 54), qui contient un modèle de description du système hybride permettant de transposer les variables hybrides en variables discrètes (sous la forme d'événements ou de seuils par exemple).

Une seconde précision concerne le holon Produit. Il existe dans cette classe de systèmes la notion de gammes Maitres (Master recipes), permettant d'exprimer globalement quelles transformations le produit doit subir pour être considéré comme fini, mais pas le moyen d'obtenir ces transformations. Ainsi, lors de l'exécution, il est très courant d'observer une gamme réellement exécutée très différente de la gamme Maitre, en fonction de paramètres tels que la qualité du produit brut, la disponibilité des machines ou leur usure par exemple. Il était donc nécessaire de prendre cet aspect en compte, ce qui a été fait en intégrant la notion de MServices dans la définition de l'architecture (section 3.2.1). Cette problématique a d'ailleurs constitué l'origine des travaux sur les gammes flexibles de la thèse de M. Gamboa Quintanilla transposée dans le domaine manufacturier (discret).

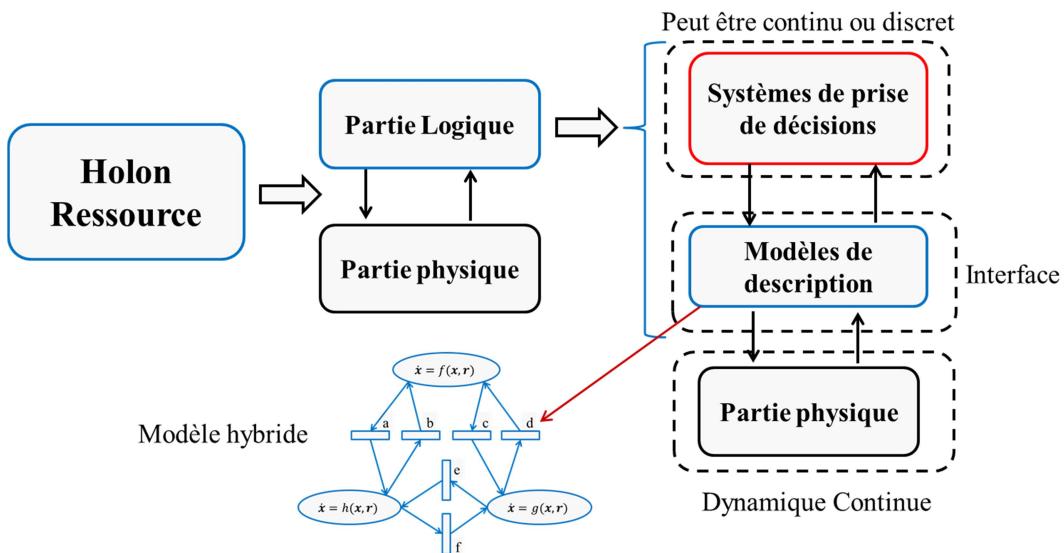


Figure 54 Structure d'un holon Ressource

La définition d'H²CM constitue un apport important dans le domaine de la conception de systèmes de contrôle pour HCS. En effet, par nature, ces systèmes sont de très grande dimension, ce qui rend l'utilisation du paradigme holonique particulièrement intéressante. Néanmoins, du fait du manque de structuration de la conception de ces architectures, les modèles présents dans la littérature ne présentaient que des développements ad hoc peu réutilisables. H²CM apporte une standardisation à la fois dans l'orchestration et le développement de chorégraphies de ce type de systèmes qui devrait aider à la dissémination du paradigme holonique au sein de cette communauté.

3.3.2 Evaluation de performance d'un contrôle basé sur le paradigme holonique pour les systèmes de contrôle hybride

En ce qui concerne l'évaluation de performances d'H²CM, nous avons suivi deux voies distinctes. La première est l'application à un cas industriel de génération d'électricité à partir de turbines à gaz et de turbines à vapeur. Cette évaluation a permis de montrer de bonnes performances en termes de réactivité aux pannes et de reconfigurabilité (Indriago et al., 2016c).

Une seconde voie concerne un cas d'étude classique des systèmes hybrides : un système de réservoirs d'eau à commutation d'arrivées. L'objectif de cet exemple est de disposer d'un cas

d'étude simple nous permettant non seulement de montrer une bonne performance, mais également des propriétés plus spécifiques telles que la stabilité du système de contrôle par exemple (Indriago et al., 2016a).

Le système est constitué de N réservoirs ayant un débit de fuite constant et d'un seul serveur, permettant de remplir alternativement l'un des réservoirs sans temps de latence au changement de position. Pour disposer d'un système fermé, le débit du serveur est fixé comme étant égal à la somme des débits de fuite des réservoirs, ce qui induit une quantité totale de liquide constante dans le temps dans le système. La Figure 55 présente la configuration du système avec $N=3$.

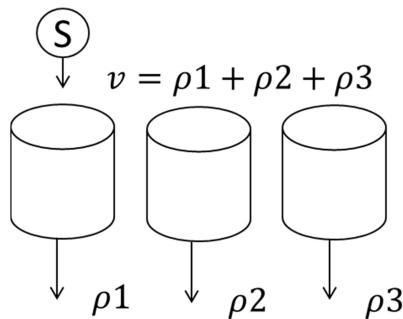


Figure 55 Système de commutations d'arrivée avec $N=3$.

Nous avons défini une chorégraphie simple, basée sur un algorithme de planification en ligne de la position du serveur en fonction de la date de vidage des réservoirs. Pour évaluer la performance du système de contrôle, nous avons collaboré avec une équipe spécialiste de recherche opérationnelle au sein de l'IRCCyN, SLP, et plus particulièrement O. Morineau. Nous avons alors défini un critère de performance du système qui était le nombre de changements de position du serveur. A partir de là, nous avons développé un algorithme MILP permettant de minimiser cet indicateur et avons comparé les résultats à ceux obtenus en simulation, réalisée en Java, de notre système de contrôle. Les résultats sont intéressants à plusieurs titres. Tout d'abord, l'algorithme MILP ne peut optimiser qu'un horizon très court de calcul. Cela s'explique par la nature chaotique du système de réservoirs, qui implique un très grand nombre de variables à optimiser simultanément. De plus, les temps de calcul augmentent exponentiellement, ce qui ne permet pas de comparaison à plus de $N=3$ réservoirs. Enfin, les résultats de l'architecture H²CM étaient relativement proches de l'optimum, et la solution optimale a systématiquement été observée au moins une fois pour chaque instance en réglant correctement l'horizon de planification de notre algorithme de réservation du serveur.

Nous avons également étudié la stabilité de notre système de contrôle. Pour cela, nous avons comparé l'évolution de notre système sur un horizon de temps très long avec celui communément admis dans la littérature (Chase et al., 1993). Afin de prouver la stabilité, nous avons fait l'hypothèse que nous devions prouver la cyclicité du système. Cette hypothèse est limitative, car il est clair que le système peut être stable sans être cyclique, mais ce cas ne nous est pas possible à prouver dans le cadre de l'architecture que nous proposons.

Pour cette étude, nous avons généré aléatoirement des instances du problème à $N=3$ réservoirs afin de diversifier les situations rencontrées par le contrôle. Nous avons ensuite évalué au cours du temps le nombre de cycles rencontrés par notre simulation pour chaque méthode, ainsi qu'une moyenne sur les durées de cycles. Nous avons également évalué le nombre d'instances du contrôle classique qui échouaient, c'est-à-dire pour lequel le contrôle classique ne

pouvait pas fournir de réponse appropriée. Les résultats illustrés Figure 56 montrent de très bonnes dispositions du contrôle basé sur H²CM au regard de la stabilité du contrôle. Même si la stabilité ne peut être démontrée à 100%, les résultats se stabilisent à plus de 90%, la nature chaotique du système pouvant probablement expliquer pour partie cette différence. L'évolution de la durée des cycles est également instructive, car elle montre que le contrôle proposé est apte à trouver des cycles très longs, là où le contrôle classique ne trouve que des cycles courts. Enfin, on notera la grande proportion d'instances où le contrôle classique échoue, là où le contrôle basé sur H²CM trouve systématiquement une solution.

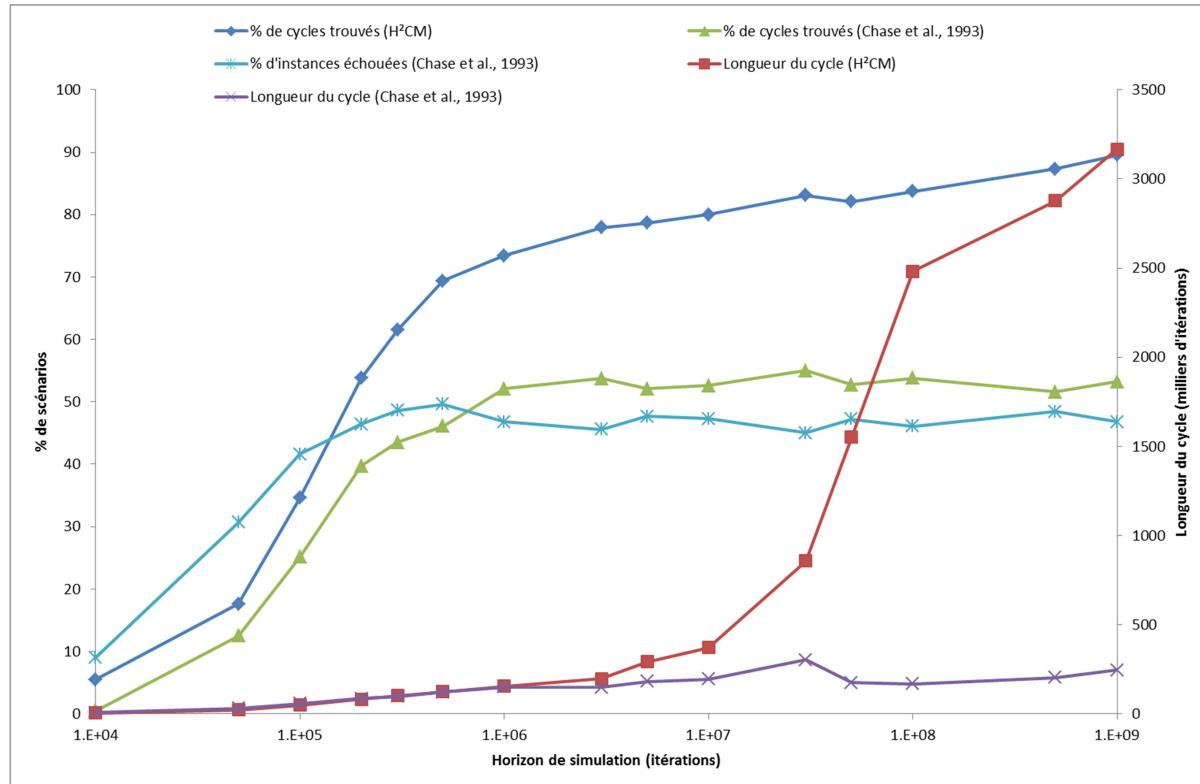


Figure 56 Analyse de stabilité du contrôle basé sur H²CM

L'utilisation d'un cas d'étude simple a permis de valider plusieurs propriétés indispensables à l'architecture proposée en vue d'une application sur un système plus complexe, où ces propriétés sont plus délicates à estimer et vérifier. Il est néanmoins toujours du ressort du concepteur de la chorégraphie de définir des algorithmes cohérents avec ces propriétés et d'améliorer le niveau de performance obtenu par le système de contrôle.

3.4 Bilan

Les travaux présentés dans cette section ont permis de dégager de nombreuses perspectives grâce aux résultats obtenus et surtout aux collaborations établies lors de ces travaux et qui ont toutes vocation à perdurer. Si la thématique CPPS n'apparaît pas encore clairement dans les travaux mentionnés, tous sont englobés dans cette notion et ont in fine contribué à l'amélioration des axes de recherche principaux autour des CPPS. La section suivante a pour objectif de présenter les perspectives majeures issues de ces travaux et replacées dans le contexte des CPPS.

Chapitre 4. Conclusions et Perspectives

Les chapitres précédents ont permis de dégager trois axes majeurs de recherche concernant les CPPS. Ces trois axes ayant vocation à perdurer encore de nombreuses années, nous utiliserons également cette classification et présenterons donc nos perspectives de recherche en 4 parties, chacune représentant un axe de recherche et la dernière présentant un lien avec la formation post-bac autour de ces thématiques.

4.1 Vers une dissémination des CPPS agiles

Les futurs systèmes industriels ont des objectifs axés notamment sur l'agilité à la fois du système physique, mais également du système d'information qui y est connecté. Cet objectif doit nécessairement passer par des notions telles que la reconfigurabilité du système physique, la flexibilité et l'interopérabilité des systèmes d'informations.

Concernant la reconfigurabilité du système physique, nous proposons plusieurs pistes de recherche relatives à la mobilité des éléments de production au sein de l'atelier. Le projet STAR, mené par des membres de l'équipe avec l'IRT Jules Verne, est une première illustration des besoins, en ce qu'il concerne la conception (physique et contrôle) d'AGV à faible coût permettant d'évoluer en flottes dans un atelier et permettant une reconfiguration très rapide de l'outil de production d'un équipementier automobile. Nous avons l'opportunité de travailler sur un bassin industriel local ayant la spécificité de produire des pièces de très grandes dimensions (avions, bateaux, éoliennes, pour n'en citer que quelques exemples). Pour ces industries, il est pertinent de considérer un outil de production évoluant autour du produit et non un produit évoluant au sein d'un atelier. La reconfigurabilité de l'outil passe donc par la possibilité de faire évoluer en continu la position des machines de production autour des produits. Un exemple typique de cette opportunité est lié aux travaux d'autres équipes de l'institut qui développent des solutions de ponçage robotisée. Chaque robot ayant une envergure limitée, il est probablement pertinent d'utiliser des chariots type AGV afin de donner de la mobilité aux robots afin de leur permettre de changer de zone d'action une fois leur tâche terminée et contrôlée par l'opérateur humain.

