



HAL
open science

L'humain dans les systèmes de production basés sur les paradigmes IoT et CPS : état des lieux et perspectives

Etienne Valette, Hind Bril El-Haouzi, Guillaume Demesure

► To cite this version:

Etienne Valette, Hind Bril El-Haouzi, Guillaume Demesure. L'humain dans les systèmes de production basés sur les paradigmes IoT et CPS : état des lieux et perspectives. 13ème Conférence Internationale de Modélisation, Optimisation et Simulation, MOSIM'20, Nov 2020, Agadir, Maroc. hal-03025467

HAL Id: hal-03025467

<https://hal.science/hal-03025467>

Submitted on 26 Nov 2020

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.

L'HUMAIN DANS LES SYSTEMES DE PRODUCTION BASES SUR LES PARADIGMES IOT ET CPS : ETAT DES LIEUX ET PERSPECTIVES

E. VALETTE, H. BRIL EL-HAOUZI, G. DEMESURE

Université de Lorraine, CRAN, UMR 7039, Campus Sciences,
BP 70239, 54506 Vandœuvre-lès-Nancy cedex, France
{etienne.valette; hind.el-haouzi; guillaume.demesure}@univ-lorraine.fr

RESUME : Depuis les années 1970 et l'apparition du microprocesseur, le développement des systèmes informatiques a transformé le paysage industriel en favorisant l'intégration des systèmes de production et leur automatisation. Cette transformation s'est faite au détriment de l'humain, alors considéré comme un facteur de perturbations et de risques d'erreur dans ces systèmes. Il est aujourd'hui bien établi que l'humain a un rôle central à jouer dans ces systèmes et qu'il doit être pris en compte dès leur conception. Le futur des systèmes industriels, largement représenté par l'Industrie 4.0, s'appuiera sur la convergence des travaux de recherche des dernières années dans les domaines des architectures de contrôle, des systèmes cyber-physiques (CPS), de l'Internet des Objets (IoT), mais également dans la prise en compte et l'intégration de notions jusqu'alors jugées réservées à l'humain comme les approches sociales. Cet article liste les différentes approches sociales et anthropocentrées associées au CPS et IoT et se concentre sur leurs évolutions conceptuelles. Notre volonté est de faire le point sur les tendances de recherche actuelles ainsi que de montrer leur importance pour le développement des futurs systèmes industriels, mais également des systèmes de pilotage multi-agents ou basés sur des entités autonomes et intelligentes au sens large.

MOTS-CLES : Industrie 4.0, Systèmes multi-agents, Systèmes cyber-physiques, IoT (Internet of Things), Facteurs humains, Approche sociale

1 INTRODUCTION

Au cours des dernières décennies, de nombreuses recherches sur le facteur humain et ses différents aspects ont été menées (Flemisch et al. 2019). Outre le domaine manufacturier, ces recherches se retrouvent dans le cadre de contextes très divers tels que le trafic aérien (Hoc et Lemoine 1998), le covoiturage (Pokam et al. 2019), le contrôle du trafic ferroviaire (Vanderhaegen 2019), la robotique appliquée à la chirurgie (Haavik 2016), etc. Si la littérature est extrêmement riche dans ces domaines, on trouve en revanche assez peu de travaux dans le domaine des systèmes manufacturiers intelligents (IMS) (El Haouzi 2017), ces derniers étant axés sur des problématiques telles que l'adaptation des niveaux d'automatisation aux facteurs humains (Habib, Pacaux-Lemoine, et Millot 2017), l'utilisation d'algorithmes socio-inspirés (Zambrano Rey et al. 2013 ; Mezgebe et al. 2019), ou l'intégration de facteurs humains (comme la fatigue) dans l'optimisation de la planification (Mouayni et al. 2019).

Dans (Trentesaux et Millot 2016), les auteurs mettent en avant ce manque d'attention. On peut relier cette situation à la philosophie de la 3^{ème} révolution industrielle, qui voyait les solutions techniques comme les vecteurs de l'amélioration des performances industrielles et le moyen pour les entreprises de se soustraire aux erreurs (Reason 1990) et à la variabilité (Summerskill et al. 2013) associées à l'être humain. Les systèmes manufac-

turiers se sont donc développés en mettant l'accent sur l'automatisation des tâches et l'intégration informatique des systèmes (ERP, APS, MES, etc.) au détriment de l'humain. Ce dernier s'est vu investi du « devoir » de garantir le fonctionnement de ces systèmes en alternant entre un rôle quasi-robotique dans un système idéal et un rôle quasi-magique dans un système défaillant, phénomène que (Trentesaux et Millot 2016) qualifient d'« *humain magique* ».

Par conséquent, afin de répondre aux problématiques industrielles actuelles, le développement d'architectures adaptées à l'homme s'impose comme une nécessité. Ces dernières doivent être capables d'intégrer l'humain en tant qu'entité, avec ses variables (capacités physiques et mentales, compétences, nature, comportement, etc.), et d'être un support de communication entre toutes leurs entités.

