

Préface

André THOMAS

CRAN, Université de Lorraine, Nancy, France

L'histoire a montré que le développement de la connaissance et de la science n'est pas du tout linéaire. Ces dernières décennies ont vu encore (Galilée l'avait déjà fait) de nombreux scientifiques remettre en cause des idées admises par tous, comme certains physiciens (dont un prix Nobel¹) l'ont fait concernant le principe de ce qu'est l'Univers, le taxant d'une « fantasmagorie d'essence spirituelle ». Mais qu'importe ! Ce qu'il faut en retenir est que, sur le chemin de notre évolution, il y a toujours des jalons, des temps forts, soit marqués par des innovations de rupture retentissantes comme la naissance de certaines grandes théories, par exemple, soit par des ouvrages de synthèse s'appuyant sur des analyses et travaux de longue date. Cet ouvrage qui introduit notre futur industriel entre, je pense, dans cette catégorie. Pour autant nous ne sommes pas au bout du chemin, les ICPS (pour *Industrial Cyber Physical Systems*) – puisque c'est de cela dont il s'agit ici – seront à intégrer dans une économie alternative et symbiotique (au sens de Delannoy²) où êtres vivants, éléments naturels et objets communicants et intelligents vivront en harmonie et, par ailleurs, ils seront encore, j'en suis convaincu, aussi à remettre en cause et à reconcevoir lorsque notre communauté aura assimilé davantage tous les fondements de la physique moderne et de ses applications.

Il est communément admis que pour se projeter dans le futur il faut, d'une part, s'appuyer et comprendre son **passé** et son évolution et, d'autre part, adopter des démarches d'**innovation** laissant libre choix aux évolutions et aux ruptures. Traçons rapidement les grands traits de l'un et de l'autre.

1. Découverte de R. Penrose.

2. Delannoy, I. (2017). *L'économie symbiotique*. Actes Sud.

Le passé : après plus d'un siècle d'industrie, nous sommes passés de l'intelligence dans la tête et les mains de l'artisan à (pour caricaturer) la tête dans les bureaux et les mains spécialisées des opérateurs, puis enfin à la tête par des ordinateurs et les mains par des hommes et des objets cyber-physiques (robots, cobots, etc.) pour déjà et toujours le même objectif de fournir aux clients des produits de qualité à coûts et délais maîtrisés. L'idée était et reste bonne, mais sa première mise en œuvre dans des industries énormes et « bondées d'acteurs » le fut moins ! Le grand virage fut dans les années 1980 après la découverte que, finalement et quoi que l'on fasse, les problèmes apparaissaient tout au long des flux de composants et de produits ; il fallait donc le « suivre » de plus près pour y prendre des décisions et ainsi y apporter de l'intelligence. La première solution fut évidemment l'homme, acteur de cette intelligence décentralisée. En ne s'intéressant qu'au futur de nos industries (et non pas à la vie en général), nous constatons que bon nombre de tentatives d'élaboration de cahiers des charges fonctionnels de tels systèmes ont été faites. Que cherche-t-on finalement à faire ? Quel est le fonctionnement idéal d'une entreprise ? Revenons donc à la question posée dès le milieu des années 1980 par Goldratt et Cox³, « quel est le but d'une entreprise ? » La réponse donnée se résu-rait en « générer de l'argent par les ventes résultant de son activité ». Pour atteindre ce but, il y a deux voies évidentes : maximiser le produit financier généré par les ventes, d'une part, et limiter au maximum nécessaire les dépenses pour ce faire, d'autre part. Donc limiter ce que d'autres ont appelé « les gaspillages ». La recherche de ces gaspillages et de leurs origines a conduit à mettre en évidence toute l'importance du « contrôle des flux physiques et des activités inhérentes à ceux-ci », en particulier en s'appuyant sur la démonstration que Plossl⁴ a faite de l'impact de la désynchronisation de ces flux physiques avec les flux d'informations nécessaires à leur contrôle. Par ailleurs, l'expérience a aussi validé les propositions initialement faites par les créateurs de nos systèmes d'aide à la décision (Orlicky, Plossl), à savoir que la direction et le pilotage d'une usine ou d'une chaîne logistique doivent se faire avec plusieurs niveaux d'horizon et de granularité pour assurer une bonne anticipation et de bonnes décisions. Ainsi sont nés d'abord des systèmes hiérarchisés (les seuls que l'on pouvait concrétiser dans les années 1960), puis des systèmes de plus en plus hétérarchiques et distribués (dès que la technologie et l'informatique ont permis de les mettre en œuvre). Aussi et en conséquence, c'est d'abord l'homme qui a constitué le vecteur d'intelligence dans les systèmes physiques et, petit à petit, les systèmes mécatroniques l'ont aidé à le faire, voire l'ont supplanté. Aujourd'hui, la technologie, les robots logiciels, les robots physiques, les AGV⁵, les senseurs et capteurs sont de plus en plus nombreux et couvrent de plus en plus de fonctionnalités, que nous en sommes à réfléchir à la façon de ne pas exclure l'homme