De manière générale, l'intégration du pilotage de flottes d'éléments mobiles doit être considérée à une échelle plus large dans les architectures de contrôle. Une thématique de recherche à développer dans cet objectif est le pilotage de flottes multimodales. De plus en plus d'industries considèrent par exemple l'utilisation de drones en complément des AGV, à la fois pour le transport de petits containers de produits ou pour le complément des capacités de perception des AGV, forcément limitée à une zone restreinte autour de l'AGV. Cet exemple met en avant un point encore peu étudié dans la littérature qui concerne le partage des capacités cognitives de plusieurs CPPS afin d'augmenter leurs capacités propres. Nous avons récemment dépo-

sé des réponses aux appels à projets en partenariat avec l'IRT Jules Verne concernant cet aspect, sans que cela n'ait actuellement abouti.

Concernant la flexibilité du système d'informations, nous pensons que la notion de MES actuellement sur le marché doit être rapidement dépassée afin de tendre vers un concept de HMES (Holonic Manufacturing Execution System) permettant d'intégrer les considérations principales présentes dans le paradigme holonique à la définition traditionnelle du MES. Ainsi, il serait possible de disséminer l'utilisation d'architectures de contrôle hybrides (HCA) telles que nous avons pu en proposer précédemment lors d'un dépôt de projet ANR commun avec les membres du GT IMS² du GDR MACS (Cardin et al., 2015). Ces architectures de contrôle sont l'une des voies les plus prometteuses en ce qui concerne la réponse du système de contrôle en cas de perturbations, mais revêt de nombreux verrous dans la phase d'implémentation. Nous proposons de coupler nos compétences sur l'ordonnancement de groupes à la notion de HCA afin de proposer un contrôle navigant entre différents niveaux de flexibilité de l'ordonnancement de groupes afin de s'ajuster en temps réel au niveau de perturbation estimé du système de production. Cet objectif de recherche général comporte plusieurs aspects exploratoires, comme l'évaluation du niveau de perturbation du système ou le passage d'un ordonnancement déjà commencé à un autre ordonnancement en temps réel, pour lesquels nous devrons fournir des réponses au préalable.

Sur l'objectif d'interopérabilité, les architectures de contrôle des systèmes de production ont actuellement des difficultés à proposer des standards d'interopérabilité permettant de s'adapter à toutes les configurations technologiques que nous pouvons rencontrer sur le terrain. Le développement et la dissémination du concept de CPS dans le cadre manufacturier couplés au développement des technologies cloud devraient proposer une solution novatrice à ces problèmes d'interopérabilité. Au sein d'un réseau de CPPS, chaque unité a plusieurs tâches principales à réaliser :

1. Participation à la prise de décision (négociations) ;
2. Remontée d'informations cognitives concernant son état actuel ou à venir (données agrégées provenant des capteurs et de modèles de comportement) ;
3. Contrôle de l'activité du système physique (paramétrage, démarrage, etc.) ;
4. Suivi de l'activité du système physique (évaluation de performance, suivi de la qualité, etc.).

Parmi ces tâches, certaines sont directement liées au système physique (2 et 4 pour les capteurs, 3 pour les actionneurs), alors que la tâche n°1 est directement liée à la partie informationnelle du CPPS et son intégration au réseau de CPPS. Nous avons proposé dans nos travaux antérieurs une architecture de contrôle holonique orientée-services (SoHMS) particulièrement bien adaptée à l'application dans un environnement web et basée sur des concepts de services initialement développés pour le web. De ce fait, l'application d'une partie de l'architecture sur le réseau se décompose très facilement entre une partie implémentée dans le cloud et une partie restant au niveau de l'atelier (Figure 57).

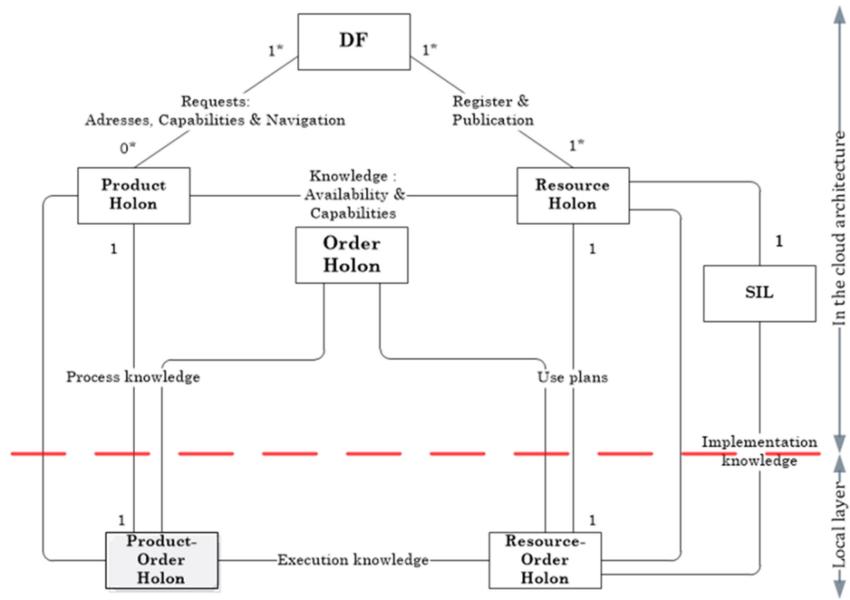


Figure 57 Décomposition de l'architecture SoHMS pour intégration dans le cloud

Dans cette nouvelle architecture (Gamboa Quintanilla et al., 2016c), la partie informationnelle des CPPS serait intégrée aux holons Ressource présents dans le cloud et exécuteraient la tâche 1, alors que la remontée d'informations (tâches 2 et 4) et la relation avec le système physique seraient liées aux holons Produit-Ordre et Ressource-Ordre. Afin de valider cette approche, nous avons effectué quelques études préliminaires ayant montré que la position suggérée de l'interface cloud permettait de limiter à un nombre relativement faible le nombre de messages échangés et donc les potentiels problèmes de surcharge du réseau. La Figure 58 présente le nombre de messages échangés (*up* signifiant vers le cloud, *down* depuis le cloud) pour chaque type de CPPS rencontré (stations de travail, échangeurs, palettes). Cette évaluation nous a permis de valider la position du point de découplage entre local et cloud que nous avons présenté, en estimant au maximum un nombre de 8 messages par seconde transitant via l'interface, ce qui est très peu au regard des capacités du réseau.

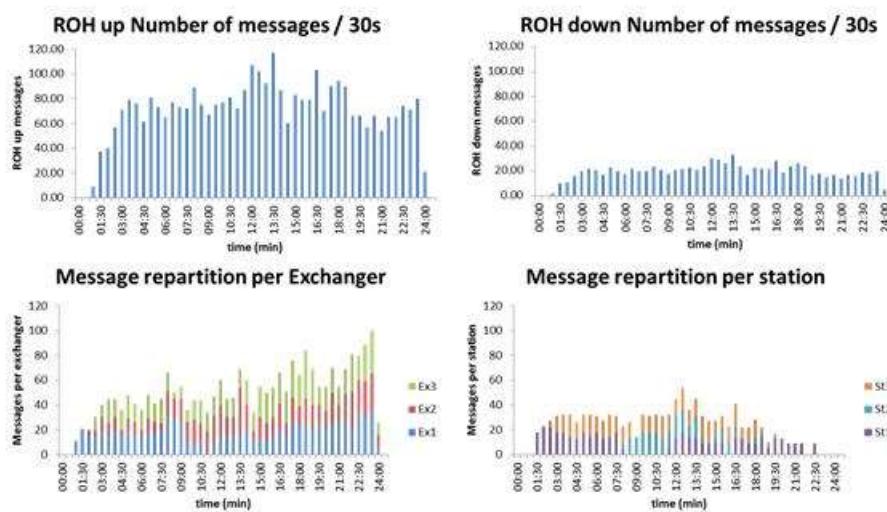


Figure 58 Echange de messages au travers de l'interface cloud pour la production de 25 produits sur SOFAL

Cette validation préliminaire nous permet d'envisager désormais l'implémentation d'une solution complète d'architecture de contrôle délocalisée dans le cloud, permettant de contrôler des CPPS implantés en local et ayant une action directe et distribuée avec les actionneurs du système physique. Cette architecture a pour objectif d'être la plus générique possible, s'orientant probablement vers des systèmes à routages multiples afin de s'adapter aux systèmes physiques les plus flexibles possibles. De plus, elle se doit d'être très rapidement paramétrable afin de s'adapter aux différentes configurations d'atelier et de systèmes d'information présents dans les entreprises. Nous pensons que ce type de système de contrôle pourrait devenir la base pour des PME ne bénéficiant pas de l'intégration de structures logiciels issues de grands groupes et désireuses d'à la fois rendre leur outil de production plus flexible, mais également pouvoir interagir plus efficacement et en temps-réel avec ses partenaires (clients, fournisseurs et sous-traitants). En effet, l'utilisation d'une plateforme cloud permet une mise en commun réglementée et en temps-réel d'informations concernant l'activité de chacune des entreprises et de leur outil de production respectif, ce qui rend les notions d'interopérabilité des systèmes triviales.

L'enjeu de l'agilité des CPPS est un élément prépondérant dans la performance que ces innovations pourront avoir dans les systèmes industriels futurs. Les architectures que nous avons à concevoir doivent amener une plus-value dans leur faculté à évoluer en temps-réel, que ce soit au niveau des ressources (reconfigurabilité et pilotage de flottes multimodales) ou au niveau de la prise en compte des perturbations (flexibilité et architectures de contrôle hybrides). Cette performance intrinsèque doit être accompagnée de fonctionnalités d'interopérabilité entre les systèmes de contrôle, afin de garantir une agilité aux frontières plus larges que celles de l'atelier en développant plus avant les plateformes de cloud manufacturing grâce à l'apport des SoHMS.

4.2 Vers une maturité technologique des CPPS

Evidemment, cette mutation dans l'architecture de contrôle de haut niveau des systèmes de production amène des changements potentiellement importants au niveau de la technologie des systèmes de production en eux-mêmes. Si la flexibilité des moyens est étudiée par d'autres communautés, nous pensons pouvoir proposer des éléments concernant la commande de ces moyens. En effet, la commande des machines de production se fait actuellement à un niveau sémantique très bas, souvent de l'ordre du bit ou du mot, via des protocoles de communication hérités des réseaux locaux industriels développés dans les 40 dernières années.

Depuis notre perspective, les contraintes requérant l'utilisation de tels protocoles ne se justifient pas sur l'ensemble de l'atelier. En effet, leur qualité première est le déterminisme de leur comportement, ce qui impose des contraintes sur le volume de données échangées afin de ne pas saturer le réseau. Or, si certaines fonctions nécessitent ce déterminisme et une certaine notion de temps-réel au sein du contrôle, d'autres fonctions de coordination n'ont pas ce besoin : cet aspect est souvent référencé en tant que temps-réel souple (near real-time) dans la littérature. Si certains travaux orientés « cloud manufacturing » proposent la conception d'architectures de contrôle sans API (PLC-free), nous proposons plutôt un découpage technologique en fonction des objectifs et contraintes de chaque partie du système. La Figure 59, version modifiée de la Figure 47, propose un exemple d'instanciation du modèle SoHMS déporté dans le cloud présenté précédemment à l'application SOFAL. Il est très clair que les robots ont toujours

besoin d'un contrôleur, tout comme il ne semble pas raisonnable de totalement supprimer les automates au plus près des capteurs et actionneurs dans le cas de systèmes de production haute cadence. De plus, il est envisageable de considérer que certains systèmes, contrôlés par des systèmes distincts (2 systèmes avec chacun un API par exemple) aient besoin d'un moyen de communication bas niveau tel que présenté précédemment. Nous proposons que le niveau d'agrégation atomique du CPPS soit alors l'élément du système qui ne peut être dissocié sans altérer sa performance de communication avec les autres CPPS. Dans le cas présenté précédemment, le CPPS proposé engloberait les 2 systèmes comme s'ils n'étaient qu'un. Ainsi, la communication entre CPPS se ferait uniquement en temps-réel souple, ce qui permet d'envisager des communications à plus haut niveau sémantique, notamment en utilisant les MServices tels que définis précédemment.

