



HAL
open science

Logiciel et Industrie du Futur

Jean-Christophe Bach, Antoine Beugnard, Hugo Bruneliere, Hélène Coullon,
Fabien Lehuédé, Guillaume Massonnet, Jacques Noy e, Gilles Simonin

► **To cite this version:**

Jean-Christophe Bach, Antoine Beugnard, Hugo Bruneliere, Hélène Coullon, Fabien Lehuédé, et al.. Logiciel et Industrie du Futur. Presse des Mines, pp.62, 2019, Mathématiques et Informatique, 9782356715760. hal-02299214

HAL Id: hal-02299214

<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02299214>

Submitted on 27 Sep 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, publi es ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou priv es.

Logiciel et Industrie du Futur

Jean-Christophe Bach, Antoine Beugnard, Hugo Bruneliere, Hélène Coullon,
Fabien Lehuédé, Guillaume Massonnet, Jacques Noy e, Gilles Simonin

27 septembre 2019

Table des matières

1	Préface	1
2	Introduction	3
3	Les usines intelligentes	5
3.1	évolution des moyens de production	6
3.2	La place des données	8
3.3	L'Intelligence Artificielle et le nouveau rôle à jouer des acteurs humains	9
4	Le jumeau numérique ou « digital twin »	11
4.1	Qu'est-ce qu'un jumeau numérique?	11
4.2	Qu'est-il attendu du jumeau numérique?	13
4.3	Discussion	15
5	La qualité et la cybersécurité	16
5.1	Cybersécurité	16
5.2	Discussion	17
6	Le <i>Cloud Manufacturing</i>	19
6.1	Qu'est-ce que le <i>Cloud Manufacturing</i> ?	19
6.2	<i>Cloud</i> d'imprimantes 3D	21
6.3	Reconfiguration de lignes de production et d'assemblage	22
6.4	Discussion	23
7	Conclusion	23

1 Préface

Nous sommes des chercheurs dans différents domaines de l'informatique et sommes tous intéressés, pour diverses raisons, par le domaine de l'Industrie du Futur (IdF). Lors de nos recherches bibliographiques, de nos discussions et de

nos échanges avec des industriels et des chercheurs d’autres domaines nous avons été étonnés par l’absence d’une vision architecturale comparable à celle que les experts de grands systèmes logiciels peuvent être amenés à développer et maintenir sur de longues périodes. Partant de ce constat, nous avons organisé un atelier de travail sur la place du logiciel dans l’IdF intitulé aLIFE pour « apport de l’industrie du Logiciel à l’Industrie du Futur Européenne ». L’objectif de cet atelier était double. Nous souhaitions tout d’abord avoir des retours d’expériences sur l’IdF en général, que ce soit dans le milieu académique ou industriel. De plus, nous souhaitions, au travers de discussions, évoquer des thèmes précis que nous avons identifiés au préalable. L’événement a suscité un intérêt auprès des acteurs académiques, des PME et des grand groupes suivants (par ordre alphabétique) :

- Airbus (<https://www.airbus.com/>), avec l’intervention de Hervé Riou ;
- Baldwin Partners (<https://www.baldwin-partners.com/>), avec l’intervention de Benjamin Vilain ;
- Comau (<http://www.comau.com/EN>), avec l’intervention de Massimo Ippolito ;
- Dassault Systèmes (<https://www.3ds.com/>), avec l’intervention de Xavier Fouger ;
- e.l.m. leblanc (<https://www.elmleblanc.fr/>), avec l’intervention d’Emmanuel Bricard ;
- Fraunhofer (<https://www.fraunhofer.de/>), avec l’intervention de Manfred Dangelmaier ;
- la *Kungliga Tekniska Högskolan* (KTH) (<https://www.kth.se/en>), avec l’intervention de Lihui Wang ;
- La Poste (<https://www.groupelaposte.com/>), avec l’intervention d’Alain Roset ;
- Naval Group (<https://www.naval-group.com/fr/>), avec l’intervention de Christian Le Gac ;
- Polytechnique Montréal (<https://www.polymtl.ca/>), avec l’intervention de Robert Pellerin ;
- Predict (<https://en.predict.fr/>), avec l’intervention de Flavien Peysson ;
- la *Technische Universität München* (TUM) (<https://www.tum.de/en/homepage/>), avec l’intervention de Stephan Minner.

Lors des sessions plénières, les intervenants ont abordé un ensemble de sujets variés autour de l’Industrie du Futur, comme par exemple : l’utilisation des données pour la maintenabilité et la prédiction de pannes, la robotisation et l’utilisation du *Cloud Computing* et du *Edge Computing* pour mettre plus d’intelligence dans les usines, le *Cloud Manufacturing* et les systèmes cyber-physiques, des solutions de réalité augmentée, de l’aide à la décision pour la logistique, l’humain dans l’IdF, etc. Ces intervenants ont également participé activement à quatre tables rondes ayant pour objectif d’échanger autour des thématiques suivantes :

- *Smart Factories : smart enough ?* : Quelle est la place actuelle de l’intelligence des machines dans l’industrie, aujourd’hui et dans le futur ?

- *Twisting the digital twin* : Que se cache-t-il derrière le terme de « jumeau numérique », de plus en plus présent lorsque l’IdF est évoquée ?
- *Quality and cyber-security : no joking!* : Quel est le degré d’importance de la qualité et de la sécurité dans l’IdF ?
- *Cloud Manufacturing : what do you mean ?* : Qu’est-ce-que le *Cloud Manufacturing* ?

Cet ouvrage n’a pas pour vocation à revenir sur les interventions des orateurs, à destination du public de l’événement aLIFE. Il présente en revanche le fruit de notre réflexion et de notre prise de recul sur l’Industrie du Futur suite à cet événement.

2 Introduction

En l’espace de quelques années, préparer l’Industrie du Futur est devenu l’un des enjeux majeurs des entreprises et territoires industrialisés avec une attention particulière accordée à la transition numérique. En effet, le contexte actuel de notre société tend à donner une place de plus en plus importante au « numérique » (il n’y en avait pas si longtemps, on aurait dit à l’informatique). Initialement cantonné au sein d’ordinateurs isolés, puis connectés, le numérique s’intègre désormais dans un nombre de plus en plus grand d’objets physiques de notre quotidien. Cela est notamment rendu possible par la miniaturisation et la mise au point de dispositifs d’interaction, capteurs et actuators, adaptés. Par conséquent, de vastes réseaux d’applications logicielles et de capteurs produisent une masse croissante de données, relativement fiables et structurées. Celles-ci deviennent alors des sources d’information incontournables pour la prise de décision et l’optimisation. De nombreux traitements et analyses peuvent ainsi être alimentés ou réalisés automatiquement par des algorithmes modernes d’intelligence artificielle (par exemple).

Un tel changement dans notre société a évidemment un impact fort sur l’industrie. Ainsi, l’Industrie du Futur s’intègre dans ce contexte général de numérisation, et de nombreux gouvernements y voient un facteur possible de relance ou de maintien de la compétitivité et de la rentabilité des industries. L’ouverture à la concurrence a également encouragé différents pays à mettre en place un ensemble de plans stratégiques nationaux et internationaux sur ce thème :

- l’Australie¹ ;
- la Chine avec le plan « Made in China 2025 »² ;
- la République Tchèque³ ;
- la France avec le plan « Industrie du Futur »⁴ ;

1. <https://www.standards.org.au/getmedia/29653164-cd4d-43f0-9afc-e8db58710f2e/Industry-4-0-Recommendations-Report.pdf.aspx>

2. http://english.gov.cn/premier/news/2015/03/25/content_281475077518617.htm
and http://www.europeanchamber.com.cn/en/upcoming-events/11057/_Made_in_China_2025_China_s_answer_to_Industry_4.0

3. <https://www.ncp40.cz/files/industry-40-web.pdf>

4. <https://www.economie.gouv.fr/lancement-seconde-phase-nouvelle-france-industrielle>

- l'Allemagne avec le plan « Platform Industrie 4.0 »⁵ ;
- le Japon⁶ ;
- les USA avec le plan « Advanced Manufacturing Partnership »⁷.

Les définitions données à l'Industrie du Futur sont multiples et divergent parfois d'un pays ou d'une institution à une autre. Cet ouvrage vise à présenter l'analyse et la vision de chercheurs français travaillant dans plusieurs domaines scientifiques en lien avec l'informatique. À travers nos différentes lectures et sessions de réflexion, à travers également nos discussions autour de l'Industrie du Futur avec des industriels et des chercheurs d'autres domaines, il apparaît que les *données* fournissent la matière première de l'Industrie du Futur.

Nous pensons donc que derrière le terme *Industrie du Futur* se cache trois grandes problématiques :

- Comment acquérir ou collecter des données utiles à l'industrie ?
- Comment organiser, échanger et stocker ces données de manière sécurisée ?
- Comment utiliser ou mettre à profit ces données dans le contexte industriel visé, avec quel(s) moyen(s) technique(s) et dans quel cadre (par exemple légal) ?

