



HAL
open science

Contribution des architectures de contrôle holoniques à l'industrie 4.0

Olivier Cardin, William Derigent, Damien Trentesaux

► **To cite this version:**

Olivier Cardin, William Derigent, Damien Trentesaux. Contribution des architectures de contrôle holoniques à l'industrie 4.0. 12e Conférence Internationale de Modélisation, Optimisation et SIMulation- MOSIM'18, Jun 2018, Toulouse, France. hal-01985716

HAL Id: hal-01985716

<https://hal.science/hal-01985716v1>

Submitted on 18 Jan 2019

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.

CONTRIBUTION DES ARCHITECTURES DE CONTROLE HOLONIQUES A L'INDUSTRIE 4.0

Olivier CARDIN

LUNAM Université, Université de Nantes, LS2N UMR
CNRS 6004, 2 avenue du Pr Jean Rouxel, 44470
Carquefou, France
olivier.cardin@ls2n.fr

William DERIGENT

Research Centre for Automatic Control of Nancy,
CNRS UMR 7039, Campus Sciences, BP 70239,
Vandoeuvre-lès-Nancy Cedex, 54506, France
william.derigent@univ-lorraine.fr

Damien TRENTESAUX

LAMIH UMR CNRS 8201, University of Valenciennes
and Hainaut-Cambrésis, UVHC Valenciennes, France
damien.trentesaux@univ-valenciennes.fr

RESUME : *La flexibilité revendiquée par les systèmes de production de prochaine génération induit une profonde modification du comportement et du cœur même des systèmes de contrôle. L'hyper-connectivité et les capacités de gestion des données ciblées par le paradigme Industrie 4.0 permettent l'émergence de systèmes de contrôle plus flexibles et réactifs, basés sur la coopération d'entités autonomes et connectées dans le processus de décision. Au cours des 20 dernières années, le paradigme holonique est devenu le paradigme central de ces évolutions et a lui-même évolué. Cette contribution vise à souligner les évolutions conceptuelles dans l'application du paradigme holonique dans les architectures de contrôle des systèmes de production et à mettre en évidence à la fois l'intérêt que revêtent ces architectures pour l'application du paradigme Industrie 4.0 mais également les tendances de recherche actuelles dans ce domaine.*

MOTS-CLES : *Systèmes de production, Pilotage industriel, Holonic manufacturing systems, Architecture de contrôle, Industrie 4.0.*

1 INTRODUCTION

L'évolution des systèmes industriels vers ce que l'on appelle Industrie 4.0 est principalement basée sur le développement de ressources, produits et acteurs hautement connectés tout au long des processus industriels. Cette connectivité accrue permet de générer un flux constant d'informations diffusé par et disponible pour tous les acteurs. Elle ouvre de nombreuses opportunités pour améliorer l'efficacité des systèmes industriels, dans de nombreuses phases du cycle de vie des produits. On trouvera par exemple des bénéfices directs en :

- *Logistique* : les informations transmises immédiatement à l'ensemble de la chaîne logistique doit permettre une synchronisation constante entre les acteurs et faciliter l'adaptation aux changements (Barreto et al., 2017) ;
- *Production* : l'utilisation d'objets communicants comme éléments de la chaîne de production permet d'envisager le recueil en ligne d'informations relatifs à l'état du système productif. Il est alors possible d'ajuster le comportement de l'atelier en temps réel en raison de conditions ou de changements anormaux (Mrugalska and Wyrwicka, 2017) ;

- *Maintenance* : ces informations permettent d'envisager des capacités novatrices de surveillance et de gestion des connaissances basées sur la simulation (Bokrantz et al., 2017).

Cette transversalité horizontale tout au long du cycle de vie est très bien exprimée dans le modèle RAMI4.0 (*Reference Architecture Model for Industry 4.0*) illustré Figure 1 (Zezulka et al., 2016). Dans ce framework à trois dimensions, les aspects multi-échelle de l'approche (de l'atelier à la chaîne logistique par exemple) ainsi que les différents points de vue sur les gains potentiels de l'application d'Industrie 4.0 montrent une intégration dynamique verticale des données beaucoup plus intense qu'actuellement et illustre les nombreux défis restants encore à relever (Barbosa et al., 2016).

Industrie 4.0 suppose ainsi une adaptabilité temps-réel de l'ensemble de l'entreprise aux changements de conditions externes (production, relation clients/fournisseurs, etc.). Pour permettre une utilisation efficace des données disponibles pour la conduite de ces processus industriels orientés Industrie 4.0, il devient alors nécessaire de définir des systèmes informatiques d'entreprises dotés d'architectures de contrôle connectées, interopérables, flexibles et réactives. L'une des approches (orientée bottom-up) possibles est alors d'utiliser et d'intégrer verticalement les architectures de contrôle holoniques (Holo-

nic Control Architectures – HCA) développées initialement pour le contrôle de la production.

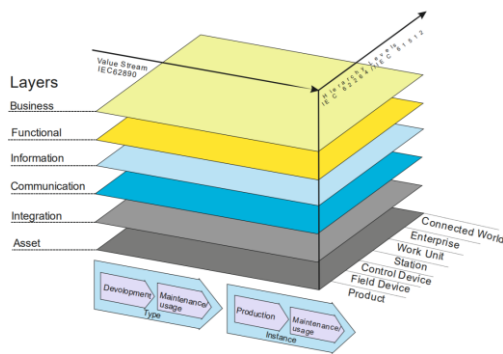


Figure 1. Modèle RAMI4.0 (Zezulka et al., 2016)

Au cours des 20 dernières années, les HCA ont été largement étudiées et développées. Elles sont devenues de plus en plus efficaces vis-à-vis de ces caractéristiques et leur utilisation au niveau industriel commence à se répandre (Blanc et al., 2008; Le Mortellec et al., 2013). Cet article a pour objectif de donner un aperçu de l'évolution des HCA au cours des deux dernières décennies et de la manière dont elles peuvent contribuer à la diffusion des technologies de l'Industrie 4.0. Les perspectives de recherche scientifique actuelles sont présentées dans une dernière section.