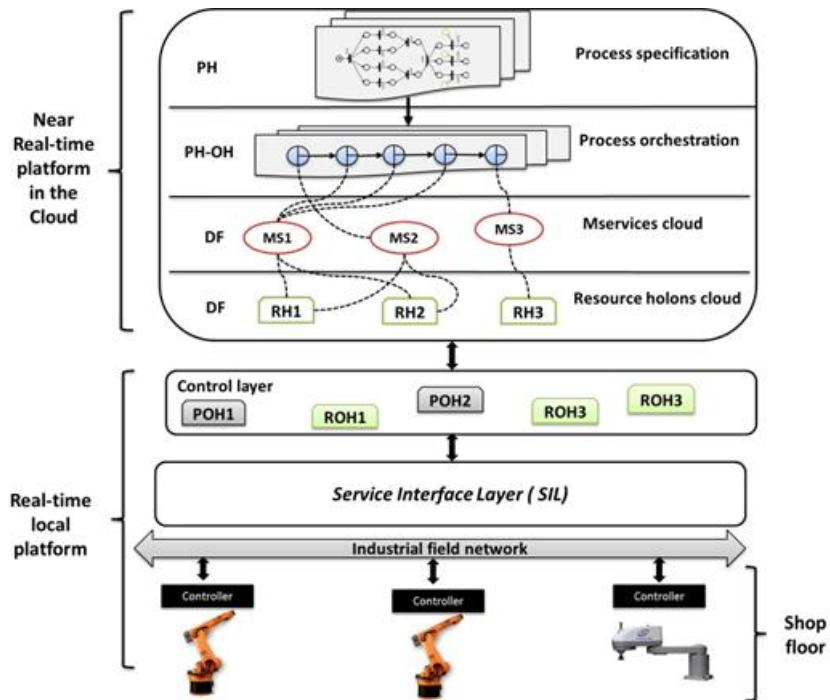


Figure 59 Exemple d'instanciation de l'architecture SoHMS dans un contexte cloud

L'axe majeur de développement restant à étudier au niveau technologique correspond à la couche SIL présentée Figure 59. Au travers de cette architecture, la transition entre les services issus du cloud et le protocole de communication accepté par les entités bas niveau doit être réalisée. L'objectif des travaux à venir est de proposer un protocole ouvert permettant de minimiser, voire supprimer, cette transition en augmentant le niveau sémantique accepté par les entités à leur interface supérieure. Il est donc nécessaire de développer des API, contrôleurs de robots ou de MOCN orientés-services, non seulement dans leur communication, mais également dans le paramétrage des programmes exécutés sur ces éléments. En effet, au niveau programmation, des éléments nouveaux sont à proposer afin de simplifier la modularité des programmes et leur réutilisabilité. Au niveau communication, des tentatives de solutions ont déjà été proposées, propriétaires comme OPC-UA (Domingues et al., 2016) ou non comme MSB (Manufacturing Service Bus) (Morariu et al., 2013b), mais leur intégration avec la notion de MServices reste à étudier et à développer.

Si la disparition du besoin de SIL par l'intégration de ces fonctions directement dans les contrôleurs semble la meilleure option à long terme, il est néanmoins nécessaire de proposer un

SIL permettant d'intégrer à l'architecture des matériels préexistants ou ne disposant pas de ces fonctionnalités. Pour cela, il nous semble pertinent de développer une approche dirigée par les modèles permettant de générer automatiquement le SIL pour chaque CPPS du système. Cette approche nécessite la modélisation des fonctionnalités du CPPS, du protocole de communication qu'il reconnaît, des MServices pouvant lui être adressés (et présents dans le DF) et de la correspondance entre MServices et programmes ainsi qu'entre paramètres des MServices et paramètres des programmes du contrôleur. A priori de cette étape, une formalisation des protocoles dans la transformation de modèle est nécessaire et pourra constituer le premier jalon de ces travaux.

Ces travaux pourront également trouver leur place dans un projet tel qu'Arezzo (Berger et al., 2015), que nous souhaitons porter avec l'université de Valenciennes, et destiné à proposer un générateur d'émulateurs de systèmes de production flexibles afin de rendre plus simple le benchmarking d'architectures de contrôle telles que celles présentées précédemment. Pour ce benchmarking, la meilleure base de travail pour la création est probablement Bench4Star (Trentesaux et al., 2013b). L'une des premières étapes de la démarche de génération est la modélisation des scénarios dans l'outil de modélisation, afin que le système puisse intégrer les évènements perturbant la production. Cette intégration de scénario n'est pas triviale, car elle intervient à plusieurs niveaux de l'architecture de contrôle, ce qui implique de donner à l'utilisateur la possibilité de modéliser la manière d'interagir avec les données du système de contrôle (par exemple les MServices listés dans le DF pour prendre en compte une panne machine, la création d'un holon ordre pour prendre en compte l'arrivée à une date donnée de nouveaux ordres de fabrication avec un niveau de priorité élevé, etc.).

Enfin, des travaux relatifs à la conception de CPPS sont nécessaires. Comme on peut le noter dans l'état de l'art réalisé par (Hehenberger et al., 2016), de nombreuses directions de recherche sont actuellement explorées dans cette thématique, principalement concernant les outils de modélisation, de simulation, le cycle de vie des CPPS et les architectures et paradigmes de comportement. Ce dernier point rejoint particulièrement nos travaux, au travers de la définition d'architectures de contrôle agiles et orientées-services. Ces travaux pourront trouver leur place dans la phase de conceptualisation des architectures d'interaction entre les CPPS, à condition de réussir à faire converger la littérature de la même manière que PROSA a réussi à le faire il y a quelques années, mais avec une description de l'architecture beaucoup plus fine et fonctionnelle pour envisager un passage à l'implémentation via IDM.

L'augmentation des performances de l'architecture de contrôle doit s'accompagner d'une augmentation de la maturité technologique des CPPS au niveau de l'atelier. Cette augmentation passe par une amélioration des protocoles et interactions permettant la collaboration entre CPPS, notamment par la prise en compte de la notion de MService et de tout ce que cela implique pour une intégration totale à la commande des CPPS.

4.3 Vers des CPPS durables

La notion de durabilité revêt plusieurs aspects qui devront être traités par les CPPS pour leur intégration dans les systèmes industriels futurs : production d'énergie, distribution au sein des futures smart grids, évaluation de performance énergétique des moyens de production, maîtrise énergétique des process pour ce qui concerne la gestion raisonnée de l'énergie, mais éga-

lement interactions sociales avec les opérateurs humains et coopération pour des prises de décision en ligne.

Cette thématique a bien évidemment vocation à se poursuivre avec les universités vénézuéliennes, celle de Merida (Universidad de Los Andes) avec laquelle nous avions déjà un projet ECOS-Nord, mais également celle de Barquisimeto (UNEXPO) dans laquelle d'anciens doctorants du projet sont désormais en poste. Cette coopération a pour objectif de développer les fondements théoriques précédemment définis pour la conception d'architectures de contrôle flexibles de systèmes industriels réels. Ainsi, une première étude est en cours sur une usine de fabrication de ciment, couplant des productions batch à des productions continues. Cette usine est de taille modérée, ce qui permettra de valider les concepts sur un exemple de complexité raisonnable. L'objectif suivant sera de travailler à l'échelle d'une usine de production d'électricité basée sur le pétrole, ce qui propose une taille et une complexité bien supérieure.

Une seconde thématique de recherche concerne la distribution d'énergie. Le développement des réseaux de distribution intelligents, appelés « smart grids », dans les prochaines années propose un ensemble de problématiques pour lesquelles une réponse basée sur les CPPS s'avère très pertinente. En effet, le développement de l'intelligence sur le réseau de distribution s'accompagne du développement d'un réseau d'information parallèle à la distribution. Chaque nœud de la distribution n'est plus simplement qu'un élément transformant le flux électrique, mais un élément doté de capacités de détection et de prise de décision permettant d'optimiser l'utilisation des ressources, en bref un CPS. Cette nécessité est apparue lors du développement massif de sources d'énergie renouvelables : ces sources ont la particularité d'être dépendantes d'événements extérieurs (vent, ensoleillement, etc.) qui ne peuvent être contrôlés. La répartition de l'énergie issue de ces sources doit donc proposer soit un stockage (généralement très coûteux et limité) soit une utilisation directe. Cette utilisation doit répondre à de nombreuses contraintes du fait de la volatilité de la production et du coût du transport de l'énergie. Il est donc nécessaire de mettre en place des mécanismes permettant d'optimiser en temps-réel la distribution au plus juste et au plus proche des énergies renouvelables produites. Nous avons entamé une coopération avec l'IPB de Bragança (Portugal) sur ces thématiques (Ferreira et al., 2015), car nous pensons que des propositions telles que l'utilisation du paradigme holonique pour la conception des architectures de contrôle des smart grids n'ont pas encore été suffisamment exploitée dans la littérature. De plus, les fondements théoriques que nous avons proposés sur les systèmes hybrides devraient s'adapter parfaitement aux contraintes que proposent les smart grids. Il est donc nécessaire désormais de prouver ces concepts sur des cas d'études réalistes.

Une distribution intelligente de l'énergie au niveau des ateliers de production aura un impact important sur la consommation de ces derniers, dans des zones où l'installation de sources d'énergie renouvelable pourra permettre une consommation au plus proche et lisser les pics de charge. Cette notion de pic de consommation est d'ailleurs prise très au sérieux par de nombreuses filières industrielles. Nous avons mis en place en décembre 2013 ECOTHER, un projet dans le cadre de l'appel à projets ISI (Innovation Stratégie Industrielle) de BPI France en partenariat avec le laboratoire GEPEA (UMR CNRS 6144), le LIMOS (UMR CNRS 6158) et plusieurs PME françaises de la filière de production d'élastomères. L'objectif de ce projet est la relance de la filière par la maîtrise énergétique de cette industrie très énergivore. Si le GEPEA s'occupe de toute la partie optimisation des procédés, nous avons proposé de travailler sur l'optimisation de la consommation globale des ateliers, prenant en compte la dynamique issue de la gestion de production. Pour cela, notre coopération avec le LIMOS nous amène à proposer une méthodologie de prise en compte de l'énergie dans les modèles de simulation de flux. Ces travaux se dérou-

lent dans le cadre des travaux de thèse de M. Kouki (Kouki et al., 2017, 2015a, 2015b), en contrat CIFRE avec l'entreprise TechTeam (Lyon). Cette thématique est actuellement très ciblée sur la démonstration de faisabilité et la création d'outils directement utilisables par les ingénieurs de la filière afin d'optimiser leur consommation énergétique propre. Toutefois, d'intéressantes perspectives s'ouvrent à partir de ces outils. En effet, de tels outils, distribués au sein de chaque CPPS, pourront s'inscrire dans le niveau de capacités C5 des CPPS, et ainsi leur fournir des capacités cognitives leur permettant d'évaluer *a priori* la consommation énergétique liée à leur planning d'utilisation. Ainsi, les niveaux hiérarchiques supérieurs à ces CPPS pourront agréger ces évaluations de consommation et modifier le comportement de ces CPPS (modification du planning, de l'affectation des ressources, fonctionnement en mode dégradé, etc.) afin de lisser ou réduire la consommation globale de l'atelier.

Cette thématique rejoint également les résultats que nous avons obtenus dans le cadre de l'agilité des systèmes. En effet, nous disposons actuellement d'une architecture de contrôle permettant de piloter des ateliers flexibles à routages multiples, pourvue d'une orchestration relativement simpliste. Cette architecture nous offre la possibilité de mettre en œuvre de nombreuses politiques alternatives d'orchestration relativement facilement et de les tester en mode benchmarking. Les capacités d'évaluation de performances énergétiques des CPPS ouvrent de nombreuses possibilités de prise en compte du coût énergétique de chaque opération dans le pilotage temps-réel des systèmes (Trentesaux and Giret, 2015). Nos collaborations déjà existantes avec les collègues spécialistes de Recherche Opérationnelle de l'IRCCyN seront mises à profit afin de proposer des solutions innovantes à cette problématique finalement peu explorées actuellement dans la littérature (Giret et al., 2015; Trentesaux and Prabhu, 2014).

Une dernière thématique importante pour la durabilité des CPPS est l'évaluation de l'acceptabilité des CPPS par l'humain. Plusieurs points de vue sont à prendre en compte. Tout d'abord, la nouvelle position du gestionnaire de production doit être considérée. Pour lui, le suivi de production devient plus complexe à mesure que la performance de chaque CPPS est issue d'un comportement émergent. De ce fait, il est de plus en plus difficile pour lui d'anticiper l'impact de ses décisions sur le comportement à court terme du système. Il est donc nécessaire de renouveler les indicateurs et la manière de les suivre actuellement mis en œuvre dans les outils type MES ou ERP. Pour cela, des outils de prévision à court terme de l'état futur du système en l'état ou après modification d'un jeu de paramètres constitueraient une plus-value importante et un outil d'aide à la décision crucial pour améliorer la prise de décision à ce niveau. Les outils de simulation en ligne que nous avons développés précédemment pourraient parfaitement s'intégrer dans ce cadre, mais nécessitent un effort important de recherche sur la génération de ces modèles pour les intégrer aux outils de suivi d'indicateurs et faciliter leur implantation.

Le second point de vue concerne la relation quotidienne entre les CPPS et l'opérateur humain. Au cours des dernières années, nous avons eu la possibilité de travailler avec l'équipe PsyCoTec de l'IRCCyN, spécialisée en psychologie cognitive, autour des thèses de G. Pinot et C. Guérin. Lors de cette collaboration, nous avons étudié la coopération entre l'homme et la machine sur la problématique de l'ordonnancement de groupes (Mebarki et al., 2013). En effet, lors de la phase d'exécution de l'ordonnancement, l'opérateur doit choisir l'ordre dans lequel il exécute les groupes d'opérations définis au préalable. Ce choix peut s'avérer relativement complexe, c'est pourquoi il semble judicieux de fournir à l'opérateur un jeu d'indicateurs de performances calculés en temps-réel afin de l'aider dans son choix. Jusqu'ici, la communauté ne proposait qu'un seul indicateur (Marge Libre Séquentielle – FSM). Or, ne proposer qu'un seul choix à l'opérateur re-

vient à faire le choix à sa place, puisqu'il aura tendance à systématiquement se fier à la machine. Notre idée a donc été de mettre à disposition de l'opérateur tout un jeu d'indicateurs ainsi qu'une contradiction systématique de la part de la machine (principe de contrôle mutuel) afin de favoriser l'activité intellectuelle de l'opérateur au cours de la prise de décision. Les résultats préliminaires que nous obtenons montrent un temps de réflexion plus long de la part des opérateurs mais des performances globalement améliorées. La conclusion que nous avons tirée de cette étude est qu'il est nécessaire d'établir une réelle coopération entre l'opérateur humain et la partie cyber du CPPS afin d'améliorer la performance globale en utilisant les points forts de chaque élément de l'architecture à bon escient. De nouvelles expérimentations sont lancées avec le MELT de Tlemcen dans le cadre de la thèse de Z. Yahouni avec pour objectif de tester l'outil d'aide à la décision avec de nouveaux objectifs de production (minimisation des retards, du makespan, etc.) afin de tester sa robustesse et son utilisation par les opérateurs.