Aujourd'hui, l'initiative Industrie 4.0, apparue en 2011 (Acatech 2013), et d'autres programmes nationaux (Industrie du futur, High Value Manufacturing Catapult (HVMC), Made in China 2020, etc.) (Bidet-Mayer 2016) sont pris comme références pour les développement des systèmes manufacturiers. Leur impact est tel qu'il est désormais communément admis que leur émergence marque le début de la 4^{ème} révolution industrielle. Si la 3^{ème} révolution industrielle a pour base l'automatisation massive des systèmes, cette 4^{ème} révolution repose, elle, sur l'intégration des objets, leur représentation virtuelle et des humains en tant que réseaux au sein de systèmes

complexes adaptables par le biais, notamment, de nouveaux paradigmes tels que les CPS (Cyber Physical System) ou les IoT (Internet of Things). Ces paradigmes sont souvent étudiés de manière techno-centrée.

L'objet de cet article est de donner un aperçu des évolutions conceptuelles des différentes approches sociales et anthropocentrées associées au CPS et IoT et de discuter des perspectives ouvertes par ces développements. Pour cela, nous allons commencer par présenter les fondamentaux des CPS et de l'IoT. Nous étudierons ensuite leurs évolutions vers des systèmes socio techniques dont les interactions inter-agents sont issues des relations sociales humaines et dont l'objectif est de permettre une meilleure intégration de l'humain au sein des systèmes.

2 FONDAMENTAUX SUR LES SYSTEMES CYBER-PHYSIQUES ET L'INTERNET DES OBJETS (CPS & IOT)

La notion de système cyber-physique (CPS) est généralement reconnue comme étant le principal pilier de l'industrie 4.0. En raison de sa large gamme d'applications potentielles, ce concept jouit d'une grande popularité dans le monde scientifique bien qu'il soit plutôt récent (Lee 2006). Toutefois, popularité et nouveauté en font un concept dont la définition et les limites sont floues. Il est d'ailleurs souvent associé à celui d'Internet des Objets (IoT), apparu un peu plus tôt, dans les années 2000 (Ashton 2009).

D'après (El Haouzi 2017) et (Bordel et al. 2017), des préférences dans l'usage des termes CPS et IoT s'observent d'une communauté scientifique à une autre ou d'une zone géographique à une autre. Ainsi, CPS sera préféré à IoT en mécanique et l'IoT en informatique. On retrouvera également plus souvent le terme CPS sur le continent américain que sur les continents européen et asiatique où IoT lui sera préféré. De notre point de vue, il semble toutefois important de définir et de différencier ces deux notions.

Bien qu'(Ashton 2009) revendique la paternité du concept d'IoT, il n'en donne pas de définition claire et précise. Parmi la multitude de définitions que l'on peut trouver dans la littérature, nous retiendrons celle (Madakam, Ramaswamy, et Tripathi 2015) et considéreront l'IoT comme : « *an open and comprehensive network of intelligent objects that have the capacity to auto-organize, share information, data, resources, reacting and acting in face of situations and changes in the environment* ». Dans cette définition, l'IoT est clairement considéré comme un lien entre des objets physiques au sein d'un système composé de plusieurs objets.

En ce qui concerne les CPS, il nous semble pertinent de conserver la définition de (Lee 2006) : « *physical and engineered systems whose operations are monitored, coordinated, controlled and integrated by a computing and communication core. This intimate coupling bet-*

ween the cyber and physical will be manifested from the nano-world to large-scale wide-area systems of systems. And at multiple time-scales ». Le concept CPS exprime donc un « couplage » entre les objets physiques et leur représentation / jumeau numérique.

Considérant ces deux définitions, on établit un système comme étant composé d'objets et de leurs représentations numériques. Ce système est organisé selon 2 axes : le premier, représentant le monde physique ; le second représentant le monde numérique (i.e. cyber). L'IoT correspondrait alors à la connectivité / synchronisation horizontale entre objets et la notion de CPS appellerait la connectivité / synchronisation verticale entre les objets et leur représentation numérique (Bagheri et Lee 2015) (Fig.1).

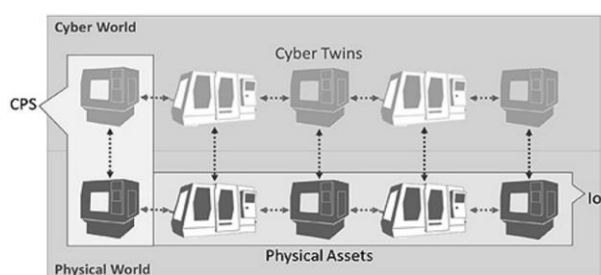


Fig. 1. CPS & IoT (Bagheri et Lee 2015)

Ainsi, IoT et CPS se positionnent comme deux représentations essentielles pour l'étude et le développement des systèmes industriels du futur. Nous avons vu en introduction la nécessité d'y intégrer l'humain. Dans la suite de cet article, nous nous penchons sur les différentes approches centrées-homme associées aux domaines de l'IoT et des CPS.