Très souvent, les discussions autour de l'Industrie du Futur se focalisent davantage sur le troisième point évoqué ci-dessus. Pourtant, sans une collecte des bonnes informations et sans savoir comment organiser ces données, leur utilisation devient difficile. Pour un informaticien, et en particulier pour un ingénieur du logiciel, ces trois questions sont étroitement liées et il semble compliqué de répondre à l'une d'elle sans répondre aux deux autres. Par exemple, savoir comment utiliser ces données pourrait permettre de déduire comment les collecter correctement. Cependant, il est tout aussi important de connaître les moyens d'acquisition disponibles pour déterminer précisément les traitements possibles et/ou nécessaires (pour garantir la qualité des données, par exemple). De même, en fonction de la façon dont les données sont organisées, certains traitements seront facilités alors que d'autres seront rendus plus difficiles. Il est donc primordial, de notre point de vue, de comprendre le problème dans son ensemble afin d'y répondre de façon fiable et durable.

Nous convenons toutefois que, pour imaginer l'Industrie du Futur, il semble plus aisé de mettre l'accent sur l'utilisation des données dans un premier temps. Il n'y a pas de limites à cette question hormis peut-être celles de notre imagination. En effet, à partir du moment où les moyens techniques nécessaires sont disponibles pour collecter et organiser ces données, il est sans doute possible de traiter celles-ci (bien que parfois le coût puisse être élevé ou que des avancées techniques ou conceptuelles soient encore nécessaires). Nous pouvons par exemple relever diverses propositions telles que :

- l'introspection et la surveillance des systèmes industriels, par exemple à l'aide de tableaux de bord ;

5. <https://www.plattform-i40.de/I40/Navigation/EN/Home/home.html>

6. <http://www.cnc-communications.com/blog/japan-launches-industry-4-0-initiative/>

7. <https://obamawhitehouse.archives.gov/the-press-office/2011/06/24/president-obama-launches-advanced-manufacturing-partnership>

- la collecte de données des produits en activité pour faire de la maintenance prédictive ;
- la simulation, l’optimisation et l’aide à la décision, par exemple pour maximiser les gains ou minimiser la consommation énergétique ou la production de déchets ;
- l’utilisation de l’intelligence artificielle dans les différents procédés robotiques ou de production ;
- le support aux employés par la réalité augmentée ou virtuelle, ou encore par l’utilisation d’exosquelettes ;
- la sécurité de l’humain et des systèmes informatiques (intrusions, évacuations, confinements, réaction automatique à une attaque informatique, etc.).

L’Usine du Futur comporte donc un ensemble de briques logicielles complexes très interconnectées et mérite une vision globale et systémique. Cependant, les approches pour l’Industrie du Futur (IdF) que nous avons rencontrées au cours de nos recherches nous ont semblé très pragmatiques et spécialisées. Elles partent généralement d’un domaine métier particulier et y intègrent une dimension numérique. En revanche, nous n’avons pas réussi à dégager de la littérature sur l’IdF une vision architecturale comparable à celles que les experts de grands systèmes logiciels ont pu développer et maintenir sur de longues périodes [2].

C’est suite à ce constat que nous avons organisé l’événement aLIFE. Cet ouvrage n’a pas pour vocation à revenir sur les interventions des orateurs, mais plutôt de présenter le fruit de notre réflexion et de notre prise de recul sur l’Industrie du Futur. Toutefois, pour appuyer les arguments mis en avant dans ce document, nous avons décidé d’organiser son contenu autour des quatre thématiques abordées lors des tables rondes de aLIFE. Ainsi, la première partie présente notre vision de l’usine intelligente. La seconde partie expose notre compréhension de la notion de jumeau numérique ou Digital Twin et des besoins associés d’un point de vue logiciel. La troisième partie évoque les problématiques de qualité et de sûreté dans l’industrie du futur. Enfin, la quatrième partie développe une analyse du *Cloud Manufacturing*.

3 Les usines intelligentes

Parmi les concepts récurrents qui entourent la définition de l’Industrie du Futur, le terme *Smart Factories* fait référence à la combinaison de systèmes cyber-physiques et de nouvelles technologies numériques pour transformer les processus de production, depuis la conception des machines jusqu’à la gestion logistique des flux physiques [44, 46]. Cette transition vient notamment répondre à une redéfinition des exigences clients, avec des besoins toujours plus spécialisés et différenciés dans des délais toujours plus courts. Les entités de production doivent donc rendre possible cette « personnalisation de masse » [22, 15] en permettant à la fois de densifier et de diversifier les flux de produits.

L’approche traditionnelle associant un produit spécifique à une unique ligne devient de fait caduque et on tend vers une approche globale, intelligente et

réactive des opérations de production [50]. Les nouvelles usines cherchent ainsi à mieux contrôler et optimiser leurs processus en introduisant des technologies innovantes, qui leur permettent par exemple de :

- contrôler et réaliser des opérations de maintenance de façon automatisée afin de maximiser la disponibilité de leurs équipements de production ;
- collecter et analyser efficacement des données pour obtenir des informations précises sur leur niveau de performance et les goulots d'étranglement ;
- connecter en temps-réel individus, capteurs et systèmes physiques en un réseau communiquant et réactif pour en adapter la configuration face aux aléas.

Malgré les possibilités offertes par la numérisation des lignes de production, la diversification des tâches couplée aux problématiques de coordination ont rendu la gestion de ces systèmes significativement plus complexe. La quantité de données à traiter, les possibilités de paramétrages des équipements et la décentralisation des prises de décision sont autant de challenges pour l'optimisation des nouveaux systèmes de production. Des technologies de pointe telles que la réalité virtuelle, les machines connectées et reconfigurables ou les algorithmes d'apprentissage sont donc mis en place pour soutenir les responsables de production, qui font face à une évolution rapide des méthodes de travail. Toutefois, et bien que ces technologies soient pour la plupart déjà incorporées au processus de production, le manque de recul et de définition des bonnes pratiques laissent encore une marge d'amélioration significative pour les intégrer au mieux et ainsi en retirer tous les bénéfices en matière de performance ou d'économies.

3.1 Évolution des moyens de production

Le phénomène de « personnalisation de masse », c'est-à-dire la généralisation de demandes de plus en plus spécialisées, ont conduit les entreprises manufacturières à se doter de systèmes de production plus réactifs et flexibles [25, 35]. Cette nouvelle approche explique en partie l'émergence de machines reconfigurables à même de mener des opérations de différentes natures, nécessitant plusieurs outils spécifiques, sur un même produit. En pratique, cela permet à une même ligne de production de planifier plusieurs séquences d'opérations en fonction de la configuration de ses postes de travail et ainsi d'élargir son champ d'action. De telles machines permettent en outre d'effectuer certaines opérations de maintenance sans pour autant stopper la production, en adaptant dynamiquement sa séquence de production afin de ne pas solliciter l'outil concerné par le contrôle ou la réparation en cours. Bien que les atouts présentés par ces nouvelles technologies soient indéniables, cette multiplicité de combinaisons d'actions rend difficile l'optimisation de ce type de lignes de production et la planification des séquences d'opérations à mener. Il semble donc nécessaire d'accompagner l'introduction de ces nouveaux systèmes dans les usines par des logiciels d'aide à la décision appropriés, qui permettent aux industriels d'en tirer le meilleur parti.

Cette évolution des moyens de production et le besoin croissant en terme de réactivité sont accompagnés par l'apparition massive de capteurs au sein

des ateliers. Ils permettent de collecter des données en temps réel pendant les opérations de production. En pratique, on constate que la nature et l'utilisation des mesures collectées varie fortement d'un environnement à un autre. La plupart du temps, leur combinaison permet de superviser les caractéristiques physiques du système (température, pression, vibrations) ou de calculer des indicateurs de performance sur la fréquence de production, la qualité des produits en entrée (matières premières ou produits semi-finis) ou en sortie d'atelier. Cela permet entre autre aux responsables de lignes, voire à la machine elle-même, de repérer les faiblesses matérielles potentielles ou les goulots d'étranglement du processus de production, dans l'optique d'une amélioration globale des performances du système. On voit ainsi apparaître de nouveaux logiciels qui tirent partie de la multiplication des données disponibles grâce à l'introduction de ces capteurs. Un des exemples les plus éloquents de cette évolution concerne les nouveaux logiciels d'aide à la planification de maintenance, qui facilitent la transition d'une politique statique d'intervention corrective ou préventive vers une approche réactive, basée sur des modèles prévisionnels de défaillance. Une supervision en temps réel de plus en plus précise permet ainsi à certaines entreprises d'implémenter efficacement des approches de maintenance proactive et d'en mesurer clairement l'impact sur la disponibilité de leurs matériels [23, 38]. Cette démarche conduit également à une meilleure intégration des opérations de maintenance au planning de production et améliore ainsi significativement l'efficacité et les périodes de bon fonctionnement des lignes de production, entraînant de fait des économies d'argent et d'énergie non négligeables.