La durabilité des CPPS est un enjeu actuel crucial pour leur acceptation et leur dissémination en industrie. Les systèmes de contrôle que nous allons concevoir doivent à la fois intégrer toutes les notions d'empreinte environnementale dans la prise de décision en temps-réel et améliorer la coopération avec l'humain afin de fournir à celui-ci un ensemble d'outils innovants lui permettant d'améliorer le comportement global des systèmes.

4.4 Formation

Comme nous avons pu le voir tout au long de ce document, la notion de CPPS engendre une mutation profonde de la manière de concevoir les systèmes de production. Au niveau formation en ingénierie, il y a de ce fait probablement une nouvelle offre à créer, car les métiers requis diffèrent largement de ceux de la mécatronique, classiquement visés pour ce type de système par manque d'offre bien ciblée (Bradley et al., 2015).

Tout d'abord, il est désormais relativement clair que les process de fabrication flexibles sont les prochains axes de développement du domaine qui seront abordés. Jusqu'à maintenant, il n'y a pratiquement que les process d'assemblage qui ont été étudiés, principalement car ces process sont relativement simples à mettre en œuvre par quelqu'un qui n'est pas initialement du domaine. Toutefois, tous les process sont potentiellement visés par ce changement de paradigme. A titre d'exemple, nous pourrons citer la fabrication par enlèvement de matière, par impression 3D, tous les process liés au drapage des matériaux composites ou encore le soudage robotisé. L'un des objectifs industriels majeurs qui est visé, et particulièrement dans le bassin ligérien, est la fabrication de pièces de (très) grandes dimensions, que ce soit dans les industries navales, aérospatiales ou d'énergies renouvelables par exemple. La fabrication de ces grands ensembles est actuellement limitée par les moyens technologiques, qui ont des dimensions englobant les dimensions des pièces à fabriquer. Le retour sur investissement de telles machines, souvent mono-tâches, est très difficile à justifier, ce qui limite leur dissémination. Une idée actuellement en vogue est de développer des CPPS mobiles, capable d'évoluer en flotte autour du produit et de se synchroniser pour réaliser l'ensemble des tâches nécessaires. De plus, ces CPPS ont la flexibilité nécessaire à changer d'effecteur, ce qui permet d'augmenter les capacités de chacun de ces moyens de production. La conception de la partie physique de ces CPPS nécessitera donc rapidement un changement dans l'aspect méthodologique, car l'on passe d'une conception axée sur les fonctionnalités précises du système alors qu'il faudra concevoir à l'avenir en

anticipant les mutations et évolutions éventuelles du système, ce qui complexifie inévitablement le cycle de vie de ces systèmes. De plus, dans l'utilisation, une coopération plus aigüe sera mise en place avec l'opérateur, que ce soit en scénario Tool ou Automation. De la même manière, le métier d'opérateur va donc fortement évoluer et doit être accompagné, car il est nécessaire pour les opérateurs de comprendre les capacités cognitives du CPPS pour les anticiper et comprendre ses réactions, et donc optimiser leurs interactions.

L'intégration entre la partie cyber et la partie physique va également se complexifier grandement avec la flexibilité de changer d'effecteur. En effet, non seulement la commande de ces effecteurs risque d'être changeante, mais surtout le retour d'informations en temps réel provenant de l'effecteur doit être intégré à la partie commande et évoluer à chaque changement d'effecteur ou de mode opératoire du CPPS. Cette évolution des fonctionnalités de diagnostic des systèmes doit être accompagnée et provenir à la fois du process, où les spécialistes du domaine ont une vue précise sur la relation entre données recueillies et leur implication sur le process en lui-même, et du système de contrôle haut niveau qui doit intégrer ces données issues du process pour la gestion de la production et de la qualité. Les connaissances nécessaires à cette intégration dépassent largement celles de la mécatronique, comme évoqué précédemment.

Enfin, la génération de la partie cyber en elle-même nécessitera dans les années à venir l'utilisation d'outils de génération de logiciels surs. Nous avons proposé dans ce document l'utilisation parmi d'autres de l'Ingénierie Dirigée par les Modèles (IDM). L'IDM, associée au langage de transformation ATLAS (ATL) (Jouault et al., 2008) est déjà largement adoptée par la communauté académique, et son utilisation industrielle s'accroît sensiblement, notamment en informatique. L'utilisation de l'IDM montre des gains de productivité de plus de 50% par rapport à une écriture du code à la main (Cuadrado et al., 2014), en flexibilité et reconfigurabilité pour les PME (Masood et al., 2013) et dans l'application des principes de personnalisation des produits (Aleksić et al., 2012).

Tout comme la méthode APTE (de la Bretesche, 2000) a permis en son temps de faire évoluer les process de conception mécanique, l'IDM devrait à moyen terme pouvoir s'inscrire dans les filières de développement de contrôle de process automatisés et d'informatique industrielle en parallèle des développements de systèmes mécaniques. En effet, les formations en génie mécanique intègrent déjà généralement une connotation relative aux systèmes automatisés séquentiels très bien adaptée aux systèmes de production. Toutefois, il n'existe pas réellement de méthodes efficaces permettant de conceptualiser la génération de programmes de commande de ces systèmes, qui se base donc généralement sur la seule expertise humaine. Il est probable que l'on puisse formater les éléments de sortie d'APTE partie analyse fonctionnelle en éléments d'entrée de la transformation de modèles et ainsi systématiser la génération de programmes en assistant le concepteur dans cette démarche.

Références

- Abdullah, M.W., Roth, H., Weyrich, M., Wahrburg, J., 2015. An Approach for Peg-in-Hole Assembling using Intuitive Search Algorithm based on Human Behavior and Carried by Sensors Guided Industrial Robot. IFAC-Pap., 15th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing INCOM 2015 48, 1476–1481. doi:10.1016/j.ifacol.2015.06.295
- Adam, E., Zambrano, G., Pach, C., Berger, T., Trentesaux, D., 2011. Myopic Behaviour in Holonic Multiagent Systems for Distributed Control of FMS, in: Trends in Practical Applications of Agents and Multiagent Systems, Advances in Intelligent and Soft Computing. Springer, pp. 91–98.
- Adam, M., Cardin, O., Berreut, P., Castagna, P., 2012a. Data processing from manufacturing systems to decision support systems: propositions of alternative design approaches, in: INCOM 2012 Proceedings. Bucharest, Roumanie, pp. 1129–1134. doi:10.3182/20120523-3-RO-2023.00140
- Adam, M., Cardin, O., Berreut, P., Castagna, P., 2011. Proposal of an Approach to Automate the Generation of a Transitic System's Observer and Decision Support using MDE, in: World Congress Proceedings. Milano, Italie, pp. 3593–3598. doi:10.3182/20110828-6-IT-1002.02521
- Adam, M., Cardin, O., Castagna, P., Berreut, P., 2012b. Traitement des données des systèmes de production pour les systèmes d'aide à la décision: propositions d'approches de conception alternatives., in: Proceedings of MOSIM'12. Bordeaux, France.
- Aissani, N., Beldjilali, B., Trentesaux, D., 2009. Dynamic scheduling of maintenance tasks in the petroleum industry: A reinforcement approach. Eng. Appl. Artif. Intell. 22, 1089–1103.
- Aissani, N., Beldjilali, B., Trentesaux, D., 2008. Use of machine learning for continuous improvement of the real time heterarchical manufacturing control system performances. Int. J. Ind. Syst. Eng. 3. doi:10.1504/IJISE.2008.017555
- Akella, R., Tang, H., McMillin, B.M., 2010. Analysis of information flow security in cyber-physical systems. Int. J. Crit. Infrastruct. Prot. 3, 157–173. doi:10.1016/j.ijcip.2010.09.001
- Aleksić, D.S., Janković, D.S., Stoimenov, L.V., 2012. A case study on the object-oriented framework for modeling product families with the dominant variation of the topology in the one-of-a-kind production. Int. J. Adv. Manuf. Technol. 59, 397–412. doi:10.1007/s00170-011-3466-4
- Al-Hammouri, A.T., 2012. A comprehensive co-simulation platform for cyber-physical systems. Comput. Commun. 36, 8–19. doi:10.1016/j.comcom.2012.01.003
- Alho, P., Mattila, J., 2015. Service-oriented approach to fault tolerance in CPSs. J. Syst. Softw. 105, 1–17. doi:10.1016/j.jss.2015.03.041
- Anderson, A., 2011. Report to the President on Ensuring American Leadership in Advanced Manufacturing.

- Antsaklis, P.J., 1998. Hybrid Control Systems: An Introductory Discussion to the Special Issue. *IEEE Trans. Autom. Control* 43, 457–460. doi:10.1109/TAC.1998.664148
- Arlat, J., Diaz, M., Kaâniche, M., 2014. Towards resilient cyber-physical systems: The ADREAM project, in: Design & Technology of Integrated Systems In Nanoscale Era (DTIS), 2014 9th IEEE International Conference On. IEEE, pp. 1–5.
- Azimi, R., Bhatia, G., Rajkumar, R.R., Mudalige, P., 2014. STIP: Spatio-temporal intersection protocols for autonomous vehicles, in: ICCPS'14: ACM/IEEE 5th International Conference on Cyber-Physical Systems (with CPS Week 2014). IEEE Computer Society, pp. 1–12.
- Baheti, R., Gill, H., 2011. Cyber-physical systems. *Impact Control Technol.* 12, 161–166.
- Barbosa, J., Leitão, P., Adam, E., Trentesaux, D., 2015. Dynamic self-organization in holonic multi-agent manufacturing systems: The ADACOR evolution. *Comput. Ind.* 66, 99–111. doi:10.1016/j.compind.2014.10.011
- Barthelmey, A., Störkle, D., Kuhlenkötter, B., Deuse, J., 2014. Cyber Physical Systems for Life Cycle Continuous Technical Documentation of Manufacturing Facilities. *Procedia CIRP, Variety Management in ManufacturingProceedings of the 47th CIRP Conference on Manufacturing Systems* 17, 207–211. doi:10.1016/j.procir.2014.01.050
- Belle, J.V., Germain, B.S., Verstraete, P., Valckenaers, P., Ali, O., Brussel, H.V., Cattrysse, D., 2009. A Holonic Chain Conveyor Control System: An Application, in: Mařík, V., Strasser, T., Zoitl, A. (Eds.), *Holonic and Multi-Agent Systems for Manufacturing*, Lecture Notes in Computer Science. Springer Berlin Heidelberg, pp. 234–243.
- Bellifemine, F.L., Caire, G., Greenwood, D., 2007. *Developing Multi-Agent Systems with JADE*, 1 edition. ed. Wiley, Hoboken, NJ.
- Ben Khaled, A., 2014. Distributed real-time simulation of numerical models : application to power-train (phdthesis). Université de Grenoble.
- Ben Khaled, A., Ben Gaid, M., Pernet, N., Simon, D., 2014. Fast multi-core co-simulation of Cyber-Physical Systems: Application to internal combustion engines. *Simul. Model. Pract. Theory* 47, 79–91. doi:10.1016/j.simpat.2014.05.002
- Berger, T., Deneux, D., Bonte, T., Cocquebert, E., Trentesaux, D., 2015. Arezzo-flexible manufacturing system: A generic flexible manufacturing system shop floor emulator approach for high-level control virtual commissioning. *Concurr. Eng.* 23, 333–342. doi:10.1177/1063293X15591609
- Berger, T., Sallez, Y., Valli, B., Gibaud, A., Trentesaux, D., 2010. Semi-heterarchical Allocation and Routing Processes in FMS Control: A Stigmergic Approach. *J. Intell. Robot. Syst.* 58, 17–45. doi:10.1007/s10846-009-9343-9
- Bergweiler, S., 2015. Intelligent Manufacturing based on Self-Monitoring Cyber-Physical Systems, in: UBICOMM 2015. Presented at the Ninth International Conference on Mobile Ubiquitous Computing, Systems, Services and Technologies, Nice, France, pp. 121–126.
- Bernard, A., Chenouard, R., 2014. Multi-physics Simulation for Product-service Performance Assessment. *Procedia CIRP, Product Services Systems and Value Creation. Proceedings of the 6th CIRP Conference on Industrial Product-Service Systems* 16, 21–25. doi:10.1016/j.procir.2014.03.002
- Bevan, R., Berruet, P., de Lamotte, F., Adam, M., Cardin, O., Castagna, P., 2012. Generation of multiplatform control for transitic systems using a component-based approach, in: 2012 IEEE 17th Conference on Emerging Technologies Factory Automation (ETFA). Presented at the 2012 IEEE 17th Conference on Emerging Technologies Factory Automation (ETFA), pp. 1–8. doi:10.1109/ETFA.2012.6489605