3. Goldratt, E.-M., Cox, J. (1984). *Le but*. AFNOR Gestion.

4. Plossl, G.W. (1993). *La nouvelle donne de la gestion de production*. AFNOR Gestion.

5. *Automatic Guided Vehicle*.

de ces systèmes ! L'expérience des années 1980 avec le CIM⁶ fut « malheureuse » et, pourtant, quantité de soi-disant visionnaires de l'époque assuraient que le futur serait fait d'usines sans hommes. Il y a eu de telles usines, j'ai eu moi-même l'occasion d'en visiter, mais elles ont vite montré leurs limites ! Comme toujours dans ces cas d'extrême « rationalisation », ces solutions ont fait leurs preuves uniquement dans un mode de fonctionnement stabilisé et « idéal », tout dysfonctionnement, tout « mode dégradé » induisaient de gros problèmes et des surcoûts qui finalement ont tué le rêve ! Aujourd'hui nous nous posons beaucoup plus de questions sur le devenir des acteurs humains dans ces nouvelles « sociétés et industries cyber-x » : quels vont être leurs rôles, quels sont les problèmes d'éthique sous-jacents (même si, à ce jour, notons-le quand même, les études existantes sur ces sujets ne se limitent – ou plutôt ne font référence – qu'à notre « mode de pensée occidentale » !).

Deux voies d'innovation : innovation d'évolution, un prolongement plus ou moins cohérent du chemin parcouru du passé au présent et **innovation de rupture** qui, certes, doit s'appuyer sur les faiblesses et les manquements des solutions existantes, mais qui part de la feuille blanche pour proposer des approches et outils nouveaux « fonctionnellement raisonnables ».

Rares sont les gens qui inventent par un saut technologique ou conceptuel dans un domaine inconnu d'eux ! L'informatique, restant encore durant toutes ces années de transition, mal connue, c'est donc l'évolution et surtout la vitesse d'évolution des systèmes informatiques qui ont régulé le développement des solutions de « modernisation » de la vie et des industries en particulier. Les innovations des systèmes automatiques et informatiques dans l'industrie ont suivi celles des technologies électroniques et des algorithmes, et c'est souvent pas à pas et par « essais-erreurs » que ces innovations ont vu le jour (gardons en mémoire, par exemple, le cas du minitel !).

Pour autant certaines innovations ont été très significatives et ont permis des « sauts en avant » considérables. Citons, bien sûr, Internet (qui se rappelle aujourd'hui de ce qu'était TRANSPAC ?). Citons encore les systèmes de type RFID⁷ et surtout leur miniaturisation. Notons que ces deux exemples d'innovation sont relatifs au domaine de la communication. Exploiter davantage les « données terrains », distribuer l'intelligence au plus près de là où elle est utile (dans le temps et l'espace) ne peuvent être envisagés que

6. Koren, Y. (1983). *Computer Control of Manufacturing Systems*. McGraw Hill Inc. Waldner, J.-B. (1990). *CIM, les nouvelles perspectives de la production*. Dunod-Bordas. Dorf, R.C., Kusiak, A. (1994). *Handbook of Design, Manufacturing, and Automation*. John Wiley & Sons. Vernadat, F. (1996). *Enterprise Modeling and Integration*. Springer Libri.

7. *Radio Frequency Identification*. Stockman, H. (1948). Communication by means of reflected power. *Proc. IRE*, 36(10). Hunt, D.V. (2007). *RFID: A guide to radio frequency identification*. John Wiley & Sons.

par des systèmes communicants de nouvelle génération, sans fil évidemment, en temps réel et avec de gros débits !

Aussi des méthodes sophistiquées ont été développées et ont vu le jour pour aider et supporter ces processus d'innovation. Les plus marquantes dans ces dernières décennies ont incontestablement été les approches de « management par la valeur » et « l'ingénierie système ».