2 FONDAMENTAUX DES ARCHITECTURES DE CONTROLE HOLONIQUES

Une HCA est une architecture composée de holons, appelée holarchie. Un holon est une entité décisionnelle (avec entrées et sorties) potentiellement composée récursivement d'un ensemble de holons de sous-niveau. Un holon fait en même temps partie d'une organisation plus large composée de holons de niveau supérieur (cette dualité est appelée effet Janus (Koestler, 1978)). Il est important de noter qu'un holon est aussi composé d'une partie physique associée à une partie numérique (qui peut être modélisée en tant qu'agent numérique, avatar, jumeau numérique). Enfin, les holons sont des entités capables de communiquer avec leurs « pairs » ou d'autres entités externes à l'holarchie. La prise de décision, élément clé d'une architecture holonique, est un énorme sujet de recherche en soi. Selon notre expérience dans le cadre applicatif du génie industriel, nous suggérons que décider est l'activité qui consiste à réduire un ensemble de possibilités. Une notion proche est le concept de « degré de liberté » qu'une décision réduit. De ce point de vue, les activités décisionnelles classiques peuvent être identifiées: choix (ensemble réduit à un singleton, par exemple un holon choisit une vitesse de convoyage) ou classement (ordre d'intégration dans l'ensemble : par exemple un holon décide d'une suite de ressources à visiter). Une décision se prend également soit sur un domaine discret (par exemple, sur un ensemble de produits à réaliser) soit sur un domaine continu (par exemple, sur un domaine de vitesse de rotation ou de consommation d'énergie admissible).

Étant donné l'importance des aspects physiques et matériels au sein d'HCA, décider n'est « qu'une » activité

parmi un ensemble plus large définissant un processus que nous avons appelé processus décisionnel. Prolongeant les idées de base de (Simon, 1996), un processus décisionnel se compose de plusieurs activités : suivi, déclenchement, conception de décisions possibles, évaluation a priori des décisions, décision, application et évaluation a posteriori des décisions. Étant donné l'aspect récursif d'une holarchie, ce processus est également récursif et peut être implémenté dans différentes couches de holons responsables de leur mise en œuvre. Par exemple, un holon en charge d'un contrôle qualité doit décider ou non d'une alerte à un opérateur de supervision. Cette activité est en fait une activité de déclenchement par dépassement d'un seuil d'alerte de non qualité au sein d'un processus décisionnel qui vise à contrôler le taux de non qualité. Cette activité, si on l'analyse plus finement, peut elle-même être décomposée en un processus décisionnel géré par des holons de niveau inférieur visant à décider, à leur niveau, par une stratégie d'apprentissage, du meilleur seuil de déclenchement afin d'éviter soit une sur-réaction en sollicitant trop fréquemment l'opérateur soit une sous-réaction qui conduit à un taux de non qualité trop élevé pour les clients.

Les holons, en tant qu'entités décisionnelles doivent ainsi disposer d'un certain degré d'autonomie pour construire leurs décisions. Dans ce contexte, **l'autonomie** est définie comme le degré de liberté disponible pour chaque holon par rapport à sa capacité de décision, quel que soit son niveau hiérarchique au sein de l'holarchie. Elle peut se traduire par exemple sous la forme d'un espace de recherche lors de l'utilisation d'outils d'optimisation, les contraintes sur cet espace limitant cette autonomie. Le niveau d'autonomie de chaque holon peut être défini pendant la phase de conception de l'HCA par le concepteur lui-même, mais il peut également être ajusté par un holon de niveau supérieur avec une application à un niveau inférieur pendant la phase d'exploitation. Par exemple, un holon superviseur décide de restreindre l'ensemble de holons ressources possibles parmi lesquels des holons produits de niveau inférieur doivent choisir car une opération de maintenance doit être effectuée sur l'un de ces holons ressources. La communication entre holons permet également d'ajuster l'autonomie des holons. Par exemple un protocole de négociation directe (de type contract-net) peut conduire un ensemble de holons à améliorer la qualité de leurs décisions au travers d'un mécanisme d'enchères élargissant les espaces de recherche pour éviter les optimums locaux. On retrouve ici la vision classique en optimisation par les contraintes : une décision est soit sous contraintes soit sur les contraintes.

En raison de ces caractéristiques, on s'attend à ce qu'un comportement émergent se produise au niveau de l'HCA. De notre point de vue, **un comportement émergent** est l'observation d'une propriété à un niveau global d'un HCA qui n'a pas été explicitement intégrée (programmée) dans les holons composant cette HCA. Par exemple, l'utilisation d'algorithmes de champs potentiels attractifs / répulsifs peut conduire les holons produits à éviter naturellement les holons ressource actuellement

indisponibles pour cause de panne et à les sélectionner à nouveau après la fin de la maintenance, sans détailler ce comportement de manière explicite dans le HCA. Dans la littérature, plusieurs propriétés émergentes attendues sont régulièrement décrites en utilisant la notation self-*, par exemple : self-adaptation, self-reconfiguration, etc. (Leitão et al., 2016).

3 EVOLUTION DES ARCHITECTURES

Quelques études ont déjà proposé un parallèle entre Industrie 4.0 et architectures de contrôle (Meissner et al., 2017). Les critères généralement utilisés concernent la dualité hiérarchie/hétéarchie et leur hybridation et cherchent à montrer la performance de chacune de ces propositions. Notre proposition ici est de proposer un historique plus précis des évolutions, en prenant notamment en compte les dimensions outil et applications.