En extrapolant cette évolution des systèmes vers plus d'autonomie et d'auto-supervision, on peut anticiper des usines du futur dans lesquelles les machines ont elles-mêmes accès aux données récoltées par les capteurs pour adapter et planifier au mieux leurs propres opérations (commandes de pièces ou de matières premières, changement d'outil, intervention de maintenance, etc.) et ainsi optimiser leur contribution au processus de production. La vision de certaines entreprises va même encore plus loin, puisque certaines avancent la possibilité d'introduire des robots mobiles et connectés au sein de l'atelier, capables de soutenir les activités des autres machines. Ceux-ci pourraient par exemple permettre de transporter des matières premières ou des pièces détachées d'un poste à un autre, réparer des machines à la suite de pannes ou effectuer certaines opérations de production en différents endroits du site. Il faut noter que ce type d'atelier ne saurait se concrétiser dans le futur sans une excellente réactivité de ces différentes composantes afin d'assurer une bonne synchronisation entre les différentes tâches en jeu. Cependant, cette transition pourrait avoir lieu plus tôt que nous ne l'imaginons et on constate en pratique que certaines lignes de production intègrent déjà leur lot de robots autonomes ou commandés à distance afin d'automatiser une bonne partie du processus de production. On remarque en outre une forte hétérogénéité dans l'intégration de ces différentes technologies entre les industries. En particulier, bon nombre d'industries dans les domaines de la microélectronique, de l'automobile ou du commerce en ligne sont nettement plus matures sur ces points que la plupart des industries de production dites « lourde » telles que l'aéronautique ou le secteur naval. Dans ce contexte,

la qualité des logiciels sur lesquels s'appuient de tels systèmes est cruciale. En effet, les algorithmes d'optimisation qui calculent les décisions de cette multitude d'objets connectés devront également être supportés par des solutions logicielles adéquates pour assurer une communication fiable et rapide au sein du réseau.

3.2 La place des données

Aujourd'hui omniprésentes tout au long de la chaîne de production, les données sont devenues un sujet central de la transformation numérique des usines [34, 30, 27]. L'émergence du concept de *Cloud* offre aux industriels une capacité de stockage et de calcul qui repousse les restrictions auparavant imposées par les limites physiques de leurs systèmes informatiques respectifs. Cette nouvelle approche permet ainsi de déporter la majorité des tâches de stockage et de calcul associées au traitement des informations sur des supports distants opérés par des tiers. Le développement de solutions de ce type apporte une réponse pratique à l'augmentation du volume de données produites [26] et s'accompagne d'une multiplication des solutions logicielles à l'interface entre les informations collectées sur le terrain et le cloud.

Les informations collectées par les capteurs ou par les opérateurs au sein de l'usine peuvent par exemple être stockées et analysées dans le cloud afin de fournir des indicateurs de performances globaux du système ou d'alimenter des modèles de simulation pour anticiper de façon pertinente les risques de défaillance et de sécurité. La vision « cloud » s'avère également particulièrement pertinente si on envisage l'intégration dans l'atelier de systèmes cyber-physiques mobiles, connectés et intelligents, capables de décisions de bas niveau dans le processus de production [10]. Elle présente en effet l'avantage de fournir à ces robots, via leur accès au cloud [39], une capacité de calcul suffisante pour automatiser et décentraliser en partie la prise de décisions. La réussite de ce type de réseau doit permettre aux usines du futur de réagir en temps réel grâce à un équilibrage intelligent entre traitements effectués à distance ou en local. Ici encore, cette approche ne peut être efficace et réactive que si elle s'appuie sur des moyens de communication suffisamment performants. De plus, la présence de certaines informations sensibles ou confidentielles exige que ceux-ci soient en mesure de sécuriser et de protéger contre des attaques extérieures les contenus concernés. Au regard des enjeux liés à l'utilisation des données, la place du logiciel est ici encore prépondérante et la capacité de tels systèmes à atteindre le niveau de performance espéré repose en grande partie sur le choix d'une politique de gestion des données adaptée, intégrant des algorithmes de distribution optimisés et robustes tels que ceux développés pour le *Cloud* (ou, plus récemment, le *Fog* et le *Edge*) *Computing* [53, 12].

L'accès à ces nouvelles ressources, conjuguée à l'émergence de termes tels que *mégadonnées* (*Big Data* en anglais) ou *apprentissage profond* (*Deep Learning* en anglais) conduit aussi à certaines dérives. On voit ainsi se développer une tendance à la collecte massive de données, utilisées pour alimenter des modèles statistiques génériques ou des algorithmes d'apprentissage. Dans cette approche, l'outil d'analyse est considéré comme une boîte noire du point de vue de l'utili-

sateur, avec l'idée sous-jacente que plus on lui fournit d'informations, meilleurs seront ses résultats. De plus en plus de chercheurs remettent en cause ce paradigme qui relie quantité de données et qualité de l'analyse, en soulignant les désavantages d'une démarche de ce type. En pratique, une bonne partie de la valeur ajoutée des données provient de leur qualité (connaissance de la précision des capteurs, de leur calibration et de leur marge d'erreur par exemple). Il est donc primordial d'enrichir le processus de traitement des informations par une bonne connaissance des moyens de collecte, ainsi que par des méthodes de nettoyage et de standardisation appropriées. La connaissance du système étudié et de ses dynamiques permettent également de proposer un modèle approprié et assurent une bonne compréhension des informations extraites sur le terrain. Cette expertise permet notamment de limiter la collecte en spécifiant les grandeurs pertinentes du système, ainsi que de dériver des métriques appropriées pour l'objectif visé. Une telle approche par *Smart Data* (par opposition à *Big Data*) permet notamment une meilleure interprétation des résultats en s'appuyant sur des modèles explicatifs permettant de quantifier au mieux les performances des systèmes de production et d'identifier rapidement les potentiels points d'amélioration [41, 42].

Au delà des barrières techniques déjà évoquées, un autre paradigme se dégage des nouvelles pratiques en lien avec l'utilisation des données. L'approche classique consistant à cloisonner l'analyse des données et les processus industriels tend à disparaître et on passe d'une vision « prévoir et planifier » à une nouvelle, plus dynamique, qui vise à « capter et réagir ». En effet, l'information issue des processus de production était traditionnellement utilisée pour produire des indicateurs statistiques indépendants du processus de production lui-même. Ces indicateurs étaient utilisés pour quantifier les performances et anticiper l'évolution du système ou prévoir des événements futurs (demandes des clients, défaillances, etc.), et ainsi permettre de planifier *a priori* la séquence d'actions à réaliser. Avec la multiplication des capteurs, l'augmentation des capacités de calcul et la mise en place de canaux de communication efficaces, on adopte de plus en plus une démarche réactive, dans laquelle le système s'adapte dynamiquement aux signaux captés et interprétés en temps réel. La notion de robustesse d'un processus, autrefois symbolisée par l'anticipation et la prise en compte des incertitudes, se déporte donc aujourd'hui sur la flexibilité du système et sa capacité à capter et réagir rapidement aux aléas qui se présentent.

3.3 L'Intelligence Artificielle et le nouveau rôle à jouer des acteurs humains

Au fil des ans, le terme *Intelligence Artificielle* (I.A.) a eu de nombreuses connotations, surmontant plusieurs périodes de scepticisme pour jouir désormais d'un regain d'intérêt indiscutable. De nos jours, « une I.A. » est un programme utilisant notamment des techniques d'apprentissage automatique et donnant l'apparence de l'intelligence. Il est généralement optimisé pour des tâches spécifiques et fortement contraintes, et les systèmes qui en bénéficient obtiennent de très bonnes performances dans la limite des applications pour lesquelles ils

ont été conçus. En pratique, nous pouvons observer que ces systèmes d'I.A. dite « faible » ne sont pas réellement intelligents au sens humain du terme. Il est donc intéressant d'appliquer les approches I.A. sur différents aspects bien définis de la production et de la chaîne logistique, allant des aspects « machines intelligentes » à une gestion globale des décisions. Un des exemples d'utilisation de technologies issues de l'intelligence artificielle les plus prometteurs est la capacité à laisser les machines opérer sans assistance humaine en « apprenant » à partir des données disponibles, comme dans le cas des véhicules automatisés, des instruments pour la recherche scientifique et des outils d'analyse de données [29]. Depuis l'observation des processus et décision I.A., les experts définiront et élaboreront de nouveaux processus de production, méthodes et organisation des usines [52].

Il est important de garder à l'esprit que dans le futur toute I.A. dite « forte » sera capable d'évaluer des données et d'effectuer des tâches infaisables par l'humain.

Cette perspective, combinée à l'implantation d'objets intelligents et connectés, via l'*Internet des objets*, dans l'usine, soulève la question du futur rôle des acteurs humains sur les lignes de production. Un nombre croissant de tâches est déjà automatisé, que ce soit pour éviter les erreurs humaines ou les risques de blessures physiques, lors d'opérations critiques. L'émergence d'algorithmes et de robots capables d'optimiser les décisions et d'effectuer des opérations de manière autonome transfère certaines connaissances terrain des ouvriers vers les machines, remettant de fait en cause le niveau d'expertise requis chez les opérateurs. On peut donc se demander quelles décisions seront laissées aux humains dans les usines du futur. À moyen terme, même des acteurs industriels avec une forte politique d'innovation considèrent que les robots les plus avancés ne sont pas encore assez intelligents pour se passer de l'intervention humaine. Des ouvriers spécialisés sont nécessaires pour comprendre et analyser les données récupérées par les capteurs, puis déclencher les bonnes opérations physiques tels que la maintenance, le check-up, les diagnostiques, etc., même lorsque ces opérations sont, elles, automatisées. Ceci implique que les opérateurs devront certainement étendre et diversifier leur expertise afin que celle-ci couvre non seulement les machines sur lesquelles ils travaillent, mais également les différents capteurs qui l'entourent, ainsi que l'infrastructure de gestion des données. Il est probable que les compétences attendues de la part des opérateurs évoluent vers des profils plus « analytiques », capables d'analyser les données collectées, de définir et de comprendre les indicateurs de performance afin de repérer une faiblesse des processus ou des défaillances potentielles du système.