Pour cela, nous avons recherché dans le moteur de recherche Google Scholar des combinaisons des mots clef « IoT », « CPS », « anthropocentrique », « humain » et « social », à l'exclusion des citations et brevets. A partir des résultats des recherches : « *Cyber Physical Systems AND Human OR Social OR Anthropocentric* » et « *Internet of Things AND Human OR Social OR Anthropocentric* », ainsi que par la recherche systématique de la paternité des paradigmes abordés dans les articles trouvés, nous avons identifié une vingtaine d'articles qui nous semblent représentatifs de l'état actuel de la recherche.

3 VERS UNE PRISE EN COMPTE DE L'HUMAIN DANS LES SYSTEMES FUTURS

Au cours des deux dernières décennies, les concepts de CPS et d'IoT ont évolué vers une plus grande prise en compte des facteurs humains, passant de la définition de paradigmes très conceptuels comme les *Cyber Physical Social System* de (Wang 2010) à l'implémentation d'architectures de plus en plus abouties comme le *Social Human-In-The-Loop Cyber-Physical Production System* (Cimini et al. 2020). Cette évolution s'est grandement

appuyée sur la prise en compte d'un caractère social dans le développement des systèmes et de leurs architectures.

Notre analyse de ces articles nous permet de dire que ce caractère social n'est pas univoque et peut être décliné en trois classes :

- L'approche « classique » que l'on retrouve dans le domaine d'études des Systèmes Multi-Agents (SMA) qui définit comme agent social tout agent capable d'interagir avec un autre, qu'il soit de nature artefact ou naturelle ;
- L'approche « architecture » ou « médias » qui se base sur les architectures des applications de types *Social Network Services* (SNS) (e.g. Facebook, Twitter, Instagram, etc.) pour structurer les échanges de données au sein d'un réseau d'objets intelligent connectés (i.e. d'agents artefacts) ;
- L'approche « sociologique » consistant en une transposition des relations sociales humaines dans un système technique (ex : SIoT) ou sociotechnique (associant des objets et des humains).

On peut donc d'ores et déjà établir quatre catégories pour organiser les approches que nous avons isolées :

- La première traitant de l'organisation de systèmes d'objets communicants par des moyens purement technologiques (Ashton 2009 ; Lee 2006 ; Boyes et al. 2018 ; Monostori 2014) ;
- La seconde traitant de l'amélioration des moyens d'interactions entre l'homme et les systèmes techniques (Wang 2010; Schirner et al. 2013 ; Pirvu, Zamfirescu, et Gorecky 2016 ; Sowe et al. 2016 ; Cimini et al. 2020) ;
- La troisième traitant de l'organisation de systèmes d'objets communicants intelligents comme un réseau social, socio-inspiré ou basé sur les SNS (Guinard, Fischer, et Trifa 2010 ; Atzori, Iera, et Morabito 2011) ;
- La quatrième traitant de l'organisation des systèmes socio-techniques d'agents autour des trois prismes sociaux énoncés précédemment (Shi et Zhuge 2011 ; Pintus et al. 2015)

3.1 La place de l'humain dans les IoT et les CPS

Peu avant l'avènement de l'Industrie 4.0, (Wang 2010) notait déjà le manque de considération pour les facteurs humains dans le développement des Systèmes Cyber-Physiques. C'est pourquoi il a proposé le concept de *Cyber Physical Social System* (CPSS). Avec ce concept, il reconnaît l'importance de la prise en compte des facteurs humains dans la conception des systèmes et de leurs architectures. Afin de le supporter, les notions d'espaces physiologique, psychologique, social et mental ont été adjoints à celles d'espaces cyber et physique (Liu et al. 2011 ; Shi et Zhuge 2011) (Fig.2).

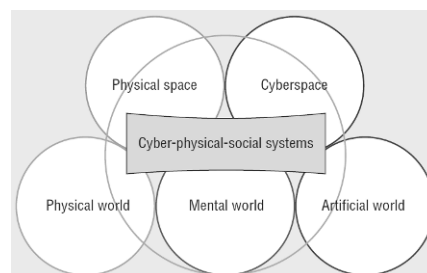


Fig. 2. Des trois mondes de Popper aux systèmes sociaux cyber-physiques. (Wang 2010)

Dans leur philosophie d'intégration du facteur humain, ces approches, sont cohérentes avec la définition de la conception centrée-homme donnée par la norme ISO 9241-210:2019 : « une manière de concevoir les systèmes interactifs, ayant pour objet de rendre les systèmes utilisables et utiles en se concentrant sur les utilisateurs, leurs besoins et leurs exigences, et en appliquant les facteurs humains, l'ergonomie et les connaissances et techniques existantes en matière d'utilisabilité ».

(Sowe et al. 2016) définissent un *Cyber-Physical Human System* comme étant un « interconnected systems (computers, cyber physical devices, and people) "talking" to each other across space and time, and allowing other systems, devices, and data streams to connect and disconnect ». Ces définitions se retrouvent dans le développement des *Human-in-The-Loop Cyber-Physical Systems* (HiTLCPS) (Schirner et al. 2013).