3.1 Bénéfices et évolutions des architectures de référence

La mise en place d'un système de contrôle basé sur un ensemble d'entités communicantes autonomes est une tâche qui nécessite de nombreuses compétences de la part des développeurs. Comme nous l'avons déjà dit, plusieurs travaux de recherche parallèles ont étudié les architectures de contrôle les plus efficaces d'une manière générale avec un point de vue de la performance, mais le processus de développement n'est pas obligatoirement amélioré de la même manière.

Cependant, compte tenu du développement des systèmes de production holoniques (Holon Manufacturing Systems – HMS), les systèmes ciblés permettent de réduire la complexité du processus. En effet, les systèmes de production évoluent généralement dans un environnement semi-structuré et gèrent un ensemble de données naturellement structurées. De ce fait, il est possible d'orienter et de faciliter la construction de l'architecture en spécialisant a priori certains des holons qui seront intégrés. Le rôle de l'architecture de référence est d'exprimer le rôle et les relations entre ces holons prédéfinis afin que toute l'architecture puisse être structurée en fonction de la référence.

3.2 Architectures génériques

La première architecture de référence décrite dans la littérature provient d'un projet IMS appelé Holonic Manufacturing Systems en 1996 (Van Brussel et al., 1998). Son acronyme est PROSA (Figure 2), en tant qu'acronyme des 4 holons qui composent l'architecture:

- Holons Produits, en charge de la gestion des connaissances de production;
- Holons Ressources, en charge de la gestion des connaissances du processus;
- Holons Ordre, en charge de la gestion de l'exécution du processus;
- Holons Staff, non représentés sur la Figure 2, agissant en tant que conseiller global pour l'ensemble de l'architecture.

Cette architecture est la plus référencée en littérature scientifique (plus de 1700 à la fin de 2017) et constitue souvent la base des architectures émergentes comme étant la plus générique.

Cette architecture a été la première d'une série, développée pour différents domaines (à savoir la production, la logistique, la maintenance, etc.). Par exemple, PROSIS (produit, ressource, ordre, simulation pour la structure isoarchique) a été conçue pour offrir un paradigme d'organisation différent en utilisant le concept d'isoarchie (Pujo et al., 2009). Une isoarchie est une architecture ne contenant pas de liens hiérarchiques de subordination entre holons. Au même niveau de décision, toutes les différentes entités décisionnaires ont exactement le même pouvoir dans le mécanisme de prise de décision. Ainsi, cela correspond à l'absence totale de hiérarchie, à la fois fonctionnelle et temporelle. Dans l'architecture PROSIS, le Staff Holon, inutile dans un tel contexte isoarchique, a été remplacé par un Holon Simulation qui vise à simuler l'évolution du système de production à partir de son état actuel, obtenu via l'écoute active et l'analyse des interactions entre tous les autres holons.

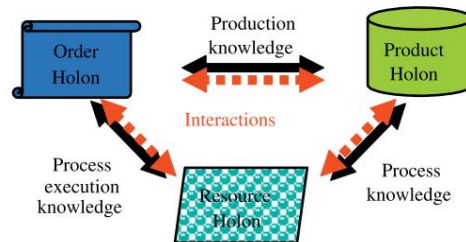


Figure 2. Représentation simplifiée de l'architecture PROSA

3.3 Architectures orientées multi-agents

Parallèlement, la question de la mise en œuvre des architectures dans une perspective de système de contrôle a été étudiée et plusieurs architectures ont été dérivées de PROSA afin de bénéficier des théories et des outils développés dans le domaine multi-agents.

Parmi ceux-ci, HCBA (Holon Component Based Architecture) (Chirn and McFarlane, 2000) est la première architecture basée sur une fusion de différents concepts issus du développement de composants, du système multi-agents (MAS) et du HMS. Le but d'une telle fusion est de développer une architecture hautement décentralisée, construite à partir de composants coopératifs et intelligents autonomes et modulaires, capables de gérer rapidement les différents changements, en mettant l'accent sur la reconfigurabilité du système. HCBA est composé de 2 types de composants dans le système de production, composant ressource et composant produit. Le composant ressource est composé d'une partie physique et d'une partie de contrôle virtuel. La partie physique est dédiée à l'exécution des opérations, tandis que sa partie contrôle gère l'exécution de l'opération au niveau des ressources, le processus de décision lié aux ressources, et la communication avec les autres composants pour la négociation. Les ressources sont en charge de l'ordonnement des opérations, tout en recherchant l'optimisation de leur utilisation. Le composant produit est également composé

d'une partie physique et d'une partie informationnelle. Sa partie physique peut représenter des matériaux, des pièces, des palettes etc. De plus, la partie informationnelle est responsable du programme de production, y compris le contrôle du routage, le contrôle du processus, la prise de décision et l'information de production. La partie information est composée d'agents virtuels avec des rôles spécifiques. Chaque Composant Produit est composé d'un Coordinateur de Produit créant des agents WIP (Work in Process). Les deux sont en charge de l'exécution des commandes, mais à différents niveaux. Le Coordinateur Produit assure le suivi de production d'un lot alors que les agents WIP sont en charge du suivi de production d'une pièce individuelle. Par conséquent, les agents WIP négocient avec la communauté des ressources pour définir le traitement des pièces dans l'atelier. Ces négociations sont réalisées dans un objectif fixé par le coordinateur de produit (Figure 3).