Si cette tendance se confirme, nous pourrions voir se multiplier dans un futur proche les programmes de formation continue afin de rapidement mettre à niveau les travailleurs concernés. Le besoin grandissant pour les profils plus analytiques, combiné à l'essor des ateliers automatisés, pourrait laisser penser que la présence humaine deviendra bientôt superflue sur les lignes de production. Il est en réalité peu probable d'observer un tel phénomène dans les années à venir. Les domaines d'expertises devraient néanmoins se concentrer sur des tâches spécifiques et spécialisées, hors du champ de compétence de machines

automatisées. En fait, les nouvelles technologies pourraient se révéler très utiles à l’accompagnement dans cette transition, en proposant des outils de simulation pour améliorer la formation des opérateurs face à certaines situations peu fréquentes. Cette approche est déjà mise en place dans certaines entreprises, par exemple en reproduisant des lignes d’assemblage en réalité virtuelle afin d’étudier et d’améliorer la posture de travail des opérateurs [47]. Dans la même veine, la réalité augmentée [36, 28] a également un rôle à jouer, par exemple dans la formation des ouvriers aux opérations de maintenance sensibles afin d’optimiser leur efficacité dans des conditions opérationnelles réelles. Dans ces exemples, des outils d’innovation remplacent une partie de l’expérience terrain, et permettent aux humains d’acquérir une expertise poussée dans un délai relativement court.

4 Le jumeau numérique ou « digital twin »

4.1 Qu’est-ce qu’un jumeau numérique ?

Selon Wikipedia, un jumeau numérique (en anglais, *digital twin* ou *device shadow*) est une réplique numérique d’un objet, d’un processus ou d’un système qui peut être utilisé à diverses fins.

Le premier jumeau numérique, reconnu comme tel, a été le module Apollo de la NASA qui avait sa réplique exacte sur Terre. L’objectif était d’expérimenter sur le jumeau toutes les opérations de maintenance qui pourraient être réalisées sur le module spatial. Cette réplique n’avait rien de numérique, mais son usage en fait l’ancêtre des jumeaux numériques.

Aujourd’hui, à l’ère numérique, les jumeaux ne sont plus seulement matériels. Un jumeau numérique peut être composé à la fois de composants matériels (dans le monde réel), de composants logiciels (dans un monde virtuel) et de données (informations) qui circulent entre tous ces composants. On peut trouver de tels dispositifs dans l’aéronautique [16] ou la production manufacturière [45, 37] par exemple.

Un jumeau numérique susceptible de décrire de nombreux aspects du monde réel tels que les techniques de production, les moyens ou les processus utilisés, des ressources humaines, le système de production ou les produits eux-mêmes et dans le cas général les données provenant de nombreuses sources. Il est donc essentiel de définir clairement les frontières d’un jumeau numérique. On peut par exemple s’intéresser au jumeau d’un robot, d’une chaîne de production, d’une usine, d’une entreprise avec ou sans ses fournisseurs, clients ou produits.

Le jumeau numérique copie son original, permet d’agir sur cette copie pour tester, simuler des opérations, des réorganisations, des changements de configuration, et finalement peut contrôler ou agir sur son original, bouclant ainsi la boucle.

La description d’une usine (mais aussi d’un produit) requiert, pour les différentes facettes possibles, l’utilisation de nombreux modèles. Par exemple, il existe des modèles physiques (bâtiments, mécanique, etc), économiques, métier, de processus, et maintenant des modèles cyber-physiques (incluant des aspects

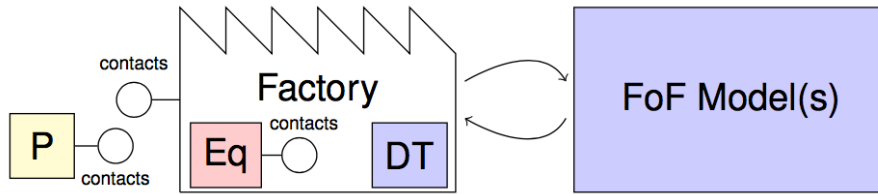


FIGURE 1 – Le monde réel (partie de gauche) et son jumeau numérique (partie de droite) - P représente les produits, Eq les équipements, DT le jumeau numérique (ou *Digital Twin*) et FoF l'usine du futur (ou *Factory of the Future*).

à la fois logiciels et matériels). Un jumeau numérique n'est pas seulement technique, il peut aussi être organisationnel, économique ou intégrer des aspects humains (les compétences, la santé, par exemple).

Il est important de noter qu'un jumeau numérique ne reflète pas nécessairement 100 % de la réalité du système modélisé. C'est une abstraction de la réalité qui peut parfois en diverger volontairement. Une question clé se pose alors : quelle est la source de vérité ? La réponse peut paraître surprenante : le modèle. En effet, le jumeau est l'information partagée par tous les intervenants et devient ainsi la référence.

À partir de la Figure 1 qui représente une usine, ses produits (P), ses chaînes de productions (Eq - Équipements) et son jumeau numérique (DT - *Digital Twin*), on peut décrire plusieurs sortes de modèles selon les éléments qu'on intègre dans le jumeau numérique :

- le produit seulement : l'exemple du module Apollo ;
- une chaîne de production : uniquement les équipements ;
- une usine : les équipements, l'organisation (l'usine) ;
- une usine et ses produits : les équipements, l'organisation (l'usine), et les produits ;
- une usine numérique : les équipements, l'organisation (l'usine), les produits et le jumeau numérique de l'usine lui-même ;
- un fabricant : un ensemble d'usines (avec produit et/ou jumeau).

On voit que le jumeau numérique peut prendre de très nombreuses formes.

Des observations précédentes, nous pouvons faire les constats suivants :

- le jumeau numérique est le constituant central de l'Industrie du Futur : il organise l'ensemble des données ;
- il a les mêmes caractéristiques que les modèles :
 - *multi-facettes* - il peut décrire plusieurs dimensions ou aspects complémentaires d'un système réel,
 - *abstrait* - il est une abstraction (cache des détails) d'un système réel, mais devrait se comporter comme celui-ci,
 - *borné* - il correspond à un (sous-)ensemble bien défini de propriétés et d'éléments du système réel ;

- pour toutes ces raisons, il est essentiel :
 - d'identifier clairement ses frontières - quelles parties et quelles propriétés du système réel décrit-il ?
 - d'offrir plusieurs moyens de description, plusieurs langages pour décrire et représenter les différents aspects et leurs différents niveaux d'abstraction,
 - de fournir des moyens de composer (fédérer) ses différents aspects ensemble.

Du point de vue du génie logiciel, nous pouvons en tirer les questions fondamentales suivantes :

- quels sont les langages et/ou représentations nécessaires pour décrire tous les modèles utiles ?
- comment peut-on combiner et relier ces modèles (hétérogènes) entre eux de manière cohérente ?
- comment assurer la modularité, la réutilisabilité et le passage à l'échelle dans ce contexte ?
- que sait un jumeau numérique sur lui-même (on peut parler de *réflexivité* du jumeau numérique) ?

Sans présager des réponses, nous pensons que pour répondre à ces questions, il faudra s'appuyer sur les travaux scientifiques de l'ingénierie du logiciel. On utilisera :

- des modèles de conception statiques (3D, bâtiments, chaînes de production, logiciels, produits, ...);
- des modèles dynamiques en temps réel (processus, algorithmes, activités, ...);
- des modèles abstraits (connaissances, réseaux de personnes, fournisseurs, organisations, risques, qualité, économie, ...).

4.2 Qu'est-il attendu du jumeau numérique ?

Dans ce qui vient ci-après, nous tentons de donner une définition du jumeau numérique, de décrire ses principales caractéristiques et d'identifier ce que cela implique d'un point de vue du génie logiciel. Nous mettons surtout l'accent sur ce que nous a montré l'atelier aLIFE des attentes qu'il génère.

Un premier aspect fondamental, mentionné précédemment et confirmé par de grands groupes industriels, est l'objectif de conserver l'humain/opérateur au cœur de l'usine. Cela est perçu comme un point clé pour l'acceptation et le succès du jumeau numérique au sein des entreprises. En effet, au lieu de systématiquement tenter de remplacer l'humain, le jumeau numérique doit plutôt être considéré comme une belle opportunité de l'assister dans ses tâches les plus complexes. De plus, il peut jouer un rôle central dans sa formation (sur un jumeau numérique plutôt que sur un système réel) et ainsi faciliter l'acquisition des nouvelles compétences techniques requises.