Le HiTLCPS consiste en un système embarqué améliorant la capacité d'un être humain à interagir avec son environnement physique (Fig.3). La « boucle » se compose de : un humain, un système embarqué, et leur environnement. Au-delà d'une traduction très concrète de l'intégration du facteur humain dans les systèmes, ils apportent ici une solution où le système se présente comme une extension physique de l'être humain, via une interface numérique.

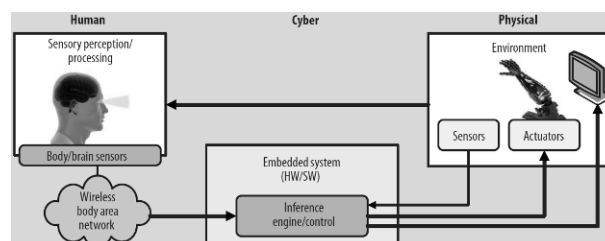


Fig. 3. HiTLCPS (Schirner et al. 2013)

Avec le développement de l'*Anthropocentric Cyber-Physical Systems* (ACPS) par (Pirvu, Zamfirescu, et Gorecky 2016), définie comme une architecture de référence intégrant les trois composantes physiques, cyber / informatiques et humaines (Fig.4), la recherche de l'intégration du facteur humain est poussée plus loin. Les auteurs le présentent comme un système intégré, social, local, irréversible, adaptatif et autonome, s'inscrivant dans la continuité de Systèmes Cyber-Physiques Sociaux (SCPS) et des Systèmes Sociaux Cyber-Physiques

(CPSS). L'ACPS est présentée comme une architecture « *where the humans are not just interactants with a CPS, but elements of the system affecting its lifetime behavior* ». Toutefois, contrairement aux contributions précédentes proposant des applications concrètes, celle-ci pousse l'intégration humaine plus loin mais reste, de ce fait, très conceptuelle.

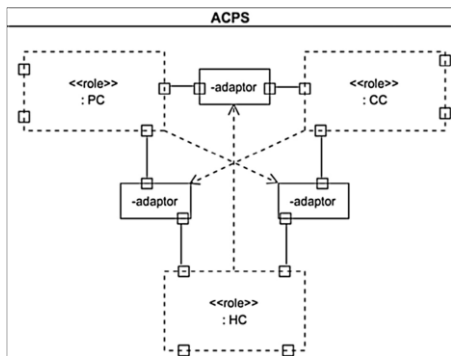


Fig. 4. Modèle de référence de l'ACPS. (Pirvu, Zamfirescu, et Gorecky 2016)

Le développement le plus récent de ces approches est à ce jour le *Social Human-In-The-Loop Cyber-Physical Production System* (Social-HITL-CPPS) de (Cimini et al. 2020). Les auteurs y ont identifié l'interprétation du comportement de l'agent humain et sa coordination avec d'autres agents comme les deux principaux défis de l'intégration de l'homme dans les environnements sociaux (et pas seulement industriels). Pour répondre à ces défis, une architecture à trois couches a été proposée. Cette architecture connecte, d'une part, les utilisateurs humains à la partie cyber via des interfaces utilisateur, et d'autre part, les parties physiques (c'est-à-dire les agents non humains et l'environnement) à la partie cyber via un réseau (Fig.5).

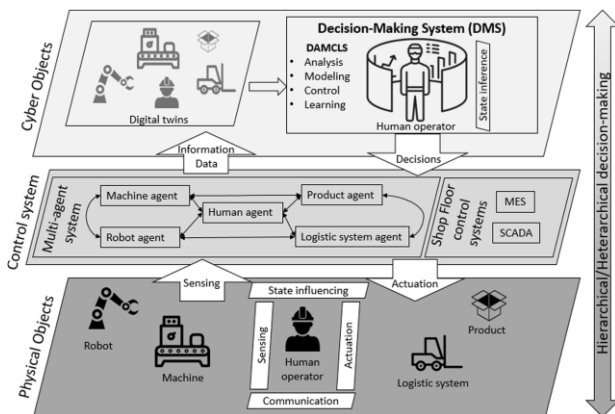


Fig. 5. Architecture de système manufacturier cyber-physique social intégrant l'humain dans la boucle. (Cimini et al. 2020)

De notre point de vue, toutes ces architectures peuvent être vues comme 1) des systèmes techniques d'objets communicants ou 2) des systèmes techniques en interactions avec les humains. Dans ce qui suit nous allons nous focaliser sur l'organisation en réseaux sociaux de systèmes techniques.

3.2 Les différentes approches sociales dans les IoT et les CPS

Entre 1995 et 2020, le nombre d'internautes est passé de 16 millions à plus de 4,5 milliards (« Internet World Stats » 2020), le nombre d'appareils connectés à Internet étant estimé entre 15 et 25 milliards. Les objets communicants nomades tels que les ordinateurs portables, les smartphones et les tablettes sont de plus en plus présents dans notre vie quotidienne. Ces dispositifs de communication ont été un support de développement important pour les applications de type réseaux sociaux qui se sont largement répandues depuis la fin des années 1990 (Boyd et Ellison 2007).