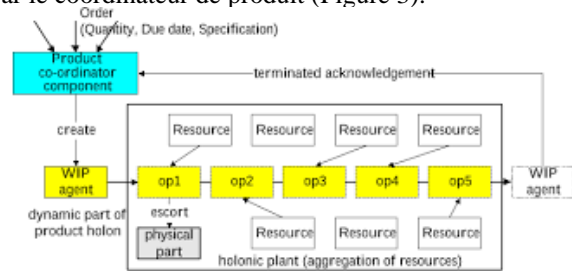


Figure 3. Structure de l'architecture HCBA

De la même manière, Delegate MAS (D-MAS) est un modèle architectural qui permet à un agent de déléguer une responsabilité à un essaim d'agents légers pour soutenir cet agent dans l'accomplissement de ses fonctions (Verstraete et al., 2008). L'agent émetteur peut déléguer plusieurs responsabilités, chacune appliquant le modèle D-MAS. L'agent peut utiliser une combinaison de systèmes multi-agents délégués pour gérer une seule responsabilité. Le délégué MAS peut également fournir des services à d'autres agents. D-MAS est une description plus générique d'une approche inspirée par le comportement de colonies de fourmis. Le modèle D-MAS se compose de trois éléments : l'agent, la fourmi et l'environnement (Figure 4).

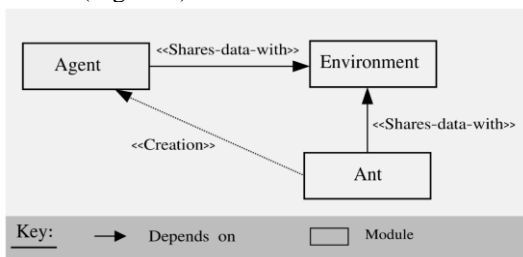


Figure 4. Vue architecturale de D-MAS (Verstraete et al., 2008)

3.4 Extensions des architectures holoniques

Au cours des années, le champs applicatif des HCA s'est étendu et a permis de faire évoluer les concepts et ainsi accroître leur généricité.

En premier lieu, ADACOR (ADaptive holonic COntrol aRchitecture) est une architecture de référence holonique pour les systèmes de production distribués, proposée par

(Leitão and Restivo 2006). ADACOR est une HCA décentralisée qui considère également la centralisation pour tendre vers une optimisation globale du système. Les holons appartiennent aux classes suivantes : Holons Produit (ProdH), Holons Tâches (TH), Holons Opérations (OpH) et Holons Superviseurs (SupH), interconnectés suivant la représentation proposée dans la Figure 5.

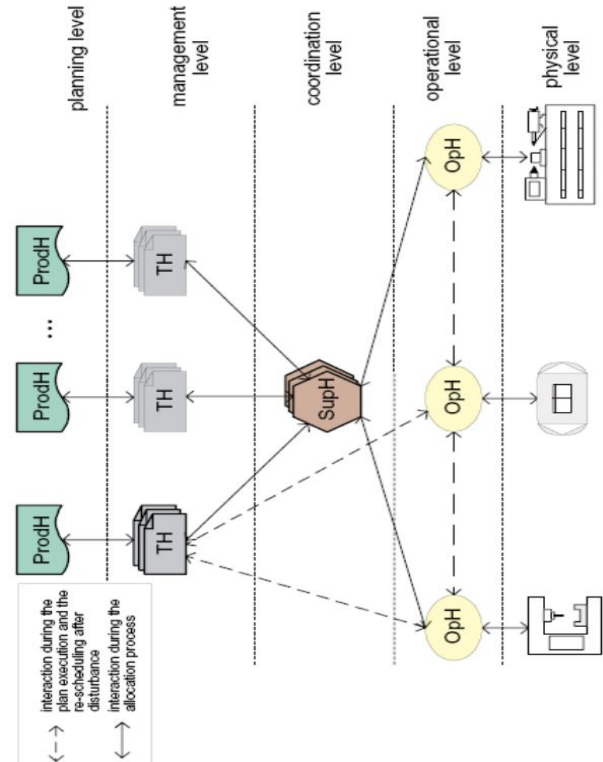


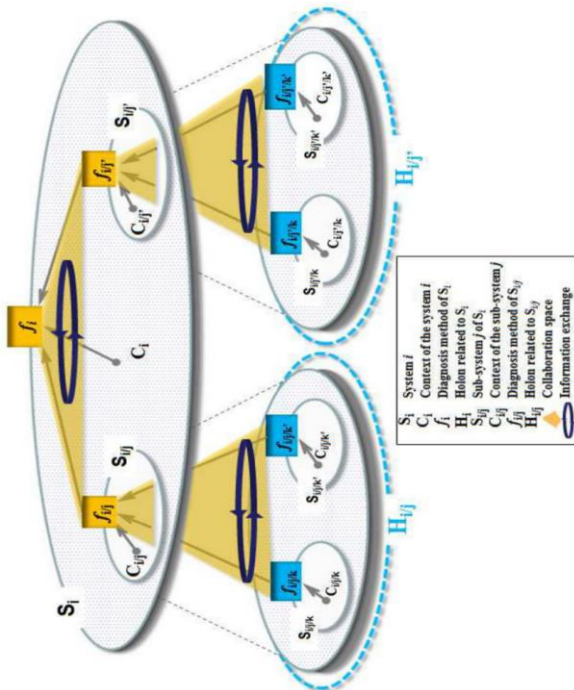
Figure 5. Répartition des holons dans ADACOR (Leitão and Restivo, 2006)

En exécution normale, l'architecture ADACOR maintient le système de production à l'état stationnaire, où les holons sont organisés selon une structure hiérarchique, les OH suivant les plannings d'optimisation proposés par les SupH pour les TH. Lorsqu'un problème survient (retard, défaillance de la machine, ...), le système global entre dans un état transitoire, caractérisé par la réorganisation des holons nécessaires pour réagir à la perturbation. Pour ce faire, ADACOR utilise un mécanisme d'étalement semblable à la phéromone pour diffuser l'information globalement. Grâce à celui-ci, ADACOR introduit la possibilité de changer dynamiquement la holarchie entre l'état stationnaire et le transitoire.