- Blanc, P., Demongodin, I., Castagna, P., 2008. A holonic approach for manufacturing execution system design: An industrial application. *Eng. Appl. Artif. Intell.* 21, 315–330.
- Borangiu, T., Raileanu, S., Trentesaux, D., Berger, T., Iacob, I., 2014. Distributed manufacturing control with extended CNP interaction of intelligent products. *J. Intell. Manuf.* 25, 1065–1075. doi:10.1007/s10845-013-0740-3
- Borangiu, T., Thomas, A., Trentesaux, D. (Eds.), 2012. Service Orientation in Holonic and Multi-Agent Manufacturing Control, Studies in Computational Intelligence. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- Bradley, D., Russell, D., Ferguson, I., Isaacs, J., MacLeod, A., White, R., 2015. The Internet of Things – The future or the end of mechatronics. *Mechatronics* 27, 57–74. doi:10.1016/j.mechatronics.2015.02.005
- Brahim-Djelloul, S., Estampe, D., Lamouri, S., Deschamps, C., 2013. Product-oriented transportation using RFID technology: A simulation-based study, in: IESM 2013. pp. 1–9.
- Broman, D., Greenberg, L., Lee, E.A., Masin, M., Tripakis, S., Wetter, M., 2015. Requirements for hybrid cosimulation standards, in: Proceedings of the 18th International Conference on Hybrid Systems: Computation and Control. ACM, pp. 179–188.
- Brooks, C., Lee, E.A., Lorenzetti, D., Nouidui, T.S., Wetter, M., 2015. CyPhySim: a cyber-physical systems simulator, in: Proceedings of the 18th International Conference on Hybrid Systems: Computation and Control. ACM, pp. 301–302.
- Brooks, R.R., Yun, S.B., Deng, J., 2012. Chapter 26 - Cyber-Physical Security of Automotive Information Technology, in: Das, S.K., Kant, K., Zhang, N. (Eds.), Handbook on Securing Cyber-Physical Critical Infrastructure. Morgan Kaufmann, Boston, pp. 655–676.
- Canedo, A., Richter, J.H., 2014. Architectural Design Space Exploration of Cyber-physical Systems Using the Functional Modeling Compiler. *Procedia CIRP*, 24th CIRP Design Conference 21, 46–51. doi:10.1016/j.procir.2014.03.183
- Cardin, O., Castagna, P., 2012. Myopia of service-oriented holonic manufacturing systems: the contribution of an observer, in: Service Orientation in Holonic and Multi-Agent Manufacturing Control, Studies in Computational Intelligence. Springer, pp. 197–210.
- Cardin, O., Castagna, P., 2011. Proactive production activity control by online simulation. *Int. J. Simul. Process Model.* 6, 177–186.
- Cardin, O., Castagna, P., 2009. Using online simulation in Holonic Manufacturing Systems. *Eng. Appl. Artif. Intell.* 22, 1025–1033.
- Cardin, O., Castagna, P., Sari, Z., Meghelli, N., 2012. Performance evaluation of In-Deep Class Storage for Flow-Rack AS/RS. *Int. J. Prod. Res.* 50, 6775–6791. doi:10.1080/00207543.2011.624561
- Cardin, O., Mebarki, N., Pinot, G., 2013. A study of the robustness of the group scheduling method using an emulation of a complex FMS. *Int. J. Prod. Econ.* 146, 199–207. doi:10.1016/j.ijpe.2013.06.023
- Cardin, O., Ounnar, F., Thomas, A., Trentesaux, D., 2016. Future Industrial Systems: Best Practices of the Intelligent Manufacturing & Services Systems (IMS²) French Research Group. *IEEE Trans. Ind. Inform.* doi:10.1109/TII.2016.2605624
- Cardin, O., Trentesaux, D., Thomas, A., Castagna, P., Berger, T., El-Haouzi, H.B., 2015. Coupling predictive scheduling and reactive control in manufacturing hybrid control architectures: state of the art and future challenges. *J. Intell. Manuf.* 1–15. doi:10.1007/s10845-015-1139-0

- Chase, C., Serrano, J., Ramadge, P.J., 1993. Periodicity and chaos from switched flow systems: contrasting examples of discretely controlled continuous systems. *IEEE Trans. Autom. Control* 38, 70–83. doi:10.1109/9.186313
- Chirn, J.-L., McFarlane, D.C., 2000. A holonic component-based approach to reconfigurable manufacturing control architecture, in: 11th International Workshop on Database and Expert Systems Applications Proceedings. pp. 219–223. doi:10.1109/DEXA.2000.875030
- Chové, E., Castagna, P., Abbou, R., 2009. Hoist Scheduling Problem: Coupling reactive and predictive approaches, in: INCOM 2009 Proceedings. pp. 2077–2082.
- Colombo, A.W., Karnouskos, S., Bangemann, T., 2014. IMC-AESOP outcomes: Paving the way to collaborative manufacturing systems, in: 2014 12th IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN). Presented at the 2014 12th IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN), pp. 255–260. doi:10.1109/INDIN.2014.6945517
- Conklin, W.A., 2011. Control systems personnel are from Mars; IT personnel are from Venus. *Int. J. Crit. Infrastruct. Prot.* 4, 76–77. doi:10.1016/j.ijcip.2011.06.004
- Crainic, T.G., Montreuil, B., 2016. Physical Internet Enabled Hyperconnected City Logistics, in: *Transportation Research Procedia*. Presented at the Tenth International Conference on City Logistics, Tenerife, Spain, pp. 383–398. doi:10.1016/j.trpro.2016.02.074
- Cuadrado, J.S., Cánovas Izquierdo, J.L., Molina, J.G., 2014. Applying model-driven engineering in small software enterprises. *Sci. Comput. Program.*, Special issue on Success Stories in Model Driven Engineering 89, Part B, 176–198. doi:10.1016/j.scico.2013.04.007
- Dall’Ora, R., Raza, U., Brunelli, D., Picco, G.P., 2014. SensEH: From simulation to deployment of energy harvesting wireless sensor networks, in: Local Computer Networks Workshops (LCN Workshops), 2014 IEEE 39th Conference on. IEEE, pp. 566–573.
- de la Bretesche, B., 2000. La méthode APTE: Analyse de la valeur, analyse fonctionnelle. Ed. Pétruelle, Paris.
- Denkena, B., Schmidt, J., Krüger, M., 2014. Data Mining Approach for Knowledge-based Process Planning. *Procedia Technol.*, 2nd International Conference on System-Integrated Intelligence: Challenges for Product and Production Engineering 15, 406–415. doi:10.1016/j.protcy.2014.09.095
- Dombrowski, U., Wagner, T., 2014. Mental Strain as Field of Action in the 4th Industrial Revolution. *Procedia CIRP*, Variety Management in ManufacturingProceedings of the 47th CIRP Conference on Manufacturing Systems 17, 100–105. doi:10.1016/j.procir.2014.01.077
- Domingues, P., Carreira, P., Vieira, R., Kastner, W., 2016. Building automation systems: Concepts and technology review. *Comput. Stand. Interfaces* 45, 1–12. doi:10.1016/j.csi.2015.11.005
- Dubromelle, Y., Prunaret, J.P., Ounnar, F., Pujo, P., 2014. RFID synchronisation for ambient services in a holonic and isoarchic control model. *Int. J. Radio Freq. Identif. Technol. Appl.* 4, 272. doi:10.1504/IJRFITA.2014.063925
- Dworschak, B., Zaiser, H., 2014. Competences for Cyber-physical Systems in Manufacturing – First Findings and Scenarios. *Procedia CIRP*, 8th International Conference on Digital Enterprise Technology - DET 2014 Disruptive Innovation in Manufacturing Engineering towards the 4th Industrial Revolution 25, 345–350. doi:10.1016/j.procir.2014.10.048
- EFFRA, 2013. Factories of the Future: Multi-annual roadmap for the contractual PPP under Horizon 2020.

- Eldemir, F., Graves, R.J., * C.J.M., 2004. New cycle time and space estimation models for automated storage and retrieval system conceptualization. *Int. J. Prod. Res.* 42, 4767–4783. doi:10.1080/00207540412331281953
- El Haouzi, H., Pétin, J.-F., Thomas, A., 2009. Design and validation of a product-driven control system based on a six sigma methodology and discrete event simulation. *Prod. Plan. Control* 20, 510–524. doi:10.1080/09537280902938589
- Ferreira, A., Ferreira, Â., Cardin, O., Leitão, P., 2015. Extension of holonic paradigm to smart grids, in: IFAC-PapersOnLine. pp. 1099–1104. doi:10.1016/j.ifacol.2015.06.230
- Fink, J., Ribeiro, A., Kumar, V., 2012. Robust control for mobility and wireless communication in cyber-physical systems with application to robot teams. *Proc. IEEE* 100, 164–178.
- Gaham, M., Bouzouia, B., Achour, N., 2015. Human-in-the-Loop Cyber-Physical Production Systems Control (HiLCP2sC): A Multi-objective Interactive Framework Proposal, in: Service Orientation in Holonic and Multi-Agent Manufacturing, Studies in Computational Intelligence. Springer International Publishing, pp. 315–325.
- Gamboa Quintanilla, F., Cardin, O., Castagna, P., 2014a. Product Specification for Flexible Workflow Orchestrations in Service Oriented Holonic Manufacturing Systems, in: Borangiu, T., Trentesaux, D., Thomas, A. (Eds.), Service Orientation in Holonic and Multi-Agent Manufacturing and Robotics. Springer International Publishing, pp. 177–193.
- Gamboa Quintanilla, F., Cardin, O., Castagna, P., 2013a. Evolution of a Flexible Manufacturing System: From Communicating to Autonomous Product, in: Service Orientation in Holonic and Multi Agent Manufacturing and Robotics, Studies in Computational Intelligence. Springer, pp. 167–180.
- Gamboa Quintanilla, F., Cardin, O., Castagna, P., 2012. Evolution of a Flexible Manufacturing System: From Communicating to Autonomous Product, in: Information Control Problems in Manufacturing. pp. 710–715.
- Gamboa Quintanilla, F., Cardin, O., L'Anton, A., Castagna, P., 2016a. A modeling framework for manufacturing services in Service-oriented Holonic Manufacturing Systems. *Eng. Appl. Artif. Intell.* 55, 26–36. doi:10.1016/j.engappai.2016.06.004
- Gamboa Quintanilla, F., Cardin, O., L'Anton, A., Castagna, P., 2016b. A Petri net-based methodology to increase flexibility in service-oriented holonic manufacturing systems. *Comput. Ind.* 76, 53–68. doi:10.1016/j.compind.2015.09.002
- Gamboa Quintanilla, F., Cardin, O., L'Anton, A., Castagna, P., 2016c. Implementation framework for cloud-based holonic control of cyber-physical production systems, in: 14th International Conference on Industrial Informatics. Presented at the INDIN 2016, IEEE, Poitiers, France.
- Gamboa Quintanilla, F., Cardin, O., L'Anton, A., Castagna, P., 2015a. Virtual commissioning-based development and implementation of a service-oriented holonic control for retrofit manufacturing systems. Presented at the SOHOMA'15, Cambridge - UK.
- Gamboa Quintanilla, F., Cardin, O., L'Anton, A., Castagna, P., 2015b. Implementation of a Process Orchestration Model in a Service Oriented Holonic Manufacturing System, in: IFAC-PapersOnLine. pp. 1111–1116. doi:10.1016/j.ifacol.2015.06.232
- Gamboa Quintanilla, F., Cardin, O., L'Anton, A., Castagna, P., 2014b. Product Specification for Flexible Workflow Orchestrations in Service Oriented Holonic Manufacturing Systems. Presented at the SOHOMA'14, Nancy –France.