Un deuxième aspect important est la raison économique derrière la décision de développer et d'utiliser des jumeaux numériques au sein des organisations. Quelques spécialistes ont tendance à croire qu'ils peuvent seulement être ap-

pliqués en pratique si leurs coûts restent raisonnables et abordables. Un des arguments principaux à apporter dans ce cas est l'agilité et la flexibilité que de tels jumeaux numériques peuvent fournir. Grâce à eux, des économies importantes peuvent être réalisées en matière d'investissements sur de nouveaux moyens de production ou de futurs produits (par exemple). Cependant, il est communément admis qu'estimer le retour sur investissement d'un jumeau numérique est très difficile.

De manière complémentaire aux deux aspects précédents, un troisième point a également été mentionné à plusieurs reprises pendant l'atelier : le jumeau numérique peut être utilisé comme un moyen approprié d'améliorer les interactions entre l'entreprise et ses différentes parties prenantes (tierces parties sous-contractées, clients, etc.). Par exemple, avant de partager des éléments physiques ou matériels (ce qui est souvent difficile en termes de logistique, et donc coûteux), des capacités de production et les données associées pourraient être simulées via le jumeau numérique.

Pour résumer, nous pouvons extraire les éléments suivants concernant les usages attendus d'un jumeau numérique :

- supervision : il aide à superviser en étant connecté à l'original physique ;
- contrôle : il permet de piloter l'original et d'aider/conseiller l'humain (opérateur ou décideur) ;
- simulation : il permet de simuler de nouveaux équipements, de nouvelles pratiques ou organisations, et il doit également être pensé en tant qu'un outil pour améliorer le retour sur investissement ;
- interopérabilité : il peut faciliter l'interaction à la fois à l'intérieur et à l'extérieur de l'entreprise en automatisant et standardisant les communications⁸ ;
- formation : il peut être utilisé comme un nouveau support à la formation (en complément des supports plus traditionnels).

D'un point de vue du génie logiciel, cela pose les questions suivantes (parmi beaucoup d'autres) :

- comment collecter des données collectées en temps réel, de sources hétérogènes, pour les traiter et les intégrer à des simulateurs ? Au-delà de la quantité d'information à collecter, les sources d'information sont nombreuses et possiblement très hétérogènes (capteurs, système d'information, automates, humains, workflow, etc.). Les organiser de manière efficace est un premier défi, mais maintenir la cohérence lors des mises à jour peut s'avérer très complexe ; d'autant plus si l'on souhaite coupler supervision et contrôle. Pour rendre cela possible, de nouveaux processus de contrôle dédiés au jumeau numérique sont encore à définir et expérimenter ;
- si le jumeau numérique existe pour aider/supporter l'humain, alors qui contrôle qui et comment ? Ce point se rapporte directement à une question précédente sur la source de vérité (jumeau numérique ou système réel ?). Si le jumeau numérique est la référence, alors l'humain doit dis-

8. Voir la partie 6 Le Cloud Manufacturing

poser de moyens efficaces pour assurer son utilisation et sa maintenance. Cela se rapporte aussi aux différents usages possibles qui peuvent être faits du jumeau numérique. Il peut s’agir pour l’humain de surveiller ou contrôler le système réel via son jumeau. Ce jumeau peut également être utilisé pour simuler le système réel et prendre des décisions en conséquence. Enfin un tel jumeau numérique peut s’avérer utile pour des tâches d’apprentissage de l’humain sans que ce dernier puisse impacter involontairement le système réel ;

- quel est l’impact de la dimension économique avant/pendant l’utilisation d’un jumeau numérique? Pour faciliter sa conception, sa mise en place et aussi son acceptation (par l’humain), le jumeau numérique devrait être développé et déployé de manière incrémentale, ce qui a un coût. Ce développement et ce déploiement doivent également être adaptés aux différentes utilisations et interactions énoncées précédemment. De plus, il est souvent difficile d’identifier progressivement des fonctions et/ou services émergents dans un système donné. De ce fait, la maintenance et/ou l’évolution d’un jumeau numérique associé peut s’avérer complexe dans le temps et donc une source de coût non négligeable. Cependant, les bénéfices apportés par l’usage des jumeaux numériques devraient être en mesure de compenser les coûts éventuels ;
- comment assurons-nous que le jumeau numérique puisse être un support approprié aux interactions entre différents partenaires? Comme discuté dans un point précédent, l’interaction entre le jumeau numérique et l’humain est une question prépondérante, qu’il s’agisse d’un opérateur en interne ou d’un partenaire extérieur. De ce fait, le jumeau numérique pourrait aussi s’avérer utile pour faciliter les interactions entre ces différents partenaires. Dans ce but, un effort de standardisation des interfaces des jumeaux numériques serait intéressant. Le rôle de la standardisation est bien connu dans le domaine du génie logiciel, aussi bien que ses limitations en termes d’implémentation et d’adoption. Cette communauté pourrait ainsi apporter son expérience conséquente dans ce domaine. De plus, les frontières du jumeau numérique sont critiques car les divers actifs de l’entreprise sont une partie importante de la valeur ajoutée de l’organisation. Se posent alors des questions d’ordre légal qui viennent se greffer aux challenges techniques.

4.3 Discussion

Un jumeau numérique est un modèle unifié (ou un ensemble de modèles) qui vient habituellement avec une implémentation. Il est une abstraction d’un système réel avec des intentions particulières. Ainsi, il peut montrer certains aspects de ce système et en masquer d’autres. Il a des frontières claires qui délimitent sa portée. Son implémentation prend la forme d’une brique logicielle complexe qui rassemble des informations, les synthétise et prend éventuellement des décisions en fonction de celles-ci. Il peut également avoir une longue durée de vie, évoluant en même temps que le système qu’il émule (cf. Figure 1).

C'est pour cela que nous pensons que le génie logiciel, et les domaines clés associés tels que les architectures logicielles et la modélisation logicielle, peuvent fournir des compétences et techniques qui doivent être utilisées pour spécifier, développer, maintenir et faire évoluer les jumeaux numériques.

Assez curieusement, les discussions techniques durant le panel manquaient de références au génie logiciel alors que le logiciel est clairement au centre des débats. Les robots, capteurs, actionneurs, ou les algorithmes ont été cités, mais sans description d'une architecture (logicielle) correspondante et sans une vision globale sur le système (de systèmes) complexe. Par exemple, les descriptions structurelles semblent prendre une place écrasante, laissant les descriptions comportementales/temporelles (par exemple les processus) largement insuffisamment couvertes. Décrire les comportements et le temps est beaucoup plus compliqué que de décrire les structures, mais c'est pourtant un aspect fondamental à considérer. Enfin, les systèmes seront également, par construction, distribués et devront assurer performance, fiabilité et sécurité. Il faudra donc s'appuyer sur les techniques développées dans les réseaux et l'algorithmique distribuée.

Au passage, nous observons qu'il y a peu de publications scientifiques dans le domaine de l'informatique traitant spécifiquement des jumeaux numériques. La plupart des articles disponibles abordent ce sujet sous l'angle de son usage dans un milieu industriel et non de sa conception logicielle.

Nous préconisons l'utilisation des techniques basées sur le logiciel pour traiter de tels problèmes. Plus globalement, nous préconisons que le génie logiciel, les architectures logicielles et la modélisation logicielle deviennent des éléments clés de la vision sur les Usines du Futur. Par exemple, nous pensons que nos travaux sur des approches de modélisation [19, 24, 21, 5, 8, 7], des processus de modélisation [20, 18, 17] ou sur la modélisation de systèmes à grande échelle [6, 1] peuvent être fructueusement appliqués dans le contexte des jumeaux numériques.

Finalement, tous les panélistes ont insisté sur la position centrale que les humains doivent occuper dans les futures usines. Cependant la nature de leur travail, et la nature des relations entre les outils/machines/robots et les humains, vont probablement changer profondément. Nous devons donc être très prudents afin que prétendre mettre l'humain au centre ne s'avère pas simplement être un slogan pour faire accepter ces changements.

5 La qualité et la cybersécurité

5.1 Cybersécurité

La notion de cybersécurité est évoquée lorsque l'on entend parler de faille de sécurité majeure, de diffusion de *malwares*, ou de risques liés aux objets connectés. Cette préoccupation autour de la cybersécurité est aujourd'hui très présente et concerne toutes les entreprises, comme en témoigne une récente note de veille de la DSGI sur l'ingérence économique [13]. Elle est généralement associée au réseau et au contrôle d'accès des systèmes. Cependant, la cybersécurité n'est pas

limitée à des problèmes de contrôle d'accès ou de réseau. Elle touche aussi le logiciel, en particulier lorsque presque tous les composants et services d'une organisation reposent sur des systèmes logiciels. Les gens sont habitués à entendre parler de *patches* et de mises à jour de sécurité. Cependant il est couramment accepté de dire qu'il vaut mieux prévenir que guérir. C'est aussi le point de vue de l'ingénierie du logiciel. Dans le domaine, les chercheurs plaident pour des approches de sécurité par construction ou par conception (*security by design*), c'est-à-dire des approches qui se préoccupent de la sécurité dès la conception, sécurisent le processus de production, implémentent des vérifications en continu, etc. L'objectif est d'améliorer la sécurité des systèmes logiciels *avant* leur distribution ou leur dernier contrôle de qualité.