Pour étendre l'adaptabilité de PROSA, une extension aux systèmes hybrides dynamiques, c'est-à-dire des systèmes spécifiques où les comportements discrets et continus doivent être pris en compte dans le contrôle du système, a été présentée comme l'architecture de référence H2CM (Holonc Hybrid Control Model) (Indriago et al., 2016). Cette architecture est basée sur les trois holons de base de PROSA sans le Staff. Deux différences principales avec le PROSA classique apparaissent : (i) Chaque ressource est liée avec un ordre et un produit tout au long de sa vie. L'Holon Ordre est en charge de la surveillance de la ressource tandis que le Holon Produit est en charge de la gamme à appliquer sur le produit réel. Le contenu et

les objectifs des holons Ordre et Produit sont en constante évolution, mais la structure reste indéfiniment la même ; (ii) Un lien récursif clair est présent sur le Holon Ressource. En effet, chaque ressource composée peut être décomposée de manière fractale en une ou plusieurs holarchies, comprenant une ou plusieurs ressources et leurs holons ordre et produit associés. Les relations d'agrégation créées ici peuvent être modifiées tout au long du fonctionnement du système ; Les holarchies peuvent être créées et détruites en ligne.

L'architecture SURFER (Le Mortellec et al., 2013) représente une adaptation intéressante des systèmes de contrôle pour la maintenance et la surveillance de systèmes hautement complexes (à savoir les trains dans ce cas). Le modèle architectural holonique générique proposé pour le diagnostic est présenté dans la Figure 6. Ce modèle est composé de structures de diagnostic récursives, y compris des sous-systèmes et leurs méthodes de diagnostic associées. Chaque système diagnostiqué est composé d'une partie contrôle et d'une partie contrôlée, qui opèrent dans un contexte évolutif. Au niveau le plus bas de la structure holonique, la partie contrôlée est typiquement composée d'éléments physiques (par exemple, capteurs, commutateurs et actionneurs) qui sont liés à des contraintes mécaniques et électriques.



3.5 HCA orientées services et cloud

Une des tendances dans le développement des HCA suit l'évolution des technologies basées sur le cloud. Dans cette tendance mondiale, une HCA de référence a été développée pour profiter de certaines normes basées sur le web telles que les services web. L'architecture du SoHMS (Gamboa Quintanilla et al., 2016) est principalement basée sur les principes et concepts introduits par PROSA (Van Brussel et al 1998), combinant certains concepts d'interaction de HCBA (Chirn and McFarlane,

2000) et d'ADACOR (Leitão and Restivo, 2006). Cette proposition utilise le produit (PH), les ressources (RH) et les ordres (OH) de PROSA, et le concept de directory facilitator (DF) des systèmes multi-agents. Même si les concepts de base restent proches des concepts originaux, leur comportement a été adapté pour faire des services (Manufacturing Services - Mservices) le principal élément d'interaction, orienté vers les activités de planification et d'ordonnancement. La Figure 7 montre un diagramme de classes de l'architecture détaillant les relations et les échanges de données entre acteurs. Du point de vue des services, un nouvel élément ajouté à l'architecture est le SIL (Service Interface Layer), utilisé comme interface entre les descriptions de service et leurs méthodes d'implémentation en atelier. En raison de son caractère individuel et propriétaire, chaque ressource possède une instance SIL, contenant toutes les informations sur la manière d'implémenter un service au niveau le plus bas.

3.6 HCA dynamiques

La définition d'HCA dynamiques est probablement l'une des tendances actuelles les plus prometteuses dans la littérature (Cardin et al., 2015). Il postule que le comportement du système peut être modifié dynamiquement afin de s'adapter aux changements de l'environnement et ainsi réduire les états transitoires et la perte de performance associée. Dans le domaine de la production, ORCA (Pach et al., 2014) a été l'une des premières HCA dynamiques formalisées dans la littérature (Figure 8).

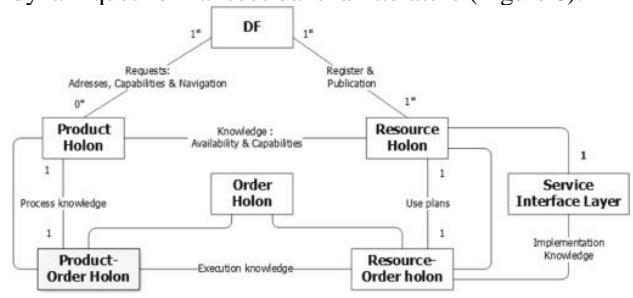


Figure 7. Structure du SoHMS (Gamboa Quintanilla et al., 2016)

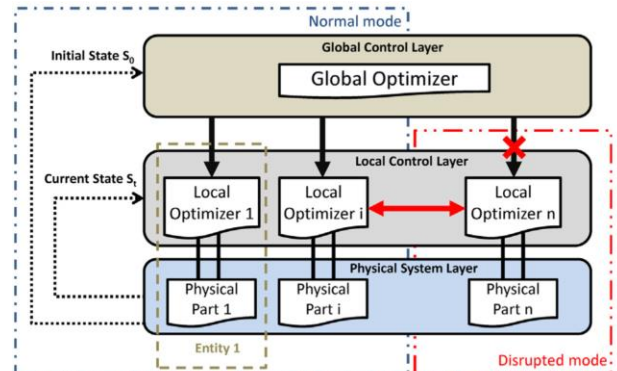


Figure 8. Organisation globale de ORCA (Pach et al., 2014)

Une évolution du mécanisme ADACOR a également été présentée dans (Barbosa et al., 2015) sous le nom ADACOR². L'objectif est de laisser le système évoluer dynamiquement à travers des configurations découvertes

en ligne, et pas seulement entre un état stationnaire et un état transitoire (Figure 9). Le reste de l'architecture est néanmoins assez similaire à ADACOR.