Les applications de type réseaux sociaux sont la partie applicative des services de réseaux sociaux (SNS), dont (Boyd et Ellison 2007) ont donné la définition: « *web-based services that allow individuals to (1) construct a public or semi-public profile within a bounded system, (2) articulate a list of other users with whom they share a connection, and (3) view and traverse their list of connections and those made by others within the system* ». Ces applications collectent et traitent des données pour soutenir la création ou le maintien de relations sociales entre leurs utilisateurs.

(Guinard, Fischer, et Trifa 2010) ont par la suite développé l'idée d'exploiter les structures des SNS existants pour supporter le partage de données entre objets intelligents au sein d'un réseau qu'ils ont caractérisé de *Social Web of Things* (SWoT) (Fig. 6).

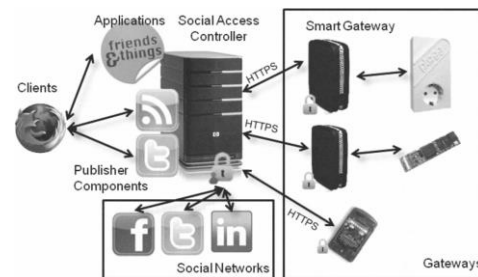


Fig. 6. Social Web of Things (Guinard, Fischer, et Trifa 2010)

(Atzori, Iera, et Morabito 2011) ont développé cette approche en initialisant le concept d'Internet Social des Objets (SIoT) (Fig.7). Contrairement à (Guinard, Fischer, et Trifa 2010), l'accent n'y est pas mis sur la réutilisation de structures de SNS existants, mais plutôt sur le développement d'une nouvelle architecture qui serait « *a social network of intelligent objects bounded by social relationships* » (Mala 2019). Celle-ci se base sur 5 relations sociales principales inspirées de systèmes humains, comme le sont celles développées par (Fiske 1992).

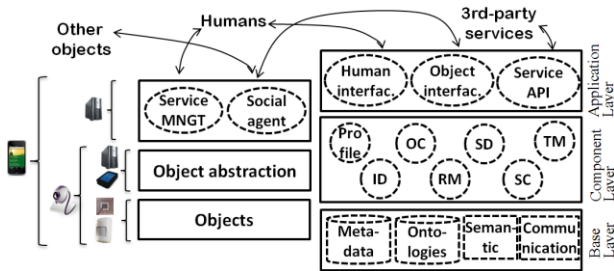


Fig.7 Architecture pour le SIoT: côté client (gauche) et côté serveur (droite) (Atzori, Iera, et Morabito 2011)

Selon lui, les sociétés humaines sont réglementées par quatre formes élémentaires de sociabilité, à savoir : le partage communautaire (Communal Sharing - CS), le rang d'autorité (Authority Ranking - AR), l'équilibre de concordance (Equality Matching - EM) et le prix de marché (Market Pricing - MP). Ce travail représente une première tentative pour créer une typologie des relations sociales, dont (Atzori, Iera, et Morabito 2011) se sont servi de base pour développer leur propre typologie. Ils ont défini les cinq relations inter-objets suivantes : relation parentale (Parental Object Relationship - POR), relation de propriété (Ownership Object Relationship - OOR), relation de co-travail (Co-Working Object Relationship - C-WOR), relation sociale (Social Object relationship - SOR) et relation de co-localisation (Co-Location Object Relationship - C-LOR).

Parallèlement, (Atzori, Iera, et Morabito 2011 ; Atzori et al. 2012) ont développé une architecture de support pour les interactions objet-objet et la découverte de services et ressources au sein d'un réseau d'objets connectés. Les relations sociales y sont établies et exploitées entre les objets, mais pas entre leurs bénéficiaires humains. Contrastant avec les approches sociales précédentes, celle-ci repose sur les mécanismes sociaux humains dans le but d'améliorer l'intégration des systèmes purement technologiques.

Toutefois, les relations exprimées dans les SIoT ouvrent la voie à la concrétisation d'un paradigme énoncé un peu plus tôt : la *société cyber-physique*. Elle a été définie par (Shi et Zhuge 2011) (Fig. 8) par un *Cyber-Physical Socio-Ecosystem* (CPSE) où l'espace physique naturel, le socio-espace, l'espace mental et le cyber-espace intera-

gissent et co-évoent les uns avec les autres. Le CPSE touche aux relations entre individus dans un environnement/système social cyber-physique. On retrouve d'ailleurs cette philosophie dans les travaux de (Pintus et al. 2015). Les auteurs définissent l'*Humanized Internet of Things* (HIoT) comme un IoT classique orienté Machine-Machine couplé au SIoT et à l'*Internet of People* (IoP). Il est aisé de percevoir, derrière cet assemblage de paradigmes, une vision plus large d'un système socio-technique d'agents, artefacts et humains, organisés régi par un ensemble de relations sociales.