- Gamboa Quintanilla, F., Kubler, S., Cardin, O., Castagna, P., 2013b. Product Specification in a Service-Oriented Holonic Manufacturing System Using Petri-Nets, in: Tsuzuki, M. (Ed.), *IMS 2013*. São Paulo, Brazil, pp. 342–347. doi:10.3182/20130522-3-BR-4036.00094
- Gao, J., Xiao, Y., Liu, J., Liang, W., Chen, C.L.P., 2012. A survey of communication/networking in Smart Grids. *Future Gener. Comput. Syst.* 28, 391–404. doi:10.1016/j.future.2011.04.014
- Geisberger, E., Broy, M., 2012. *agendaCPS: Integrierte Forschungsagenda Cyber-Physical Systems*. Springer-Verlag.
- Gengarle, M.V., Bensalem, S., McDermid, J., Sangiovanni-Vincentelli, A., Törngre, M., 2013. Characteristics, Capabilities, Potential Applications of Cyber-Physical Systems: a Preliminary analysis. D2. 1 of CyPhERS FP7 Project.
- Genge, B., Siaterlis, C., Nai Fovino, I., Masera, M., 2012. A cyber-physical experimentation environment for the security analysis of networked industrial control systems. *Comput. Electr. Eng., Special issue on Recent Advances in Security and Privacy in Distributed Communications and Image processing* 38, 1146–1161. doi:10.1016/j.compeleceng.2012.06.015
- Giret, A., Trentesaux, D., Prabhu, V., 2015. Sustainability in manufacturing operations scheduling: A state of the art review. *J. Manuf. Syst.* 37, 126–140.
- Giuseppe, C., Ceccarelli, M., Borangiu, T., 2012. A Low-Cost Control Architecture for User-Oriented Service Applications of Cassino Parallel Manipulator, in: Theodor, B. (Ed.), *INCOM 2012 Proceedings*. Presented at the INCOM 2012, Bucharest, Romania, pp. 877–882. doi:10.3182/20120523-3-RO-2023.00337
- Håkansson, A., Hartung, R., 2014. An Infrastructure for Individualised and Intelligent Decision-making and Negotiation in Cyber-physical Systems. *Procedia Comput. Sci., Knowledge-Based and Intelligent Information & Engineering Systems 18th Annual Conference, KES-2014 Gdynia, Poland, September 2014 Proceedings* 35, 822–831. doi:10.1016/j.procs.2014.08.248
- Harjes, F., Scholz-Reiter, B., 2014. Autonomous Control in Closed Dynamic Logistic Systems. *Procedia Technol., 2nd International Conference on System-Integrated Intelligence: Challenges for Product and Production Engineering* 15, 313–322. doi:10.1016/j.protcy.2014.09.085
- Hehenberger, P., Vogel-Heuser, B., Bradley, D., Eynard, B., Tomiyama, T., Achiche, S., 2016. Design, modelling, simulation and integration of cyber physical systems: Methods and applications. *Comput. Ind.* 82, 273–289. doi:10.1016/j.compind.2016.05.006
- He, M., Murugesan, S., Zhang, J., 2011. Multiple timescale dispatch and scheduling for stochastic reliability in smart grids with wind generation integration, in: *INFOCOM, 2011 Proceedings IEEE*, pp. 461–465.
- Herrera, C., Thomas, A., Belmokhtar, S., Pannequin, R., 2011. A viable system model for product-driven systems, in: *IESM 2011*. Metz, France.
- Herrera, C., Thomas, A., Parada, V., 2014. A product-driven system approach for multilevel decisions in manufacturing planning and control. *Prod. Manuf. Res. Open Access J.* 2, 756–766. doi:10.1080/21693277.2014.949895
- Herterich, M.M., Uebenickel, F., Brenner, W., 2015. The Impact of Cyber-physical Systems on Industrial Services in Manufacturing. *Procedia CIRP, 7th Industrial Product-Service Systems Conference - PSS, industry transformation for sustainability and business* 30, 323–328. doi:10.1016/j.procir.2015.02.110

- Holvoet, T., Valckenaers, P., 2006. Beliefs, Desires and Intentions Through the Environment, in: Proceedings of the Fifth International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems, AAMAS '06. New York, NY, USA, pp. 1052–1054.
- Huet, J.-C., Paris, J.-L., Kouiss, K., Gourgand, M., 2013. A new reengineering methodology for the product-driven system applied to the medication-use process. *Decis. Support Syst.*, 1. *Analytics and Modeling for Better HealthCare 2. Decision Making in Healthcare* 55, 599–615. doi:10.1016/j.dss.2012.10.018
- Hu, F., Lu, Y., Vasilakos, A.V., Hao, Q., Ma, R., Patil, Y., Zhang, T., Lu, J., Li, X., Xiong, N.N., 2015. Robust Cyber-Physical Systems: Concept, models, and implementation. *Future Gener. Comput. Syst.* doi:10.1016/j.future.2015.06.006
- Indriago, C., Cardin, O., Bellenguez-Morineau, O., Rakoto, N., Castagna, P., Chacòn, E., 2016a. Performance evaluation of holonic control of a switch arrival system. *Concurr. Eng.* 1063293X16643568. doi:10.1177/1063293X16643568
- Indriago, C., Cardin, O., Morineau, O., Rakoto, N., Castagna, P., 2015a. Performance evaluation of holonic-based online predictive-reactive scheduling for a switch arrival system, in: INCOM 2015 Proceedings. Ottawa, Canada.
- Indriago, C., Cardin, O., Morineau, O., Rakoto-Ravalontsalama, N., Castagna, P., Chacòn, E., 2016b. Evaluation de l'application du paradigme holonique à un système de réservoirs. *J. Eur. Systèmes Autom.* 49, 325–347. doi:10.3166/JESA.49.325-347
- Indriago, C., Cardin, O., Rakoto, N., Castagna, P., Chacòn, E., 2016c. H2CM: A holonic architecture for flexible hybrid control systems. *Comput. Ind.* 77, 15–28. doi:10.1016/j.compind.2015.12.005
- Indriago, C., Cardin, O., Rakoto, N., Chacón, E., Castagna, P., 2015b. Application of Holonic Paradigm to Hybrid Processes: Case of a Water Treatment Process, in: Service Orientation in Holonic and Multi-Agent Manufacturing, Studies in Computational Intelligence. Springer, pp. 39–48.
- Indriago, C., Cardin, O., Rakoto-Ravalontsalama, N., Chacón, E., Castagna, P., 2014. Application du paradigme holonique à un système de réservoirs, in: 10ème Conférence Francophone de Modélisation, Optimisation et Simulation- MOSIM'14. Presented at the 10ème Conférence Francophone de Modélisation, Optimisation et Simulation- MOSIM'14, Nancy – France.
- Jammes, F., Smit, H., 2005. Service-oriented paradigms in industrial automation. *IEEE Trans. Ind. Inform.* 1, 62–70. doi:10.1109/TII.2005.844419
- Jammes, F., Smit, H., Lastra, J.L.M., Delamer, I.M., 2005. Orchestration of service-oriented manufacturing processes, in: 10th IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, 2005. ETFA 2005. p. 8 pp.–624. doi:10.1109/ETFA.2005.1612580
- Jatzkowski, J., Kleinjohann, B., 2015. Self-reconfiguration of real-time communication in cyber-physical systems. *Mechatronics*. doi:10.1016/j.mechatronics.2015.04.014
- Jatzkowski, J., Kleinjohann, B., 2014. Towards Self-reconfiguration of Real-time Communication within Cyber-physical Systems. *Procedia Technol.*, 2nd International Conference on System-Integrated Intelligence: Challenges for Product and Production Engineering 15, 54–61. doi:10.1016/j.protcy.2014.09.034
- Jouault, F., Allilaire, F., Bézivin, J., Kurtev, I., 2008. ATL: A model transformation tool. *Sci. Comput. Program.*, Special Issue on Second issue of experimental software and toolkits (EST) 72, 31–39. doi:10.1016/j.scico.2007.08.002

- Jun, H.-B., Kiritsis, D., Xirouchakis, P., 2007. Research issues on closed-loop PLM. *Comput. Ind.* 58, 855–868. doi:10.1016/j.compind.2007.04.001
- Katz, R.H., Culler, D.E., Sanders, S., Alspaugh, S., Chen, Y., Dawson-Haggerty, S., Dutta, P., He, M., Jiang, X., Keys, L., Krioukov, A., Lutz, K., Ortiz, J., Mohan, P., Reutzel, E., Taneja, J., Hsu, J., Shankar, S., 2011. An information-centric energy infrastructure: The Berkeley view. *Sustain. Comput. Inform. Syst.* 1, 7–22. doi:10.1016/j.suscom.2010.10.001
- Kellens, K., Dewulf, W., Overcash, M., Hauschild, M.Z., Duflou, J.R., 2011a. Methodology for systematic analysis and improvement of manufacturing unit process life cycle inventory (UPLCI) CO2PE! initiative (cooperative effort on process emissions in manufacturing). Part 2: case studies. *Int. J. Life Cycle Assess.* 17, 242–251. doi:10.1007/s11367-011-0352-0
- Kellens, K., Dewulf, W., Overcash, M., Hauschild, M.Z., Duflou, J.R., 2011b. Methodology for systematic analysis and improvement of manufacturing unit process life-cycle inventory (UPLCI)—CO2PE! initiative (cooperative effort on process emissions in manufacturing). Part 1: Methodology description. *Int. J. Life Cycle Assess.* 17, 69–78. doi:10.1007/s11367-011-0340-4
- Kim, J., Rajkumar, R.R., Jochim, M., 2013. Towards dependable autonomous driving vehicles: A system-level approach. *ACM SIGBED Rev.* 10, 29–32.
- Klein, T., Thomas, A., 2007. Opportunities to reconsider decision making processes due to Auto-ID, in: IESM 2007. International Institute of Innovation, Industrial Engineering and Entrepreneurship, I4E2.
- Klein, T., Thomas, A., Thomas, P., 2011. An emulation-based execution control system evaluation tool: application to a furniture manufacturing group. *Int. J. Simul. Process Model.* 6, 187. doi:10.1504/IJSPM.2011.044767
- Klimeš, J., 2014. Using Formal Concept Analysis for Control in Cyber-physical Systems. *Procedia Eng.*, 24th DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation, 2013 69, 1518–1522. doi:10.1016/j.proeng.2014.03.149
- Komoda, N., 2006a. Service Oriented Architecture (SOA) in Industrial Systems, in: 2006 IEEE International Conference on Industrial Informatics. Presented at the 2006 IEEE International Conference on Industrial Informatics, pp. xxiii–xxiii. doi:10.1109/INDIN.2006.275681
- Komoda, N., 2006b. Service Oriented Architecture (SOA) in Industrial Systems, in: 2006 IEEE International Conference on Industrial Informatics, pp. xxiii–xxiii. doi:10.1109/INDIN.2006.275681
- Kouki, M., Cardin, O., Castagna, P., Cornardeau, C., 2017. Input data management for energy related discrete event simulation modelling. *J. Clean. Prod.* 141, 194–207. doi:10.1016/j.jclepro.2016.09.061
- Kouki, M., Castagna, P., Cardin, O., Cornardeau, C., 2015a. An energy-related discrete event simulation approach. Presented at the CIGI 2015.
- Kouki, M., Castagna, P., Cardin, O., Cornardeau, C., 2015b. Couplage de la modélisation énergétique à la simulation dynamique des flux de production, in: Xème Conférence Internationale: Conception et Production Intégrées. Presented at the CPI 2015.
- Kubler, S., Derigent, W., Thomas, A., Rondeau, É., 2013. Embedding data on “communicating materials” from context-sensitive information analysis. *J. Intell. Manuf.* 25, 1053–1064. doi:10.1007/s10845-013-0745-y

- Lallican, J.L., Berruet, P., Rossi, A., Philippe, J.L., 2007. A component-based approach for conveying systems control design, in: Proceeding of the 4th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics. Presented at the 4th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics ICINCO 2007, pp. 329–336.
- Lanza, G., Haefner, B., Kraemer, A., 2015. Optimization of selective assembly and adaptive manufacturing by means of cyber-physical system based matching. *CIRP Ann. - Manuf. Technol.* 64, 399–402. doi:10.1016/j.cirp.2015.04.123
- Lanza, G., Stricker, N., Peters, S., 2013. Ad-hoc Rescheduling and Innovative Business Models for Shock- robust Production Systems. *Procedia CIRP*, Forty Sixth CIRP Conference on Manufacturing Systems 2013 7, 121–126. doi:10.1016/j.procir.2013.05.021
- Larroudé, V., Chenouard, R., Yvars, P.-A., Millet, D., 2013. Constraint based approach for the steady-state simulation of complex systems: Application to ship control. *Eng. Appl. Artif. Intell.* 26, 499–514. doi:10.1016/j.engappai.2012.07.003
- Lee, E., 2008. Cyber physical systems: Design challenges, in: Object Oriented Real-Time Distributed Computing (ISORC), 2008 11th IEEE International Symposium on. IEEE, pp. 363–369.
- Lee, E.A., 2006. Cyber-Physical Systems - Are Computing Foundations Adequate?, in: Position Paper for NSF Workshop On Cyber-Physical Systems. Austin, Texas.
- Lee, E.A., Seshia, S.A., 2011. Introduction to Embedded Systems - A Cyber Physical Systems Approach - Second Edition. E. A. Lee and S. A. Seshia.
- Lee, J., Bagheri, B., Kao, H.-A., 2015. A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. *Manuf. Lett.* 3, 18–23. doi:10.1016/j.mfglet.2014.12.001
- Lee, J., Kao, H.-A., Yang, S., 2014. Service Innovation and Smart Analytics for Industry 4.0 and Big Data Environment. *Procedia CIRP*, Product Services Systems and Value Creation. Proceedings of the 6th CIRP Conference on Industrial Product-Service Systems 16, 3–8. doi:10.1016/j.procir.2014.02.001
- Lee, J., Lapira, E., Bagheri, B., Kao, H., 2013. Recent advances and trends in predictive manufacturing systems in big data environment. *Manuf. Lett.* 1, 38–41. doi:10.1016/j.mfglet.2013.09.005
- Leitao, P., Barbosa, J., Papadopoulou, M.-E.C., Venieris, I.S., 2015. Standardization in cyber-physical systems: The ARUM case, in: 2015 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT). Presented at the 2015 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), pp. 2988–2993. doi:10.1109/ICIT.2015.7125539
- Leitao, P., Barbosa, J., Vrba, P., Skobelev, P., Tsarev, A., Kazanskaia, D., 2013. Multi-agent System Approach for the Strategic Planning in Ramp-Up Production of Small Lots, in: 2013 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC). Presented at the 2013 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC), Manchester, UK, pp. 4743–4748. doi:10.1109/SMC.2013.807
- Leitão, P., Restivo, F., 2006. ADACOR: A holonic architecture for agile and adaptive manufacturing control. *Comput. Ind.* 57, 121–130. doi:10.1016/j.compind.2005.05.005
- Leitão, P., Rodrigues, N., Barbosa, J., Turrin, C., Pagani, A., 2015. Intelligent products: The grace experience. *Control Eng. Pract.* 42, 95–105. doi:10.1016/j.conengprac.2015.05.001
- Le Mortellec, A., Clarhaut, J., Sallez, Y., Berger, T., Trentesaux, D., 2013. Embedded holonic fault diagnosis of complex transportation systems. *Eng. Appl. Artif. Intell.* 26, 227–240. doi:10.1016/j.engappai.2012.09.008