La dernière architecture en date est appelée POLLUX (Jimenez et al., 2017). La nouveauté principale est centrée sur le mécanisme d'adaptation de l'architecture, grâce à des paramètres de gouvernance qui élargissent ou contraignent le comportement des holons de bas niveau concernant les perturbations observées par le niveau supérieur, l'idée étant de trouver la "meilleure" architecture qui convient aux perturbations détectées.

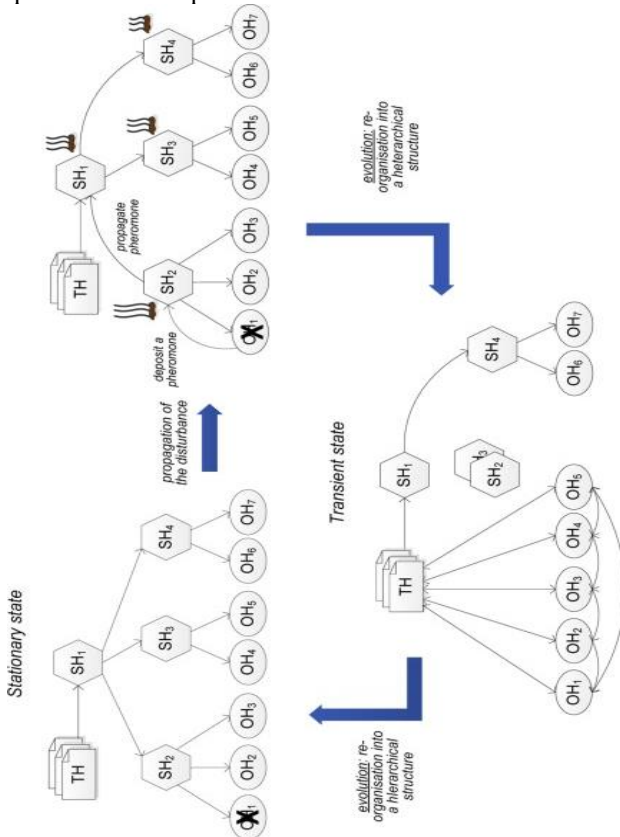


Figure 9. Evolution ADACOR² (Barbosa et al., 2015)

4 SYNTHÈSE ET PERSPECTIVES SCIENTIFIQUES

Une synthèse récente des travaux relatifs à Industrie 4.0 (Hermann et al., 2016) a montré que les principaux axes de recherche sont :

1. Les Systèmes Cyber-Physiques ;
2. L'Internet des Objets ;
3. L'Usine Intelligente et Connectée ;
4. L'Internet des Services ;
5. Le Produit Intelligent.

Cette synthèse met bien en avant les intégrations à la fois horizontale et verticale des données au sein des architectures de contrôle. Au travers de l'analyse présentée dans les sections précédentes, nous avons répertorié dans la Figure 10 les différents axes d'évolution des HCA au fil du temps afin de mettre en évidence les différentes tendances actuellement rencontrées et leur convergence avec les thématiques Industrie 4.0. On peut ainsi noter

un focus particulier sur les notions de flexibilité et d'adaptabilité des HCA lors des premières années, spécifiquement pilotées par le cœur d'application qui restait le contrôle de la production. Au fur et à mesure de l'élargissement des champs d'application potentiels, de nouvelles tendances sont apparues en termes de connectivité et d'ouverture à une intégration verticale, ce qui se trouve être en cohérence totale avec les enjeux présentés dans le modèle RAMI4.0 (Figure 1).

Néanmoins, certains défis supplémentaires doivent être résolus afin d'envisager leur adoption par le secteur industriel dans un contexte industrie 4.0. Nous listons ci-dessous quelques-uns de ces défis.

Comportements émergents / adaptabilité : dans la vision de l'industrie 4.0, les systèmes devraient être capables de réagir à des événements imprévus et de proposer de nouveaux comportements. Les architectures actuelles intègrent des mécanismes de réaction, basés sur des entités décisionnelles locales, parfois coordonnées par des entités globales décisionnelles. Un problème scientifique important consiste à ajuster correctement le niveau d'autonomie des entités décisionnelles locales par rapport au niveau d'autorité des entités décisionnelles globales. La notion d'agrégation inhérentes aux holarchies en général et aux HCA en particulier permet de propager des décisions sur plusieurs niveaux tout en laissant de la flexibilité aux niveaux hiérarchiquement inférieurs, ce qui constitue une preuve de faisabilité de l'application de ces concepts (Jimenez et al., 2017).