5.2 Discussion

En dépit d'une session dédiée à la qualité et à la cybersécurité, ce sujet n'a pas semblé être une préoccupation majeure durant l'atelier, d'où une très faible participation à la session. La cybersécurité a tout de même été évoquée, essentiellement en termes de réseau et de contrôle d'accès au système d'information. Cependant, le point de vue de la gestion de la sécurité par construction ne semblait pas être au cœur de la réflexion. Les discussions laissent penser que s'il y a une réelle préoccupation concernant la sécurité, cette préoccupation est le plus souvent centrée sur les contrôles d'accès et le réseau. Lorsque cela concerne directement le logiciel, l'aspect sécurité semble géré localement (dans une équipe, pour une tâche spécifique, pour un type d'outil, etc.) sans véritable vision globale. Il semble donc difficile d'implémenter un réel processus de sécurité ainsi qu'une approche de sécurité par conception (*security by design*) à l'échelle de l'usine du futur en partant des pratiques actuelles comme cela peut être fait dans le contexte d'ingénierie du logiciel. Par exemple, la conception de systèmes logiciels critiques implémente de telles approches en incluant le produit et le processus de production dans le périmètre de sécurité, ainsi qu'en dérivant la vision globale de la sécurité à chaque niveau afin d'augmenter la qualité et la sécurité du produit final. Les approches passent d'abord par la modélisation et la formalisation des processus, des contraintes et des politiques de sécurité afin de pouvoir assurer leur cohérence et de les supporter avec des outils. La dérivation d'une politique de sécurité globale à chaque étape de la production du logiciel se traduit par l'utilisation d'outils ou de méthodes spécifiques : explicitation des exigences, spécification formelle, langages et outils de transformation dédiés, *model-checker*, compilateur certifié, générateurs de tests, de *fuzzer*, etc. Cela permet d'améliorer localement la sécurité de la chaîne de production et donc aussi du produit. Cependant, de par la variété des tâches, des outils et des acteurs en jeu dans la chaîne de production, il est difficile de conserver une cohérence globale et de relier chaque étape au processus global. Le contexte de l'industrie du futur est justement un contexte similaire où l'une des difficultés réside dans la diversité des outils, des processus et des acteurs. Il semblerait donc raisonnable de décliner des approches venant de l'ingénierie du logiciel qui permettent de fédérer des formalismes.

Afin de réaliser des approches de sécurité par construction dans un contexte aussi divers, il est nécessaire d'assurer une certaine traçabilité (des produits, des outils, des processus, des données, ...). Cette notion a aussi été mentionnée durant l'atelier. Son utilisation semble limitée à des parties du processus de production (traçabilité des conteneurs pour éviter le vol de composants par exemple) alors qu'elle aurait aussi un rôle à jouer pour améliorer la qualité ou pour des audits de sécurité. En ingénierie du logiciel, la traçabilité est une idée cœur lorsqu'il faut améliorer la qualité, assurer la sûreté et la sécurité ou de se conformer à la loi. Ainsi, l'analyse des traces permet de s'assurer qu'un processus est conforme aux attentes et peut donner des informations importantes pour améliorer le processus. Ces traces peuvent être outillées afin de fournir un retour aux développeurs (analyse d'impact d'une réingénierie, décorrélation d'un code par rapport à une spécification, usage de pratiques de développement à risque, etc.) ou pour déclencher des alertes lors de la violation de contraintes de sécurité. Il nous a donc paru étonnant que cet aspect n'ait pas été mis plus en avant.

Les discussions concernant la cybersécurité — et l'ingénierie du logiciel de manière générale — pendant l'atelier semblent confirmer une intuition initiale concernant ce sujet : hormis l'échelle (diversité et quantité des partenaires, outils et données, distribution et connectivité massives) qui peut augmenter les risques et les conséquences, il n'y a rien de réellement spécifique aux industries du futur. Les anecdotes semblent aussi nous rappeler les fondamentaux de la sécurité : la sécurité d'un système dépend fortement de la sécurité du maillon le plus faible. . . qui est souvent l'utilisateur.

Finalement, les observations sur le sujet de la sécurité font écho avec celle de la session sur le *jumeau numérique* :

- l'humain joue un rôle important dans les usines du futur. Parfois, une formation et une assistance technique sont bien plus nécessaires que des outils à la pointe de la technologie ;
- les discussions ont montré qu'il y avait un intérêt pour le logiciel sans pour autant plonger dans les problèmes spécifiques à l'ingénierie du logiciel.

Nous sommes convaincus que l'ingénierie du logiciel pourrait apporter des méthodologies utiles ainsi que des outils pour répondre au problème grandissant de la cybersécurité, en particulier en adoptant les visions des usines du futur et en transposant les approches de sécurité par construction. Cela peut être fait via l'adoption de modèles formels pour décrire l'usine, son fonctionnement et ses contraintes de sécurité. Selon le niveau de formalisme, des techniques de vérification du logiciel pourraient aussi aider à répondre au problème de la cybersécurité dans le contexte de l'usine du futur. Plus concrètement, quelles bonnes pratiques de développement logiciel ou issues du domaine de l'ingénierie du logiciel pourraient être mises en avant pour aider les utilisateurs, les développeurs, les opérateurs, etc. dans le contexte de l'industrie du futur ?

6 Le *Cloud Manufacturing*

Pour être en mesure d'identifier l'importance du *Cloud Manufacturing*, ainsi que les verrous scientifiques qui y sont associés, il est primordial de comprendre sa vraie signification. Il apparaît en effet que le concept de *Cloud Manufacturing* (CMfg) est sujet à controverse et qu'il peut être compris de différentes manières.

6.1 Qu'est-ce que le *Cloud Manufacturing* ?

Le CMfg a tout d'abord été introduit par Zhang et al. [51] en 2010. Dans l'article de 2012 de Xu [49], une seconde définition a émergé et est devenue la référence pour beaucoup d'articles scientifiques sur le sujet par la suite [48, 11, 32, 43]. L'intérêt pour cette définition vient de sa précision. En effet, cette définition transpose la définition officielle du *Cloud Computing* donnée par le NIST à des ressources industrielles. Ainsi, la définition du *Cloud Computing* est la suivante : « un modèle permettant un accès réseau à la demande, de façon pratique et permanente, à un ensemble partagé de ressources informatiques configurables (par exemple, réseaux, serveurs, stockage, applications et services) qui peuvent être rapidement provisionnées et diffusées avec un effort de gestion minimal ou une intervention limitée du fournisseur de services » (traduit de la définition du NIST⁹), et la définition du CMfg, traduite de Xu, celle-ci : « un modèle permettant un accès réseau à la demande, de façon pratique et permanente, à un ensemble partagé de ressources manufacturières configurables (par exemple, outils logiciels manufacturiers, équipements manufacturiers ou capacités manufacturières) qui peuvent être rapidement provisionnées et diffusées avec un effort de gestion minimal ou une intervention limitée du fournisseur de services ».

La première chose qui peut être notée de cette dernière définition est l'absence du terme *Cloud Computing*. Il s'agit d'une remarque d'importance car elle illustre le fait que le CMfg peut être envisagé et construit sans *Cloud Computing*. Le terme commun aux deux définitions est en effet le *Cloud* et non le *Cloud Computing*. Or le mot *Cloud* fait initialement référence au modèle économique et non à la technologie sous-jacente. Il n'y a donc pas forcément de relation entre les deux solutions, mais un modèle de service et économique similaire. De notre point de vue le CMfg est donc (en accord avec la définition de Xu) une application du modèle économique *Cloud* à des ressources industrielles en lieu et place de ressources informatiques. Il est toutefois probable que l'utilisation de ressources informatiques dans le *Cloud Computing* puisse aider à la mise en place du CMfg pour effectuer des traitements très lourds ou stocker de très gros volumes de données, par exemple. Mais il est important de comprendre que le CMfg pourrait également utiliser des serveurs classiques au sein des entreprises pour pouvoir fonctionner.

Une fois ce point de confusion éclairé, il est possible d'analyser les autres éléments clés de la définition. Tout d'abord, « un ensemble partagé de ressources manufacturières configurables » signifie que n'importe quelle ressource de production doit pouvoir être partagée entre plusieurs utilisateurs et/ou entreprises,

9. <https://csrc.nist.gov/publications/detail/sp/800-145/final>

ce qui n'est pas trivial pour des équipements de production. Le terme « configurable » est lui aussi difficile à mettre en place pour certains équipements. Deuxièmement, « un accès réseau à la demande » signifie que les ressources manufacturières doivent être accessibles, réservables et configurables par le biais d'internet ou d'un réseau privé. Si cela est envisageable pour un réseau privé sécurisé, c'est un point extrêmement sensible pour ce qui est d'un accès depuis internet sur des réseaux appartenant à des opérateurs extérieurs. Enfin, « un effort de gestion minimal ou une intervention limitée du fournisseur de services » est un élément crucial puisqu'il sous-entend que le paradigme de CMfg et ses procédés doivent être entièrement automatisés afin d'être efficaces.