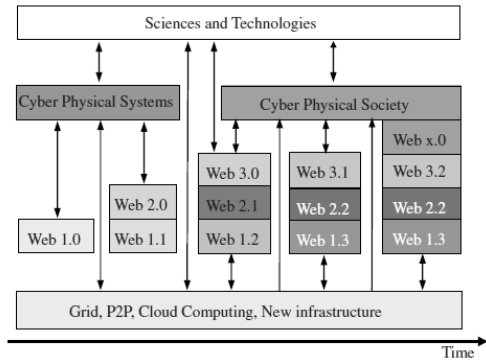


Fig.8. Société Cyber-Physique et autres systèmes (Shi et Zhuge 2011)

Pour conclure, la (Fig. 9) synthétise les évolutions des paradigmes CPS et IoT pour l'intégration de l'humain dans les systèmes industriels du futur. Nous pouvons constater que la première classe (Systèmes techniques d'objets communicants) et la troisième classe (Systèmes techniques structurés en réseau social d'objets) sont des visions que nous pouvons caractériser de *technocentrées*. Elles visent à créer des réseaux d'objets communicants à travers des approches sociales.

A l'inverse, la seconde classe (Systèmes techniques & interactions avec l'humain) et la quatrième classe (Systèmes socio-techniques structuré en réseau social d'agents) proposent des visions *anthropocentrées / centrées utilisateur* en cherchant, d'une part, à mettre en place des interfaces évoluées et, d'autre part, des structures sociales, dans le but de favoriser l'interaction d'objets artefact et des agents humains.

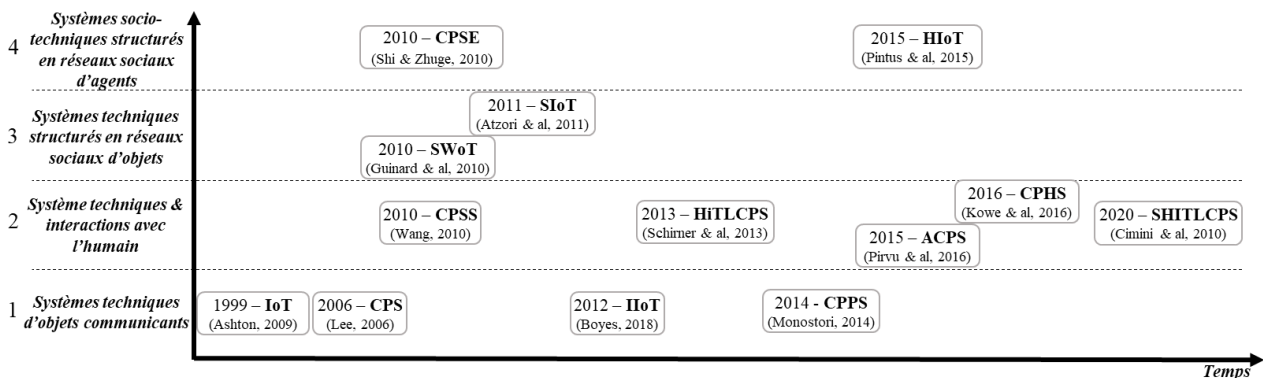


Fig.9 Evolution des paradigmes CPS & IoT entre 1999 et 2020

4 CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Nous avons établi que l'humain n'était pas suffisamment pris en compte lors de la conception des architectures de pilotage de systèmes manufacturiers, conduisant à des effets secondaires indésirables tels que l'« humain magique » et à des états de défaillance plus ou moins critiques. Ces considérations ont conduit au développement de nouvelles architectures. Celles-ci visent à améliorer l'intégration de l'humain par le biais de solutions techniques.

Parallèlement, l'idée de structurer l'IoT par des structures existantes de SNS et son développement a permis l'émergence de la notion de SIoT, liant les objets intelligents connectés grâce à une typologie de relations sociales.

Bien que dans sa conception, le SIoT exclut le facteur humain de son périmètre, il ouvre la voie au développement d'une structuration sociale des SMA. Ainsi, un SMA manufacturier peut être vu comme un système d'agents autonomes régis par des relations sociales permettant à notre avis une meilleure intégration de l'humain dans son environnement et une meilleure appropriation du système par ce dernier. Une telle structuration sociale est à la fois permise par les récentes avancées techniques telles que les SNS, les outils de l'intelligence artificielle, et également nécessaire à toutes ces avancées pour permettre leur bonne intégration au sein des structures actuelles.