Garantie de performance : un comportement émergent implique généralement un manque de garantie sur la performance attendue du système. Cette manque de garantie est donc une problématique allant de pair avec l'augmentation de la réactivité des architectures de contrôle orientées Industrie 4.0. Les HCA dynamiques comme ADACOR², POLLUX ou ORCA sont intéressantes à ce niveau, car elles intègrent un module d'ordonnement optimal utilisé en état normal, couplé à des capacités réactives, exécutées lorsqu'une perturbation se produit. Lorsque cela se produit, le HCA peut modifier sa propre organisation pour minimiser l'impact de cette perturbation. De telles architectures garantissent que les performances du système de fabrication sont optimales dans un état normal, mais pas toujours en mode dégradé. En fait, en raison du niveau d'autonomie et d'adaptabilité laissé aux entités décisionnelles locales, il pourrait être difficile d'assurer une performance minimale du système dans toutes les situations dégradées. Cela dépend certainement du nombre et des types de turbulences survenant sur le système de production. Une étude comparative de chaque architecture holonique dynamique peut alors être un défi très intéressant à explorer. Pour garantir la performance des architectures holoniques, les preuves formelles constituent une autre possibilité de recherche intéressante. Cette possibilité est également intéressante en ce qui concerne les considérations éthiques, étant donné que les preuves du comportement sont les premiers pas vers la détermination des responsabilités en cas d'incident.

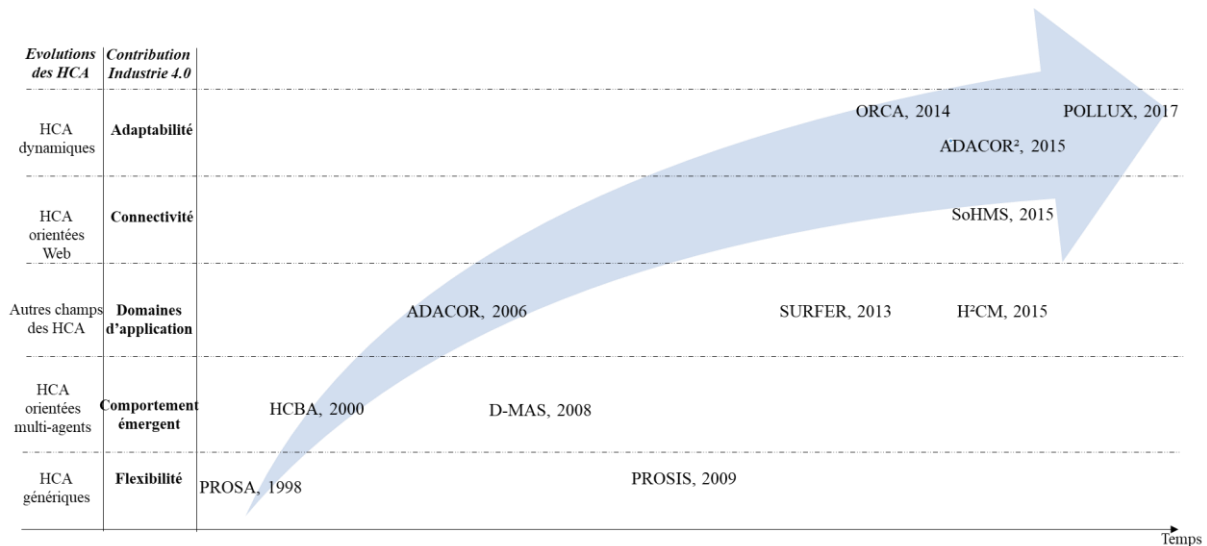


Figure 10. Evolutions des HCA au cours du temps et leurs contributions respectives à Industrie 4.0

Enfin, la génération du code lui-même est un aspect important, et une ingénierie dirigée par les modèles du logiciel est probablement une réponse en adéquation avec les HCA présentées précédemment.

Durabilité / gestion de l'énergie : les questions de durabilité constituent l'un des piliers de l'industrie 4.0. Les HCA peuvent être très bénéfiques pour plusieurs d'entre eux. Par exemple, la gestion de l'énergie à travers la notion de smart grid nécessite un contrôle massivement distribué, évolutif et coordonné pour lequel une perspective holonique sera pertinente. Le contrôle de l'activité de production des systèmes de production ou de logistique sera également affecté par la disponibilité de l'énergie due aux sources d'énergie renouvelables. Ces types de contraintes pourraient bénéficier d'une HCA dynamique afin de s'adapter dynamiquement aux changements fréquents de l'environnement. Une dernière orientation repose sur la connectivité des éléments de consommation, ce qui donnera un accès complet à leur consommation en temps réel et prévue pour une prise de décision en temps réel.

Big Data : un aspect important de l'industrie 4.0 est l'utilisation massive de capteurs pour le suivi des processus de production. Cependant, ceux-ci produisent une quantité importante de données qui ne peuvent pas être traitées par les architectures fortement centralisées actuelles (de type cloud). Certaines fonctions de pré-traitement devraient être intégrées et les HCA apportent des solutions dans ce sens, afin de transformer les données en informations pertinentes pour les holons, et même en connaissances de production quel que soit le niveau.

Intégration de l'humain dans la boucle : dans un atelier orienté Industrie 4.0, l'humain est partie intégrante à la fois du côté opératoire mais également au niveau de la prise de décision. Au niveau opératoire, les HCA permettent une reconfigurabilité de l'architecture et du système et une implémentation du concept Plug&Produce notamment via l'orientation-services (Gamboa Quintanilla et al., 2016). Il est encore néanmoins nécessaire de pouvoir garantir un comportement éthique de l'HCA

intégrant des humains et des composants physiques, potentiellement dangereux (Trentesaux and Rault, 2017). Concernant la prise de décision, les HCA permettent d'ouvrir des interfaces entre l'humain et le logiciel grâce à des avatars intelligents, les holons se comportant alors comme des digital twins des éléments du système.

5 CONCLUSION

Cet article vise à souligner l'évolution des architectures de contrôle holoniques au cours des 20 dernières années en rapport avec ce qui concerne le développement du paradigme de l'industrie 4.0. Cette étude a montré que plusieurs tendances principales sont apparues ces dernières années pour faire face aux objectifs d'adaptabilité et de flexibilité des systèmes industriels. Des détails ont également été fournis sur les HCA de référence disponibles dans la littérature, et enfin quelques éléments sur les perspectives de recherche qui peuvent être attendues dans ce domaine au cours des prochaines années.