Cet **ouvrage de synthèse** montre l'évolution, décrit le point de vue de chercheurs et finalement « plante le décor » actuel des ICPS, sans s'intéresser à la technologie inhérente et à ses développements. Il nous montre le futur de nos industries et les différentes innovations passées, en cours et se dessinant dans notre avenir proche. Il nous présente en premier lieu le concept de systèmes cyber-physiques à partir d'un regard historique sur l'évolution de notre société et de nos industries. La question à débattre encore reste « pourquoi notre société en a-t-elle eu besoin » ? Divers éléments de réponse viennent à l'esprit tels que l'augmentation de la vitesse d'exécution des activités ou des nécessaires prises de décision, ou l'augmentation de la dimension des systèmes ainsi que de leur complexité, ou encore l'augmentation de la globalisation des problèmes, etc., et finalement la volonté d'y laisser les hommes comme acteurs importants pour décrire ensuite ce domaine crucial qu'est celui des données. Comment capter et distribuer « l'information terrain » ; en effet, sans données récentes et pertinentes aucune analyse, aucune mesure, aucune modélisation, aucune décision ne peuvent être envisagées. Il traitera par la suite de l'évolution des « produits intelligents », de la digitalisation de l'information et de celle desdits systèmes, puis du problème lui aussi crucial de leur pilotage, de leur contrôle et de leur interaction (ou intégration) avec l'humain. L'essence même de l'intelligence partagée avec la partie relative à leur apprentissage, les solutions d'intelligence artificielle actuelles, s'appuient sur deux piliers qui sont l'apprentissage et les algorithmes. Un regard sera aussi donné sur leurs apports potentiels à nos entreprises et systèmes logistiques ainsi que sur leurs probables futur et évolutions. Les dernières parties de l'ouvrage abordent les conséquences et impacts de tels systèmes sur l'industrie, ainsi que les problèmes et aspects éthiques et juridiques liés aux ICPS. Cet ouvrage est ainsi structuré en chapitres et parties dont nous trouverons la description au chapitre 1.

Aussi, cet ouvrage coordonné par O. Cardin, W. Derigent et D. Trentesaux arrive au bon moment et, s'appuyant sur les résultats d'un groupe de réflexion qui a débuté ses travaux depuis plusieurs décennies, il nous offre un regard avisé de spécialistes, acteurs de la recherche sur ce sujet, sur ces systèmes (ICPS) qui marquent déjà et qui vont marquer encore de façon importante les années à venir.

Introduction

Olivier CARDIN¹, William DERIGENT² et Damien TRENTESAUX³

¹ LS2N, Nantes Université, IUT de Nantes, Nantes, France

² CRAN, Université de Lorraine, Nancy, France

³ LAMIH, Université polytechnique Hauts-de-France, Valenciennes, France

De par ses caractéristiques d’adaptabilité et de robustesse, les systèmes cyber-physiques (CPS) s’imposent de plus en plus comme une voie d’avenir pour l’évolution industrielle et gagne de plus en plus de crédit, à la fois auprès des académiques et des industriels. Toutefois, le constat doit être fait, qu’à l’heure actuelle, cette notion est souvent mal comprise, mal interprétée ou appliquée de manière trop restrictive. Cet ouvrage a pour vocation d’éclaircir, de manière pédagogique, les zones d’ombre pouvant entourer ce concept et de fournir les principales clés de compréhension et d’illustration au lecteur souhaitant approfondir ses connaissances du domaine. Six raisons majeures peuvent être décrites pour expliquer cette incompréhension – autant de raisons qui structureront la lecture de cet ouvrage.

La première raison à laquelle cet ouvrage tente de fournir des clés de compréhension peut se résumer en un problème de terminologie, aussi vaste que la notion elle-même. Dans cet ouvrage, nous avons pris le parti de parler indifféremment de systèmes industriels cyber-physiques et de systèmes industriels cyber-physiques (notés ICPS) lorsque nous mentionnons l’application de CPS dans le domaine industriel afin d’en simplifier la lecture. Au fil de cet ouvrage, de nouvelles terminologies (CPES, CPLS, CPPS, etc.), permettant de préciser le domaine d’application au sein du champ industriel, apparaissent néanmoins ponctuellement, afin de fournir au lecteur une vision la plus large possible des concepts manipulés par chaque domaine d’activité. *A contrario*, nous n’évoquons

que très peu les autres appellations classiques (parmi lesquelles l'industrie 4.0 ou l'industrie du futur sont probablement les plus emblématiques) qui représentent souvent un objectif plus global, moins centré sur la notion applicative proposée par les ICPS.

La seconde raison tient probablement au caractère disruptif de ce concept, qui modifie en profondeur la manière dont doivent être perçus les systèmes industriels. L'ouvrage, par son chapitre 1, commence donc par une définition claire du concept, qui sert de base à l'ensemble des développements suivants. Nous insistons notamment sur la constitution de la frontière entre les mondes physique et cyber, qui cristallise les différences entre les systèmes classiques et les ICPS. Ce nouveau point de vue s'accompagne de plus d'objectifs et de contraintes renouvelées, s'orientant véritablement vers un développement durable pragmatique et efficace que le chapitre 2 prend le temps d'expliquer en détail.