REFERENCES

- Acatech. 2013. « Securing the Future of German Manufacturing Industry: Recommendations for Implementing the Strategic Initiative INDUSTRIE 4.0 - Final Report of the Industrie 4.0 Working Group ». Germany: German Academy of Science and Engineering.
- Ashton, Kevin. 2009. « That "Internet of Things" Thing ». *RFID Journal*, 1.
- Atzori, Luigi, Antonio Iera, et Giacomo Morabito. 2011. « SIoT: Giving a Social Structure to the Internet of Things ». *IEEE Communications Letters* 15 (11): 1193-95. <https://doi.org/10.1109/LCOMM.2011.090911.111340>.
- Atzori, Luigi, Antonio Iera, Giacomo Morabito, et Michele Nitti. 2012. « The Social Internet of Things (SIoT) – When Social Networks Meet the Internet of Things: Concept, Architecture and Network Characterization ». *Computer Networks* 56 (16): 3594-3608. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2012.07.010>.
- Bagheri, Behrad, et Jay Lee. 2015. « Big Future for Cyber-Physical Manufacturing Systems ». *Design World*. 23 septembre 2015. <https://www.designworldonline.com/big-future-for-cyber-physical-manufacturing-systems/>.
- Bidet-Mayer, Thibaut. 2016. « L'industrie du futur à travers le monde ». *Les Synthèses de La Fabrique*, n° 4 (mars).
- Bordel, Borja, Ramón Alcarria, Tomás Robles, et Diego Martín. 2017. « Cyber-Physical Systems: Extending Pervasive Sensing from Control Theory to the Internet of Things ». *Pervasive and Mobile Computing* 40 (septembre): 156-84. <https://doi.org/10.1016/j.pmcj.2017.06.011>.
- Boyd, Danah m., et Nicole B. Ellison. 2007. « Social Network Sites: Definition, History, and Scholarship ». *Journal of Computer-Mediated Communication* 13 (1): 210-30. <https://doi.org/10.1111/j.1083-6101.2007.00393.x>.
- Boyes, Hugh, Bil Hallaq, Joe Cunningham, et Tim Watson. 2018. « The Industrial Internet of Things (IIoT): An Analysis Framework ». *Computers in Industry* 101 (octobre): 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2018.04.015>.
- Cimini, Chiara, Fabiana Pirola, Roberto Pinto, et Sergio Cavaleri. 2020. « A Human-in-the-Loop Manufacturing Control Architecture for the next Generation of Production Systems ». *Journal of Manufacturing Systems* 54 (janvier): 258-71. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.01.002>.
- El Haouzi, Hind Bril. 2017. « Contribution à la conception et à l'évaluation des architectures de pilotage des systèmes de production adaptables: vers une approche anthropocentrée pour la simulation et le pilotage ». Habilitation à diriger des recherches, Université de Lorraine.
- Fiske, Alan P. 1992. « The Four Elementary Forms of Sociality: Framework for a Unified Theory of Social Relations ». *Psychological Review* 99 (4): 689-723.
- Flemisch, F., D. A. Abbink, M. Itoh, M.-P. Pacaux-Lemoine, et G. Weßel. 2019. « Joining the Blunt and the Pointy End of the Spear: Towards a Common Framework of Joint Action, Human-Machine Cooperation, Cooperative Guidance and Control, Shared, Traded and Supervisory Control ». *Cognition, Technology & Work* 21 (4): 555-68. <https://doi.org/10.1007/s10111-019-00576-1>.
- Guinard, Dominique, Mathias Fischer, et Vlad Trifa. 2010. « Sharing Using Social Networks in a Composable Web of Things ». In *2010 8th IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PERCOM Workshops)*, 702-7. Mannheim, Germany: IEEE. <https://doi.org/10.1109/PERCOMW.2010.5470524>.
- Haavik, Torgeir K. 2016. « Keep Your Coats on: Augmented Reality and Sensework in Surgery and Surgical Telemedicine ». *Cognition, Technolo-*