En plus de ces éléments, il est possible de comprendre dans la définition du CMfg que des ressources de différents types sont considérées (tout comme cela se fait dans le *Cloud Computing*). Certaines de ces ressources sont physiques, ou cyber-physiques, alors que d'autres relèvent plus du logiciel. Ainsi, tout comme pour le *Cloud Computing* plusieurs couches de services doivent être fournies par un opérateur de CMfg. Le niveau le plus bas de service du CMfg peut être comparé au niveau le plus bas du *Cloud Computing, Infrastructure-as-a-Service* (IaaS). Dans le cas du CMfg ce niveau pourrait inclure des services comme *Manufacturing-as-a-Service* ou *Assembly-Line-as-a-Service*, par exemple. Ce niveau s'adresserait donc, comme pour le IaaS, à des experts des machines de production et des lignes d'assemblage. Bien évidemment les challenges scientifiques associés sont très différents de ceux du IaaS, une importance fondamentale étant par exemple l'aspect cyber-physique des machines manufacturières là où l'informatique est entièrement numérique. Le niveau proposant du logiciel manufacturier comme un service est quant à lui comparable au niveau *Software-as-a-Service* (SaaS) du *Cloud Computing*. Mais là encore des challenges différents se présentent puisque les couches sous-jacentes sont cyber-physiques ce qui n'est pas le cas en SaaS.

Certains pourront dire que des services tels que la sous-traitance industrielle est une pratique courante. Cet élément de débat a d'ailleurs été évoqué lors de l'atelier aLIFE. Toutefois, au moins deux différences majeures sont à noter lorsque l'on parle de CMfg. La première est l'automatisation du procédé, là où actuellement une intervention humaine longue et coûteuse est souvent nécessaire pour une reconfiguration des lignes ou des machines. Deuxièmement, le fait d'automatiser le procédé ouvre la porte à un effet d'échelle bien plus important que dans les contrats de sous-traitance actuels. En effet, lorsque l'on parle de CMfg il s'agit d'atteindre des millions d'utilisateurs pour des millions de ressources, et d'arriver à une efficacité de l'automatisation suffisante pour baisser de façon importante les coûts des services proposés. Donner une impression d'infinité des ressources est un élément majeur du concept de *Cloud* qui devra également figurer dans le CMfg, ce qui implique un très grand nombre de ressources.

6.2 *Cloud* d'imprimantes 3D

Une première façon qui peut être envisagée pour construire une plateforme de CMfg est d'utiliser les capacités des imprimantes 3D, connues aussi sous le nom de fabrication additive. Une imprimante 3D est en mesure d'« imprimer » un objet ou une sous-partie d'un objet en superposant des couches successives de matériaux. Chaque couche doit sécher avant que la couche suivante ne soit apposée. Les imprimantes 3D ne sont qu'au début de leur vie et de gros progrès sont à faire sur leur efficacité et leur coût, ainsi que sur leur possibilité de traiter différents types de matériaux, certains matériaux étant particulièrement longs à sécher (comme le béton par exemple). L'impression 3D représente néanmoins déjà une révolution par le fait que les imprimantes peuvent être plus facilement configurées et reconfigurées que la plupart des machines de production. De plus l'impression 3D permet la création d'objets personnalisés avec des formes difficiles à obtenir sans moulage. Ainsi, les imprimantes 3D ouvrent des perspectives intéressantes pour la production à la demande de produits personnalisés à un coût faible, ainsi que pour leur accessibilité à distance, et enfin pour leur prise en main plus accessible à des non experts de la production.

Pour toute ces raisons, un prototype de *Cloud Manufacturing* pourrait être imaginé en agglomérant un ensemble d'imprimantes 3D pilotées par un ensemble d'éléments logiciels de contrôle déployés sur des ressources informatiques (sur des serveurs ou sur une plateforme de *Cloud Computing*), comme cela se fait en *Cloud Computing* (comme par exemple OpenStack). Le fournisseur de *Cloud Manufacturing* serait donc responsable de la gestion automatisée de cet ensemble d'imprimantes 3D et de leur partage auprès des utilisateurs. Une différence importante est toutefois à noter par rapport à des ressources informatiques car il semble difficile d'effectuer plusieurs impressions simultanées sur une même machine, ce qui fait la force et la rentabilité principale du *Cloud computing* (virtualisation et consolidation des ressources informatiques sur un ensemble de tâches). Le partage des ressources sera donc moindre que dans le *Cloud Computing*.

Une question importante est soulevée par une telle vision du CMfg : est-ce que les acteurs du secteur industriel vont changer dans un futur proche ou lointain ? Il est vrai que cette vision prédit au moins un nouvel acteur, le fournisseur de *Cloud Manufacturing* qui fournit le service gère le partage et le bon fonctionnement de ses ressources (imprimantes). Si ces imprimantes appartiennent au fournisseur de CMfg, ce qui est probable, on peut également craindre la disparition des petits fournisseurs de l'industrie manufacturière qui ne pourront pas s'aligner sur les prix proposés par de tels fournisseurs. Il est important de se confronter à la réalité des forces de frappe de certaines très grandes entreprises si elles décident de s'intéresser au CMfg.

Pour relativiser cette menace, il est utile de souligner ce que les fournisseurs de *Cloud* d'imprimantes 3D ne sont pas en mesure d'offrir. Par exemple, pour l'industrie de pointe comme l'aéronautique, la précision fournie par les imprimantes 3D est loin d'être suffisante et probablement pour de nombreuses années encore. De plus, si le fournisseur d'imprimantes peut créer des pièces élémen-

taires, il n'aura a priori pas les compétences pour l'assemblage des éléments afin de créer des objets plus complexes. En effet, cela demande une connaissance métier importante et spécifique à chaque cas d'assemblage. Enfin, une même imprimante 3D ne pourra probablement pas imprimer tout type de matériaux. Ceci implique que ces imprimantes ne seront sans doute pas aussi polyvalentes que des ordinateurs et qu'il sera nécessaire d'en acquérir une très grande quantité pour être en mesure d'imprimer différents types de pièces, dans différents matériaux.

S'il est très difficile de répondre clairement à la question des futurs acteurs de l'industrie, il semble raisonnable d'affirmer que les futurs emplois de l'industrie manufacturière vont évoluer. On pourrait voir naître des métiers tels que fournisseur de CMfg, administrateur de CMfg, développeur de logiciels CMfg, etc.

Enfin, un dernier aspect important du CMfg que nous souhaitons évoquer ici est la distance entre le centre d'imprimantes 3D (à l'image du centre de données) et le client utilisant le service (des entreprises ou des individus). De nombreux scientifiques prônent la proximité entre la production d'un objet et le client. La notion de *Cloud Computing* telle qu'on la connaît actuellement est une vision très centralisée. Il sera donc nécessaire de concevoir un CMfg décentralisé plutôt que centralisé, tel que cela est étudié dans les solutions naissantes comme le *Fog* et le *Edge Computing* [31, 40, 9, 14]. Le transport de pièces physiques étant bien plus long et bien plus coûteux que le transport de données numériques par internet (bien que cela soit parfois discutable), il est très important de prendre en compte la répartition géographique dès la conception de ces nouveaux *Clouds*.

6.3 Reconfiguration de lignes de production et d'assemblage

La fabrication additive présente des atouts majeurs en terme de flexibilité qui en font un candidat idéal pour le CMfg, néanmoins le partage des capacités de production peut également être envisagé pour les moyens plus traditionnels.

En effet, les machines-outils et lignes d'assemblage modernes incluent déjà des fonctionnalités de reconfiguration automatisées. Les systèmes manufacturiers reconfigurables sont définis comme « Un système d'usinage pouvant être créé en incorporant des modules de base — matériels et logiciels — pouvant être réarrangés ou remplacés rapidement et de manière fiable » (traduit de [33]). De telles lignes de production existent déjà et des recherches portent sur leur optimisation [3, 4].

Néanmoins, comme pour la fabrication additive, le partage de systèmes manufacturiers en CMfg implique la construction d'un système entièrement automatisé et interopérable. Il s'agit tout d'abord d'avoir des langages, des interfaces et des standards pour les logiciels et échangent de données qui régissent la chaîne de production. Aujourd'hui, chaque configuration du système requiert une implémentation spécifique, le plus souvent dans des langages propriétaires inhérents au système de production.

Le CMfg pose également la question de la flexibilité des approvisionnements en matières premières et composants intermédiaires. Un nouveau produit impliquant de nouvelles filières peut-il être intégré de manière automatisée? Le contrôle qualité doit être adapté et plus généralement, toute la gestion du risque doit faire partie du contrat entre le fournisseur de la ressource de production et son utilisateur. Il est clair qu'un élément clé du développement des systèmes CMfg sera l'ouverture des logiciels, la standardisation des interfaces de programmation et la production d'*App* simples et ergonomiques. Néanmoins, les lignes de production et les systèmes robotisés ont leurs limites et l'humain reste le système le plus intelligent, adaptable et flexible, tout en étant souvent plus économique.