Cette analyse montre une grande cohérence entre l'évolution de HCA et les objectifs de l'industrie 4.0, parmi lesquels:

- Le concept de base des HCA qui permet une autonomie et des comportements émergents des holons correspond aux orientations de l'Industrie 4.0;
- L'extension des domaines industriels d'applications des HCA, afin d'intégrer toutes sortes de systèmes dans le système industriel de nouvelle génération orienté Industrie 4.0;
- L'hyper-connectivité des HCA, notamment dans la perspective cloud, qui vise à tirer parti des nouveaux équipements et exigences de l'industrie 4.0 pour les différentes machines et organisations;
- L'adaptabilité des systèmes industriels face à l'évolution de leur environnement est favorisée par l'évolution dynamique des HCA, encore à

l'étude mais constituant une opportunité prometteuse.

REFERENCES

- Barbosa, J., Leitão, P., Adam, E., Trentesaux, D., 2015. Dynamic self-organization in holonic multi-agent manufacturing systems: The ADACOR evolution. *Computers in Industry* 66, 99–111.
- Barbosa, J., Leitão, P., Trentesaux, D., Colombo, A.W., Karnouskos, S., 2016. Cross benefits from cyber-physical systems and intelligent products for future smart industries, in: 2016 IEEE 14th International Conference on Industrial Informatics (INDIN). Presented at the 2016 IEEE 14th International Conference on Industrial Informatics (INDIN), pp. 504–509.
- Barreto, L., Amaral, A., Pereira, T., 2017. Industry 4.0 implications in logistics: an overview. *Procedia Manufacturing, Manufacturing Engineering Society International Conference 2017, MESIC 2017, 28-30 June 2017, Vigo (Pontevedra), Spain* 13, 1245–1252.
- Blanc, P., Demongodin, I., Castagna, P., 2008. A holonic approach for manufacturing execution system design: An industrial application. *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 21, 315–330.
- Bokrantz, J., Skoogh, A., Berlin, C., Stahre, J., 2017. Maintenance in digitalised manufacturing: Delphi-based scenarios for 2030. *International Journal of Production Economics* 191, 154–169.
- 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.
- 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.
- Gamboa Quintanilla, F., Cardin, O., L'Anton, A., Castagna, P., 2016. A modeling framework for manufacturing services in Service-oriented Holonic Manufacturing Systems. *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 55, 26–36.
- Hermann, M., Pentek, T., Otto, B., 2016. Design principles for industrie 4.0 scenarios, in: *System Sciences (HICSS)*, 2016 49th Hawaii International Conference on. IEEE, pp. 3928–3937.
- Indriago, C., Cardin, O., Rakoto, N., Castagna, P., Chacòn, E., 2016. H2CM: A holonic architecture for flexible hybrid control systems. *Computers in Industry* 77, 15–28.
- Jimenez, J.-F., Bekrar, A., Zambrano-Rey, G., Trentesaux, D., Leitão, P., 2017. Pollux: a dynamic hybrid control architecture for flexible job shop systems. *International Journal of Production Research* 55, 4229–4247.
- Koestler, A., 1978. *Janus: A Summing Up*. Vintage Books.
- Le Mortellec, A., Clarhaut, J., Sallez, Y., Berger, T., Trentesaux, D., 2013. Embedded holonic fault diagnosis of complex transportation systems. *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 26, 227–240.
- Leitão, P., Karnouskos, S., Ribeiro, L., Lee, J., Strasser, T., Colombo, A.W., 2016. Smart Agents in Industrial Cyber-Physical Systems. *Proceedings of the IEEE* 104, 1086–1101.
- Leitão, P., Restivo, F., 2006. ADACOR: A holonic architecture for agile and adaptive manufacturing control. *Computers in Industry* 57, 121–130.
- Meissner, H., Ilsen, R., Aurich, J.C., 2017. Analysis of Control Architectures in the Context of Industry 4.0. *Procedia CIRP, 10th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering - CIRP ICME '16*. [Edited by: Roberto Teti, Manager Editor: Doriana M. D'Addona] 62, 165–169.
- Mrugalska, B., Wyrwicka, M.K., 2017. Towards Lean Production in Industry 4.0. *Procedia Engineering, 7th International Conference on Engineering, Project, and Production Management* 182, 466–473.
- Pach, C., Berger, T., Bonte, T., Trentesaux, D., 2014. ORCA-FMS: a dynamic architecture for the optimized and reactive control of flexible manufacturing scheduling. *Computers in Industry* 65, 706–720.
- Pujo, P., Broissin, N., Ounnar, F., 2009. PROSIS: An isoarchic structure for HMS control. *Engineering Applications of Artificial Intelligence, Distributed Control of Production Systems* 22, 1034–1045.
- Simon, H.A., 1996. *The Sciences of the Artificial*. MIT Press.
- Trentesaux, D., Rault, R., 2017. Ethical Behaviour of Autonomous Non-Military Cyber-Physical Systems. Presented at the XIX International Conference on Complex systems: control and modeling problems, Samara, Russia, pp. 26–34.
- Van Brussel, H., Wyns, J., Valckenaers, P., Bongaerts, L., Peeters, P., 1998. Reference architecture for holonic manufacturing systems: PROSA. *Computers in Industry* 37, 255–274.
- 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.
- Zeulka, F., Marcon, P., Vesely, I., Sajdl, O., 2016. Industry 4.0 – An Introduction in the phenomenon. *IFAC-PapersOnLine, 14th IFAC Conference on Programmable Devices and Embedded Systems PDES 2016* 49, 8–12.