- gy & Work 18 (1): 175-91. <https://doi.org/10.1007/s10111-015-0353-z>.
- Habib, Lydia, Marie-Pierre Pacaux-Lemoine, et Patrick Millot. 2017. « Adaptation of the Level of Automation According to the Type of Cooperative Partner ». In *2017 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*, 864-69. Banff, AB: IEEE. <https://doi.org/10.1109/SMC.2017.8122718>.
- Hoc, Jean-Michel, et Marie-Pierre Lemoine. 1998. « Cognitive Evaluation of Human-Human and Human-Machine Cooperation Modes in Air Traffic Control ». *The International Journal of Aviation Psychology* 8 (1): 1-32. https://doi.org/10.1207/s15327108ijap0801_1.
- « Internet World Stats ». 2020. The Global Village Online. 2020. <https://www.internetworldstats.com/emarketing.htm>.
- « ISO 9241-210 ». 2019. <https://www.iso.org/cms/render/live/fr/sites/iso.org/contents/data/standard/07/75/77520.html>.
- Lee, Edward A. 2006. « Cyber-Physical Systems - Are Computing Foundations Adequate? » In , 10.
- Liu, Zhong, Dong-sheng Yang, Ding Wen, Wei-ming Zhang, et Wenji Mao. 2011. « Cyber-Physical-Social Systems for Command and Control ». *IEEE Intelligent Systems* 26 (4): 92-96. <https://doi.org/10.1109/MIS.2011.69>.
- Madakam, Somayya, R. Ramaswamy, et Siddharth Tripathi. 2015. « Internet of Things (IoT): A Literature Review ». *Journal of Computer and Communications* 03 (05): 164-73. <https://doi.org/10.4236/jcc.2015.35021>.
- Mala, D. Jeya, éd. 2019. *Integrating the Internet of Things Into Software Engineering Practices: Advances in Systems Analysis, Software Engineering, and High Performance Computing*. IGI Global. <https://doi.org/10.4018/978-1-5225-7790-4>.
- Mezgebe, Tsegay Tesfay, Guillaume Demesure, Hind Bril El Haouzi, Remi Pannequin, et Andre Thomas. 2019. « CoMM: A Consensus Algorithm for Multi-Agent-Based Manufacturing System to Deal with Perturbation ». *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 105 (9): 3911-26. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03820-0>.
- Monostori, László. 2014. « Cyber-Physical Production Systems: Roots, Expectations and R&D Challenges ». *Procedia CIRP* 17: 9-13. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.03.115>.
- Mouayni, I. El, G. Demesure, H. Bril-El Haouzi, P. Charpentier, et A. Siadat. 2019. « Jobs Scheduling within Industry 4.0 with Consideration of Worker's Fatigue and Reliability Using Greedy Randomized Adaptive Search Procedure ». *IFAC-PapersOnLine*, 14th IFAC Symposium on Analysis, Design, and Evaluation of Human Machine Systems HMS 2019, 52 (19): 85-90. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.12.114>.
- Pintus, Antonio, Davide Carboni, Alberto Serra, et Andrea Manchinu. 2015. « Humanizing the Internet of Things - Toward a Human-Centered Internet-and-Web of Things »: In *Proceedings of the 11th International Conference on Web Information Systems and Technologies*, 498-503. Lisbon, Portugal: SCITEPRESS - Science and Technology Publications. <https://doi.org/10.5220/0005475704980503>.
- Pirvu, Bogdan-Constantin, Constantin-Bala Zamfirescu, et Dominic Gorecky. 2016. « Engineering Insights from an Anthropocentric Cyber-Physical System: A Case Study for an Assembly Station ». *Mechatronics* 34 (mars): 147-59. <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2015.08.010>.
- Pokam, Raissa, Serge Debernard, Christine Chauvin, et Sabine Langlois. 2019. « Principles of Transparency for Autonomous Vehicles: First Results of an Experiment with an Augmented Reality Human-Machine Interface ». *Cognition, Technology & Work* 21 (4): 643-56. <https://doi.org/10.1007/s10111-019-00552-9>.
- Reason, James. 1990. *Human Error*. Cambridge University Press.
- Schirner, Gunar, Deniz Erdogmus, Kaushik Chowdhury, et Taskin Padir. 2013. « The Future of Human-in-the-Loop Cyber-Physical Systems », IEEE Computer Society, , janvier, 10.
- Shi, Xiaoqing, et Hai Zhuge. 2011. « Cyber Physical Socio Ecology ». *Concurrency and Computation: Practice and Experience* 23 (9): 972-84. <https://doi.org/10.1002/cpe.1625>.
- Sowe, Sulayman K., Eric Simmon, Koji Zettsu, Frederic de Vault, et Irena Bojanova. 2016. « Cyber-Physical-Human Systems: Putting People in the Loop ». *IT Professional* 18 (1): 10-13. <https://doi.org/10.1109/MITP.2016.14>.
- Summerskill, Steve, Russell Marshall, Keith Case, et A. Hussain. 2013. « An Inclusive Design Method for Addressing Human Variability and Work Performance Issues », janvier. https://repository.lboro.ac.uk/articles/An_inclusive_design_method_for_addressing_human_variability_and_work_performance_issues/9347066.
- Trentesaux, Damien, et Patrick Millot. 2016. « A Human-Centred Design to Break the Myth of the "Magic Human" in Intelligent Manufacturing Systems ». In *Service Orientation in Holonic and Multi-Agent Manufacturing*, édité par Theodor Borangiu, Damien Trentesaux, André Thomas, et Duncan McFarlane, 640:103-13. Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-30337-6_10.
- Vanderhaegen, F. 2019. « Pedagogical Learning Supports Based on Human-Systems Inclusion Applied to Rail Flow Control ». *Cognition, Tech-*

- nology & Work*, septembre.
<https://doi.org/10.1007/s10111-019-00602-2>.
- Wang, Fei-Yue. 2010. « The Emergence of Intelligent Enterprises: From CPS to CPSS ». *IEEE Intelligent Systems* 25 (4): 85-88.
<https://doi.org/10.1109/MIS.2010.104>.
- Zambrano Rey, Gabriel, Cyrille Pach, Nassima Aissani, Abdelghani Bekrar, Thierry Berger, et Damien Trentesaux. 2013. « The Control of Myopic Behavior in Semi-Heterarchical Production Systems: A Holonic Framework ». *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 26 (2): 800-817.
<https://doi.org/10.1016/j.engappai.2012.08.011>.