- Li, S., Li, D., Li, F., Zhou, N., 2015. CPSiCGF: A code generation framework for CPS integration modeling. *Microprocess. Microsyst.* doi:10.1016/j.micpro.2015.05.010
- Liu, T., Sun, Y., Liu, Y., Gui, Y., Zhao, Y., Wang, D., Shen, C., 2015. Abnormal traffic-indexed state estimation: A cyber-physical fusion approach for Smart Grid attack detection. *Future Gener. Comput. Syst.* 49, 94–103. doi:10.1016/j.future.2014.10.002
- Lüder, A., Peschke, J., Sauter, T., Deter, S., Diep, D., 2004. Distributed intelligence for plant automation based on multi-agent systems: the PABADIS approach. *Prod. Plan. Control* 15, 201–212. doi:10.1080/09537280410001667484
- Lu, T., Guo, X., Li, Y., Peng, Y., Zhang, X., Xie, F., Gao, Y., 2014. Cyberphysical security for industrial control systems based on wireless sensor networks. *Int. J. Distrib. Sens. Netw.* 2014.
- Masood, T., Weston, R., Rahimifard, A., 2013. A model-driven approach to enabling change capability in SMEs. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 69, 805–821. doi:10.1007/s00170-013-4853-9
- Matthias, F., Jäger, T., Turrin, C., Petrali, P., Pagani, A., Leitao, P., 2013. Implementation of a Methodology for Consideration of Product Quality within Discrete Manufacturing, in: Natalia, B. (Ed.), *Proceedings of MIM'2016*. St. Petersburg, Russia, pp. 863–868. doi:10.3182/20130619-3-RU-3018.00181
- Mebarki, N., Cardin, O., Guérin, C., 2013. Evaluation of a New Human-Machine Decision Support System for Group Scheduling, in: *Analysis, Design, and Evaluation of Human-Machine Systems*. pp. 211–217.
- Meghelli, N., Sari, Z., Cardin, O., Castagna, P., 2010. Evaluation de la performance d'un stockage par classes dans le contexte du stockage en AS/RS à convoyeurs gravitationnels, in: *Actes de la 9e Conférence Francophone de Modélisation et Simulation (MOSIM'10)*. Hammamet, Tunisie, p. 167.
- Michniewicz, J., Reinhart, G., 2015. Cyber-Physical-Robotics – Modelling of modular robot cells for automated planning and execution of assembly tasks. *Mechatronics*. doi:10.1016/j.mechatronics.2015.04.012
- Michniewicz, J., Reinhart, G., 2014. Cyber-physical Robotics – Automated Analysis, Programming and Configuration of Robot Cells based on Cyber-physical-systems. *Procedia Technol.*, 2nd International Conference on System-Integrated Intelligence: Challenges for Product and Production Engineering 15, 567–576. doi:10.1016/j.protcy.2014.09.017
- Mikusz, M., 2014. Towards an Understanding of Cyber-physical Systems as Industrial Software-Product-Service Systems. *Procedia CIRP*, Product Services Systems and Value Creation. Proceedings of the 6th CIRP Conference on Industrial Product-Service Systems 16, 385–389. doi:10.1016/j.procir.2014.02.025
- Monostori, L., 2014. Cyber-physical Production Systems: Roots, Expectations and R&D Challenges. *Procedia CIRP*, Variety Management in Manufacturing Proceedings of the 47th CIRP Conference on Manufacturing Systems 17, 9–13. doi:10.1016/j.procir.2014.03.115
- Morariu, C., Morariu, O., Borangiu, T., 2013a. Customer order management in service oriented holonic manufacturing. *Comput. Ind.* 64, 1061–1072. doi:10.1016/j.compind.2013.07.007
- Morariu, C., Morariu, O., Borangiu, T., Raileanu, S., 2013b. Manufacturing Service Bus Integration Model for Highly Flexible and Scalable Manufacturing Systems, in: Borangiu, T., Thomas, A., Trentesaux, D. (Eds.), *Service Orientation in Holonic and Multi Agent Manufacturing and Robotics, Studies in Computational Intelligence*. Springer Berlin Heidelberg, pp. 19–40.

- Morgan, J., O'Donnell, G.E., 2015. The Cyber Physical Implementation of Cloud Manufacturing Monitoring Systems. Procedia CIRP, 9th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering - CIRP ICME '14 33, 29–34. doi:10.1016/j.procir.2015.06.007
- Mukherjee, T., Banerjee, A., Varsamopoulos, G., Gupta, S.K., 2010. Model-driven coordinated management of data centers. Comput. Netw. 54, 2869–2886.
- Nazari, S., Sonntag, C., Engell, S., 2015. A Modelica-based Modeling and Simulation Framework for Large-scale Cyber-physical Systems of Systems. IFAC-Pap. 48, 920–921. doi:10.1016/j.ifacol.2015.05.190
- Onori, M., Barata Oliveira, J., 2010. Outlook report on the future of European assembly automation. Assem. Autom. 30, 7–31.
- Otto, J., Henning, S., Niggemann, O., 2014. Why Cyber-physical Production Systems Need a Descriptive Engineering Approach – A Case Study in Plug & Produce. Procedia Technol., 2nd International Conference on System-Integrated Intelligence: Challenges for Product and Production Engineering 15, 295–302. doi:10.1016/j.protcy.2014.09.083
- Ounnar, F., Naamane, A., Pujo, P., M'Sirdi, N.-K., 2013. Intelligent Control of Renewable Holonic Energy Systems. Energy Procedia, Mediterranean Green Energy Forum 2013: Proceedings of an International Conference MGEF-13 42, 465–472. doi:10.1016/j.egypro.2013.11.047
- Ounnar, F., Pujo, P., Mekaouche, L., Giambiasi, N., 2007. Customer-supplier relationship management in an intelligent supply chain network. Prod. Plan. Control 18, 377–387. doi:10.1080/09537280701403736
- Ounnar, F., Pujo, P., Mekaouche, L., Giambiasi, N., 2004. Decentralized self organized control of a partnership network in an intelligent supply chain, in: IMS International Forum.
- Pach, C., Bekrar, A., Zbib, N., Sallez, Y., Trentesaux, D., 2012. An effective potential field approach to FMS holonic heterarchical control. Control Eng. Pract. 20, 1293–1309. doi:10.1016/j.conengprac.2012.07.005
- Pach, C., Berger, T., Bonte, T., Trentesaux, D., 2014a. ORCA-FMS: a dynamic architecture for the optimized and reactive control of flexible manufacturing scheduling. Comput. Ind. 65, 706–720. doi:10.1016/j.compind.2014.02.005
- Pach, C., Berger, T., Sallez, Y., Bonte, T., Adam, E., Trentesaux, D., 2014b. Reactive and energy-aware scheduling of flexible manufacturing systems using potential fields. Comput. Ind. 65, 434–448. doi:10.1016/j.compind.2013.11.008
- Pach, C., Sallez, Y., Berger, T., Bonte, T., Trentesaux, D., Montreuil, B., 2014c. Routing Management in Physical Internet Crossdocking Hubs: Study of Grouping Strategies for Truck Loading, in: Advances in Production Management Systems. Springer, pp. 483–490.
- Paelke, V., Röcker, C., 2015. User Interfaces for Cyber-Physical Systems: Challenges and Possible Approaches, in: Marcus, A. (Ed.), Design, User Experience, and Usability: Design Discourse, Lecture Notes in Computer Science. Springer International Publishing, pp. 75–85.
- Pahl, C., Zhu, Y., 2006. A Semantical Framework for the Orchestration and Choreography of Web Services. Electron. Notes Theor. Comput. Sci., Proceedings of the International Workshop on Web Languages and Formal Methods (WLFM 2005)Proceedings of the International Workshop on Web Languages and Formal Methods (WLFM 2005) 151, 3–18. doi:10.1016/j.entcs.2005.07.033
- Pannequin, R., Morel, G., Thomas, A., 2009. The performance of product-driven manufacturing control: An emulation-based benchmarking study. Comput. Ind. 60, 195–203. doi:10.1016/j.compind.2008.12.007

- Pannequin, R., Thomas, A., 2012. Another interpretation of stigmergy for product-driven systems architecture. *J. Intell. Manuf.* 23, 2587–2599. doi:10.1007/s10845-011-0588-3
- Pannequin, R., Thomas, A., 2009. Stigmergy: a design pattern for product-driven systems, in: INCOM 2009 Proceedings. pp. 2089–2094.
- Park, B.C., Foley, R.D., Frazelle, E.H., 2006. Performance of miniload systems with two-class storage. *Eur. J. Oper. Res.* 170, 144–155. doi:10.1016/j.ejor.2004.07.057
- Parton, H., Verpoest, I., 2005. In situ polymerization of thermoplastic composites based on cyclic oligomers. *Polym. Compos.* 26, 60–65. doi:10.1002/pc.20074
- Petnga, L., Austin, M., 2013. Ontologies of Time and Time-based Reasoning for MBSE of Cyber-Physical Systems. *Procedia Comput. Sci.*, 2013 Conference on Systems Engineering Research 16, 403–412. doi:10.1016/j.procs.2013.01.042
- Pinot, G., Cardin, O., Mebarki, N., 2007. A study on the group sequencing method in regards with transportation in an industrial FMS, in: IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, 2007. ISIC. Presented at the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, 2007. ISIC, pp. 151–156. doi:10.1109/ICSMC.2007.4414227
- Pinot, G., Mebarki, N., 2008. Best-case lower bounds in a group sequence for the job shop problem, in: 17th IFAC World Congress. pp. 14876–14881.
- Pirvu, B.-C., Zamfirescu, C.-B., Gorecky, D., 2015. Engineering insights from an anthropocentric cyber-physical system: A case study for an assembly station. *Mechatronics*. doi:10.1016/j.mechatronics.2015.08.010
- Pujo, P., Broissin, N., Ounnar, F., 2009. PROSIS: An isoarchic structure for HMS control. *Eng. Appl. Artif. Intell., Distributed Control of Production Systems* 22, 1034–1045. doi:10.1016/j.engappai.2009.01.011
- Pujo, P., Ounnar, F., Remous, T., 2015. Wireless Holons Network for Intralogistics Service, in: Service Orientation in Holonic and Multi-Agent Manufacturing, Studies in Computational Intelligence. Springer, pp. 115–124.
- Qiao, C., Sadek, A.W., Hulme, K., Wu, S., 2010. Addressing Design and Human Factors Challenges in Cyber-Transportation Systems with an Integrated Traffic-Driving-Networking Simulator, in: Workshop, October. p. 29.
- Rajkumar, R., Lee, I., Sha, L., Stankovic, J., 2010. Cyber-physical systems: The next computing revolution, in: 2010 47th ACM/IEEE Design Automation Conference (DAC). Presented at the 2010 47th ACM/IEEE Design Automation Conference (DAC), pp. 731–736.
- Rice, E.B., AlMajali, A., 2014. Mitigating the Risk of Cyber Attack on Smart Grid Systems. *Procedia Comput. Sci.*, 2014 Conference on Systems Engineering Research 28, 575–582. doi:10.1016/j.procs.2014.03.070
- Rudtsch, V., Gausemeier, J., Gesing, J., Mittag, T., Peter, S., 2014. Pattern-based Business Model Development for Cyber-Physical Production Systems. *Procedia CIRP*, 8th International Conference on Digital Enterprise Technology - DET 2014 Disruptive Innovation in Manufacturing Engineering towards the 4th Industrial Revolution 25, 313–319. doi:10.1016/j.procir.2014.10.044
- Sallez, Y., 2014. Proposition of an Analysis Framework to Describe the “Activeness” of a Product during Its Life Cycle, in: Service Orientation in Holonic and Multi-Agent Manufacturing and Robotics, Studies in Computational Intelligence. Springer, pp. 257–270.
- Sallez, Y., Berger, T., Deneux, D., Trentesaux, D., 2010. The Lifecycle of Active and Intelligent Products: The Augmentation Concept. *Int J Comput Integr Manuf* 23, 905–924. doi:10.1080/0951192X.2010.490275