Une troisième raison tient probablement également du fait que ce concept profite pleinement des nouvelles technologies apparaissant sur le marché, et permettant de l'implémenter de manière efficace sur le terrain. Ces nouvelles technologies amènent de nombreuses ruptures dans la manière de concevoir les systèmes industriels :

- sur le plan des flux d'informations mis en place entre les différents acteurs décisionnaires du système (chapitre 3), et tout au long du cycle de vie du produit industriel (chapitre 4) ;
- sur le plan de la virtualisation des éléments du système et de son système d'information (chapitre 5), avec toutes les problématiques de cybersécurité associées (chapitre 6) ;
- sur l'autonomie de décision laissée aux systèmes de pilotage, *via* des systèmes multi-agents (chapitre 7), supports d'architectures de contrôle permettant l'adaptabilité recherchée au sein des ICPS (chapitre 8) ;
- sur le plan de la prise de décision, notamment *via* l'intégration d'outils d'intelligence artificielle dans les boucles de décision (chapitre 9).

Outre la technologie, le facteur humain, essentiel à ce type de vision, participe également à l'évolution industrielle, en reprenant la place où ses caractéristiques sont les plus performantes. Le chapitre 10 présente sur ce thème un point de vue souvent oublié de la transformation industrielle, et qui permettra à l'exploitant de mieux répartir les compétences et responsabilités au sein de son appareil industriel.

Une quatrième raison réside également souvent dans la difficulté de projeter ces concepts sur son propre domaine d'activité, et ainsi projeter la trajectoire d'évolution à suivre afin de transformer son propre système. Cet ouvrage a volontairement été rédigé

dans ses premières parties en étant le plus générique possible, afin de parler au plus grand nombre. Dans un second temps, les chapitres 11 à 15 mettent en lumière quelques-uns des secteurs d'activité dans lesquels l'application des ICPS a déjà ou va bientôt proposer des évolutions majeures. Ces chapitres ont notamment vocation à permettre aux étudiants de découvrir ces différents champs d'application et à en appréhender les spécificités autant que les similitudes. Ils constituent des points d'entrée sur ces champs d'application des ICPS, en fournissant les clés permettant de comprendre les tenants et les aboutissants et en illustrant par des exemples concrets les gains potentiels.

Une cinquième raison se matérialise généralement par une autocensure liée à des méconnaissances sur les problèmes d'éthique ou de responsabilités dans l'utilisation de concepts aussi disruptifs. Le chapitre 16 a pour objectif de présenter une réflexion pluridisciplinaire sur la direction que prennent les travaux relatifs à ces deux aspects. Ce chapitre sera particulièrement intéressant dans le cadre d'une application directe en industrie, en montrant l'ensemble des facettes éthiques et réglementaires à appréhender.

Enfin, une dernière raison qui est généralement identifiée concerne la formation des collaborateurs. Mettre en œuvre un ICPS nécessite généralement un large champ de compétences, généralement pluridisciplinaires. Actuellement, il est ainsi non seulement très difficile de recruter des collaborateurs ayant ce profil, mais le constat est que les nouveaux diplômés n'ont également que très rarement le champ de compétences recherchées. Le chapitre 17 de cet ouvrage propose un retour d'expérience et un ensemble de bonnes pratiques permettant d'envisager la création de cursus de formation, à la fois aux niveaux licence ou master.

Afin d'enrichir et renouveler la lecture de cet ouvrage, nous invitons le lecteur à consulter le site web de cet ouvrage (<https://industrial-cps.net>). Le lecteur y aura accès à des informations complémentaires sur chacun des chapitres et pourra contribuer à leur enrichissement, de manière communautaire.

Une large majorité des chapitres de cet ouvrage représente l'aboutissement de plus de dix ans d'étude du groupe de travail IMS² (*Intelligent Manufacturing Systems and Services*) du groupe de recherche français MACS (Modélisation, analyse et commande des systèmes) du CNRS. Depuis 2018, la réponse du groupe à ces problématiques s'est également matérialisée par l'organisation d'une école d'hiver annuelle, ayant petit à petit eu un écho international. Dans le prolongement de cette formation, il a semblé opportun de proposer aux doctorants et étudiants de master un ouvrage de référence centré sur l'application des CPS au monde industriel. Par extension, cet ouvrage se révélera également précieux pour un ingénieur désireux d'approfondir sa maîtrise du concept afin d'en déterminer la meilleure mise en œuvre sur son cas d'application, pour un

chercheur confirmé cherchant à élargir son champ d'expertise en s'ouvrant à ce nouveau champ applicatif ou pour un responsable de formation cherchant à étoffer son offre de formation sur la thématique de l'évolution industrielle. Que vous soyez dans l'une de ces catégories, ou plus simplement que vous ayez ouvert cet ouvrage par curiosité scientifique, nous espérons que sa lecture vous sera à la fois agréable et instructive.