- Sallez, Y., Berger, T., Raileanu, S., Chaabane, S., Trentesaux, D., 2010. Semi-heterarchical control of FMS: From theory to application. *Eng. Appl. Artif. Intell.* 23, 1314–1326. doi:10.1016/j.engappai.2010.06.013
- Sallez, Y., Berger, T., Trentesaux, D., 2009a. A stigmergic approach for dynamic routing of active products in FMS. *Comput. Ind.* 204–216. doi:10.1016/j.compind.2008.12.002
- Sallez, Y., Berger, T., Trentesaux, D., 2009b. Open-Control: A New Concept for Integrated Product-Driven Manufacturing Control, in: Bakhtadze, N. (Ed.), INCOM 2009 Proceedings. pp. 2065–2070. doi:10.3182/20090603-3-RU-2001.00347
- Sallez, Y., Pan, S., Montreuil, B., Berger, T., Ballot, E., 2016. On the activeness of intelligent Physical Internet containers. *Comput. Ind.*, Emerging ICT concepts for smart, safe and sustainable industrial systems 81, 96–104. doi:10.1016/j.compind.2015.12.006
- Santos, D.F., Almeida, H.O., Perkusich, A., 2015. A personal connected health system for the Internet of Things based on the Constrained Application Protocol. *Comput. Electr. Eng.*
- Schlechtendahl, J., Kretschmer, F., Lechler, A., Verl, A., 2014. Communication Mechanisms for Cloud based Machine Controls. *Procedia CIRP*, Variety Management in ManufacturingProceedings of the 47th CIRP Conference on Manufacturing Systems 17, 830–834. doi:10.1016/j.procir.2014.01.074
- Schmitt, C., Kothmayr, T., Ertl, B., Hu, W., Braun, L., Carle, G., 2014. TinyIPFIX: An efficient application protocol for data exchange in cyber physical systems. *Comput. Commun.* doi:10.1016/j.comcom.2014.05.012
- Schuh, G., Pitsch, M., Rudolf, S., Karmann, W., Sommer, M., 2014a. Modular Sensor Platform for Service-oriented Cyber-Physical Systems in the European Tool Making Industry. *Procedia CIRP*, Variety Management in ManufacturingProceedings of the 47th CIRP Conference on Manufacturing Systems 17, 374–379. doi:10.1016/j.procir.2014.01.114
- Schuh, G., Potente, T., Thomas, C., Hempel, T., 2014b. Short-term Cyber-physical Production Management. *Procedia CIRP*, 8th International Conference on Digital Enterprise Technology - DET 2014 Disruptive Innovation in Manufacturing Engineering towards the 4th Industrial Revolution 25, 154–160. doi:10.1016/j.procir.2014.10.024
- Schuh, G., Potente, T., Varandani, R., Hausberg, C., Fränken, B., 2014c. Collaboration Moves Productivity to the Next Level. *Procedia CIRP*, Variety Management in ManufacturingProceedings of the 47th CIRP Conference on Manufacturing Systems 17, 3–8. doi:10.1016/j.procir.2014.02.037
- Schuh, G., Potente, T., Wesch-Potente, C., Weber, A.R., Prote, J.-P., 2014d. Collaboration Mechanisms to Increase Productivity in the Context of Industrie 4.0. *Procedia CIRP*, 2nd CIRP Robust Manufacturing Conference (RoMac 2014) 19, 51–56. doi:10.1016/j.procir.2014.05.016
- Seiger, R., Keller, C., Niebling, F., Schlegel, T., 2014. Modelling complex and flexible processes for smart cyber-physical environments. *J. Comput. Sci.* doi:10.1016/j.jocs.2014.07.001
- Seitz, K.-F., Nyhuis, P., 2015. Cyber-Physical Production Systems Combined with Logistic Models – A Learning Factory Concept for an Improved Production Planning and Control. *Procedia CIRP*, 5th Conference on Learning Factories 32, 92–97. doi:10.1016/j.procir.2015.02.220
- Shakshuki, E.M., Malik, H., Sheltami, T., 2014. WSN in cyber physical systems: Enhanced energy management routing approach using software agents. *Future Gener. Comput. Syst.*, Special Section: Advances in Computer Supported Collaboration: Systems and Technologies 31, 93–104. doi:10.1016/j.future.2013.03.001

- Shi, J., Wan, J., Yan, H., Suo, H., 2011. A survey of cyber-physical systems, in: Wireless Communications and Signal Processing (WCSP), 2011 International Conference on. IEEE, pp. 1–6.
- Spezzano, G., Vinci, A., 2015. Pattern Detection in Cyber-Physical Systems. Procedia Comput. Sci., The 6th International Conference on Ambient Systems, Networks and Technologies (ANT-2015), the 5th International Conference on Sustainable Energy Information Technology (SEIT-2015) 52, 1016–1021. doi:10.1016/j.procs.2015.05.096
- Stellingwerff, L., Pazienza, G.E., 2014. An Agent-Based Architecture to Model and Manipulate Context Knowledge, in: Advances in Practical Applications of Heterogeneous Multi-Agent Systems. The PAAMS Collection, Lecture Notes in Computer Science. Springer, pp. 256–267.
- Strang, D., Anderl, R., 2014. Assembly Process driven Component Data Model in Cyber-Physical Production Systems, in: Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science.
- Tang, L.-A., Yu, X., Kim, S., Gu, Q., Han, J., Leung, A., La Porta, T., 2013. Trustworthiness analysis of sensor data in cyber-physical systems. J. Comput. Syst. Sci., Theoretical and Practical Aspects of Warehousing, Querying and Mining Sensor and Streaming Data 79, 383–401. doi:10.1016/j.jcss.2012.09.012
- Thomas, A., Trentesaux, D., 2014. Are Intelligent Manufacturing Systems Sustainable?, in: Service Orientation in Holonic and Multi-Agent Manufacturing and Robotics, Studies in Computational Intelligence. Springer, pp. 3–14.
- Thramboulidis, K., 2015. A cyber-physical system-based approach for industrial automation systems. Comput. Ind. 72, 92–102. doi:10.1016/j.compind.2015.04.006
- Trentesaux, D., Giret, A., 2015. Go-green manufacturing holons: A step towards sustainable manufacturing operations control. Manuf. Lett. 5, 29–33.
- Trentesaux, D., Grabot, B., Sallez, Y., 2013a. Intelligent products: a spinal column to handle information exchanges in supply chains, in: APMS 2013. State College, USA.
- Trentesaux, D., Knothe, T., Branger, G., Fischer, K., 2015. Planning and Control of Maintenance, Repair and Overhaul Operations of a Fleet of Complex Transportation Systems: A Cyber-Physical System Approach, in: Service Orientation in Holonic and Multi-Agent Manufacturing, Studies in Computational Intelligence. Springer, pp. 175–186.
- Trentesaux, D., Pach, C., Bekrar, A., Sallez, Y., Berger, T., Bonte, T., Leitão, P., Barbosa, J., 2013b. Benchmarking flexible job-shop scheduling and control systems. Control Eng. Pract. 21, 1204–1225. doi:10.1016/j.conengprac.2013.05.004
- Trentesaux, D., Prabhu, V., 2014. Sustainability in Manufacturing Operations Scheduling: Stakes, Approaches and Trends, in: Advances in Production Management Systems, IFIP Advances in Information and Communication Technology. Springer, pp. 106–113.
- Trentesaux, D., Thomas, A., 2012. Product-Driven Control: A State of the Art and Future Trends, in: Borangiu, T. (Ed.), INCOM 2012 Proceedings. pp. 716–721. doi:10.3182/20120523-3-RO-2023.00081
- Valckenaers, P., Hadeli, Saint Germain, B., Verstraete, P., Van Brussel, H., 2006. Emergent short-term forecasting through ant colony engineering in coordination and control systems. Adv. Eng. Inform., Design of Complex Adaptive Systems 20, 261–278. doi:10.1016/j.aei.2006.01.007
- Van Brussel, H., Wyns, J., Valckenaers, P., Bongaerts, L., Peeters, P., 1998. Reference architecture for holonic manufacturing systems: PROSA. Comput. Ind. 37, 255–274. doi:10.1016/S0166-3615(98)00102-X

- Verl, A., Lechler, A., Wesner, S., Kirstädter, A., Schlechtendahl, J., Schubert, L., Meier, S., 2013. An Approach for a Cloud-based Machine Tool Control. *Procedia CIRP*, Forty Sixth CIRP Conference on Manufacturing Systems 2013 7, 682–687. doi:10.1016/j.procir.2013.06.053
- Verstraete, P., Saint Germain, B., Valckenaers, P., Van Brussel, H., Van Belle, J., Karuna, H., 2008. Engineering Manufacturing Control Systems Using PROSA and Delegate MAS. *Int J Agent-Oriented Softw Eng* 2, 62–89. doi:10.1504/IJAOSE.2008.016800
- Vijayapriya, T., Kothari, D.P., 2011. Smart Grid: An Overview. *Smart Grid Renew. Energy* 02, 305–311. doi:10.4236/sgre.2011.24035
- Vogel-Heuser, B., Diedrich, C., Pantforder, D., Gohner, P., 2014. Coupling heterogeneous production systems by a multi-agent based cyber-physical production system, in: 2014 12th IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN). Presented at the 2014 12th IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN), pp. 713–719. doi:10.1109/INDIN.2014.6945601
- Wagh, A., Hou, Y., Qiao, C., Zhang, L., Li, X., Sadek, A., Hulme, K., Wu, C., Xu, H.-L., Huang, L.-S., 2014. Emerging Applications for Cyber Transportation Systems. *J. Comput. Sci. Technol.* 29, 562–575. doi:10.1007/s11390-014-1450-9
- Wang, L., 2008. Wise-ShopFloor: an integrated approach for web-based collaborative manufacturing. *Syst. Man Cybern. Part C Appl. Rev. IEEE Trans. On* 38, 562–573.
- Wang, L., Törngren, M., Onori, M., 2015. Current status and advancement of cyber-physical systems in manufacturing. *J. Manuf. Syst.* doi:10.1016/j.jmsy.2015.04.008
- Wang, S., Zhang, C., Jia, D., 2015. Improvement of type declaration of the IEC 61499 basic function block for developing applications of cyber-physical system. *Microprocess. Microsyst.* doi:10.1016/j.micpro.2015.07.004
- Wang, S., Zhang, G., Shen, B., Xie, X., 2011. An Integrated Scheme for Cyber-physical Building Energy Management System. *Procedia Eng., CEIS 2011* 15, 3616–3620. doi:10.1016/j.proeng.2011.08.677
- Wan, J., Suo, H., Yan, H., Liu, J., 2011. A General Test Platform for Cyber-Physical Systems: Unmanned Vehicle with Wireless Sensor Network Navigation. *Procedia Eng., International Conference on Advances in Engineering 2011* 24, 123–127. doi:10.1016/j.proeng.2011.11.2613
- Wong, C.Y., McFarlane, D., Ahmad Zaharudin, A., Agarwal, V., 2002. The intelligent product driven supply chain, in: 2002 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. Presented at the 2002 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, p. 6. doi:10.1109/ICSMC.2002.1173319
- Wright, P., 2014. Cyber-physical product manufacturing. *Manuf. Lett.* 2, 49–53. doi:10.1016/j.mfglet.2013.10.001
- Wuest, T., 2015. Identifying Product and Process State Drivers in Manufacturing Systems Using Supervised Machine Learning, Springer Theses. Springer International Publishing.
- Yampolskiy, M., Horváth, P., Koutsoukos, X.D., Xue, Y., Sztipanovits, J., 2015. A language for describing attacks on cyber-physical systems. *Int. J. Crit. Infrastruct. Prot.* 8, 40–52. doi:10.1016/j.ijcip.2014.09.003
- Yang, X., Moore, P., Chong, S.K., 2009. Intelligent products: From lifecycle data acquisition to enabling product-related services. *Comput. Ind.* 60, 184–194. doi:10.1016/j.compind.2008.12.009

- Yu, Y., Koster, R.B.M. de, 2009. Optimal zone boundaries for two-class-based compact three-dimensional automated storage and retrieval systems. *IIE Trans.* 41, 194–208. doi:10.1080/07408170802375778
- Zambrano Rey, G., Bonte, T., Prabhu, V., Trentesaux, D., 2014. Reducing myopic behavior in FMS control: A semi-heterarchical simulation-optimization approach. *Simul. Model. Pract. Theory, Simulation-Optimization of Complex Systems: Methods and Applications* 46, 53–75. doi:10.1016/j.simpat.2014.01.005
- Zambrano Rey, G., Pach, C., Aissani, N., Bekrar, A., Berger, T., Trentesaux, D., 2013. The control of myopic behavior in semi-heterarchical production systems: A holonic framework. *Eng. Appl. Artif. Intell.* 26, 800–817. doi:10.1016/j.engappai.2012.08.011
- Zamfirescu, C.-B., Pirvu, B.-C., Gorecky, D., Chakravarthy, H., 2014. Human-centred Assembly: A Case Study for an Anthropocentric Cyber-physical System. *Procedia Technol.*, 2nd International Conference on System-Integrated Intelligence: Challenges for Product and Production Engineering 15, 90–98. doi:10.1016/j.protcy.2014.09.038
- Zaytoon, J., Lafortune, S., 2013. Overview of fault diagnosis methods for Discrete Event Systems. *Annu. Rev. Control* 37, 308–320. doi:10.1016/j.arcontrol.2013.09.009
- Zhang, L., Wang, Q., Tian, B., 2013. Security threats and measures for the cyber-physical systems. *J. China Univ. Posts Telecommun.* 20, Supplement 1, 25–29. doi:10.1016/S1005-8885(13)60254-X
- Zhang, Y., Shi, J., Zhang, T., Liu, X., Qian, Z., 2015. Modeling and checking for Cyber-Physical System based on hybrid interface automata. *Pervasive Mob. Comput.* doi:10.1016/j.pmcj.2015.07.008
- Zhang, Z., Eyisi, E., Koutsoukos, X., Porter, J., Karsai, G., Sztipanovits, J., 2014. A co-simulation framework for design of time-triggered automotive cyber physical systems. *Simul. Model. Pract. Theory* 43, 16–33. doi:10.1016/j.simpat.2014.01.001
- Zhao, Y., Wagh, A., Hou, Y., Hulme, K., Qiao, C., Sadek, A.W., 2014. Integrated Traffic-Driving-Networking Simulator for the Design of Connected Vehicle Applications: Eco-Signal Case Study. *J. Intell. Transp. Syst.* 0, 1–13. doi:10.1080/15472450.2014.889920
- Zhong, H., Nof, S.Y., 2015. The dynamic lines of collaboration model: Collaborative disruption response in cyber-physical systems. *Comput. Ind. Eng.* 87, 370–382. doi:10.1016/j.cie.2015.05.019
- Zonouz, S., Haghani, P., 2013. Cyber-physical security metric inference in smart grid critical infrastructures based on system administrators' responsive behavior. *Comput. Secur.* 39, Part B, 190–200. doi:10.1016/j.cose.2013.07.003