Par ailleurs, un système *Cloud* est censé pouvoir être sollicité depuis n'importe où, à une très grande échelle. Si ceci doit arriver, la concentration et le partage massif des moyens de production est à organiser. Ceci peut être initié par les principaux industriels en place, mais également par des acteurs externes, typiquement venus du numérique, capables d'investir dans des systèmes robotisés modernes et désireux d'offrir de nouveaux services de fabrication.

6.4 Discussion

Que le système de production soit basé sur de la fabrication additive ou qu'il soit une ligne de production industrielle, un des enjeux de la mise en place du CMfg est sa versatilité. La reconfiguration automatisée des capacités de production est un aspect à développer pour faciliter l'intégration d'un utilisateur dans une ressource de production partagée.

Par ailleurs, l'impression 3D se présente comme une révolution industrielle, mais elle présente encore trop de problèmes de précision pour être intégrée à la production de pointe, ne tolérant aucun défaut.

Finalement, un enjeu majeur est l'intégration automatisée d'un service *Cloud* dans un processus de production. Pour que l'effort d'intégration soit minimal, il reste à fournir un important processus d'ouverture et de standardisation des interfaces de communication avec les logiciels de programmation des outils de production.

7 Conclusion

Il serait prématuré de tirer des conclusions définitives sur la place du génie logiciel au sein de l'industrie du futur. Toutefois, nos expériences respectives ainsi que les échanges qui ont eu lieu pendant l'atelier aLIFE nous permettent de partager quelques réflexions sur ce sujet.

Il est communément admis que l'informatique en général, et les logiciels en particulier, sont d'ores et déjà omniprésents dans les usines, notamment dans les industries de pointe. Cela concerne à la fois la collecte de grands volumes de données (par exemple de production), leurs représentations, leurs enrichissements ou bien leurs traitements et (ré)utilisations. Il s'agit également de l'ensemble

des outils logiciels nécessaires à la communication (protocoles, sécurité), à la décision (simulations), au contrôle (des robots, des chaînes de production) ou à la représentation (réalité augmentée, tableaux de bord) de l'usine et de ses différentes composantes.

De manière un peu surprenante, nous n'avons cependant pas perçu de véritable prise de conscience de l'importance à donner au logiciel et à son ingénierie (le génie logiciel) dans un tel contexte industriel. C'est pourquoi, il nous semble fondamental d'intégrer dès aujourd'hui ce regard. En effet, il ne faudrait pas que ce qui a été par le passé qualifié de *crise du logiciel* devienne une crise de l'industrie du futur. Il semble ainsi prépondérant que les leçons tirées dans le domaine du développement logiciel puissent être transposées efficacement dans l'industrie. Il faut donc dès à présent s'attacher à développer l'industrie du futur comme un type de « système complexe ». Cela implique donc de parler d'architecture, d'interface, de contrats, de processus, d'agilité, etc. qui sont autant de concepts permettant de (tenter de) maîtriser les évolutions en taille et dans la durée des systèmes cyber-physiques industriels à venir.

Il est notamment apparu que les données sont désormais au cœur de ces systèmes complexes industriels, notamment au travers du jumeau numérique qui apparaît comme un centre de contrôle de l'industrie du futur. Cet objet peut prendre, comme nous l'avons vu, de multiples formes. Mais dans tous les cas, il s'agit en réalité d'un modèle de l'usine et de ses différentes composantes. De ce fait les approches de modélisation existantes, telles que celles très utilisées depuis de nombreuses années en génie logiciel, devraient être davantage exploitées. De plus, si le jumeau numérique est initialement issu de l'industrie, il peut aisément se décliner dans de nombreux autres secteurs d'activité économique ou sociale : le bâtiment, les hôpitaux, la dématérialisation des administrations, etc. Par exemple, les diverses initiatives autour de *la ville intelligente* connaissent actuellement un essor notable et peuvent aussi très bien s'intégrer à cette vision. Ceci nous mène à avoir une réflexion sur l'interconnexion future de tous ces secteurs avec, à terme, la possibilité d'interconnecter tous leurs jumeaux numériques au sein d'un grand système distribué. Là encore, les travaux en informatique sur les systèmes distribués, les langages de coordination, le déploiement, l'adaptation, le passage à l'échelle, etc. ne peuvent que venir alimenter l'industrie du futur (ou devrait-on même dire la société du futur?).

De manière globale, nous avançons qu'avant d'arriver à une telle échelle globale d'informatisation de l'industrie du futur, il faudra bien évidemment être capable de maîtriser individuellement ses différentes composantes : les robots/cobots, les imprimantes 3D, les chaînes de production, etc. sans oublier leur intégration dans le schéma général et/ou stratégique de l'organisation. Tous ces éléments se programment déjà, au sens informatique du terme, ou en tout cas vont pouvoir se programmer à l'avenir. Leur informatisation et leur intégration au sein d'un système numérique devrait permettre une meilleure flexibilité avec de nouvelles capacités d'adaptation, de mutualisation et d'optimisation encore difficiles à imaginer aujourd'hui. De tels progrès ont été abordés dans les deux thèmes de l'usine intelligente et du *Cloud Manufacturing* de ce document. Il est apparu que les recherches et les bonnes pratiques autour du génie logiciel, de la

programmation, de l’algorithmique et des systèmes distribués sont là aussi primordiaux pour construire une industrie du futur fiable, optimisée, intelligente et conçue dans un souci d’économie financière et énergétique. Par exemple, il apparaît qu’une utilisation massive et déraisonnée des données ne semble ni profitable à la qualité des analyses, ni à l’effort énergétique nécessaire pour notre futur. Il nous semble également évident que pour arriver à ces progrès il est nécessaire de mettre en place des standards pour le matériel de production sans lesquels une interopérabilité sûre et maîtrisée et une efficacité des solutions sera difficile à atteindre. Entrer dans une démarche d’ouverture des standards et de partage de l’information sera nécessaire comme elle l’est en informatique de façon générale.

Enfin, s’il n’est pas ressorti une particularité pour l’industrie du futur autour de la sûreté et la cybersécurité, elle n’en est pas moins un élément tout aussi important que dans tout système largement informatisé. Concevoir une industrie du futur sécurisée de bout en bout et dès sa conception évitera des failles et des erreurs menant à de graves événements, potentiellement à très large échelle. En effet, le contexte d’autonomisation de l’usine (et du monde de façon générale) ainsi que sa numérisation extrême ne sont pas à prendre à la légère et peuvent mettre en danger à la fois les entreprises et les pays, d’un point de vue économique et sécuritaire, mais également la vie des hommes et des êtres vivants.

Alors quelles actions concrètes devrions-nous mettre en place pour réaliser une telle vision ? Nos partenaires potentiels sont :

- l’État pour se donner les moyens de rester dans la course, notamment en matière de recherche scientifique ou vis-à-vis de l’économie mondiale ;
- les industriels pour co-construire puis déployer cette vision systémique, et ainsi pouvoir gagner en flexibilité et productivité sur le long terme ;
- l’enseignement supérieur pour mettre en place des formations en informatique répondant mieux aux besoins des industriels en la matière ;
- ...

Pour conclure, toutes les présentations ont insisté sur l’importance de mettre *l’humain au centre* de l’industrie du futur. L’objectif doit être de faciliter le travail (avec des robots, des interfaces de réalité augmentée, ...) et de faciliter la décision (avec des tableaux de bord, des algorithmes « intelligents », ...). Cependant, il n’en est pas moins vrai que les machines vont accomplir des tâches que les humains réalisaient auparavant. Qu’en sera-t-il de notre relation au travail dans le futur ? Comment « gagner notre vie » si les robots sont en mesure de réaliser un travail à notre place (peut-être mieux et/ou plus rapidement) ? Dans le passé, l’augmentation de la productivité a créé un choc sur le marché du travail, qu’en sera-t-il de l’industrie du futur ? Si l’humain est au centre des préoccupations, les questions associées d’ordre sociales ou politiques ne doivent alors pas être reléguées au second plan.

Remerciements

L'organisation de l'atelier et ce travail ont été soutenus par l'Institut Carnot Télécom & Société Numérique (TSN)¹⁰, l'IMT Atlantique Bretagne Pays de la Loire, les laboratoires du LS2N et du Lab-STICC. Enfin nous souhaitons remercier chaleureusement tous les participants à l'événement aLIFE, en particulier les intervenants.

Références

- [1] W. Afzal, H. Bruneliere, D. Di Ruscio, A. Sadovykh, S. Mazzini, E. Cariou, D. Truscan, J. Cabot, A. Gómez, J. Gorroñoigoitia, et al. The MegaM@Rt2 ECSEL project : MegaModelling at Runtime - Scalable Model-based Framework for Continuous Development and Runtime Validation of Complex Systems. *Microprocessors and Microsystems*, 61 :86–95, 2018.
- [2] L. Bass, P. Clements, and R. Kazman. *Software Architecture in Practice*. SEI Series in Software Engineering. Addison-Wesley Professional, 3rd edition, Sept. 2012.
- [3] O. Battaïa, A. Dolgui, and N. Guschinsky. Decision support for design of reconfigurable rotary machining systems for family part production. *International Journal of Production Research*, 55(5) :1368–1385, 2017.
- [4] P. A. Borisovsky, X. Delorme, and A. Dolgui. Balancing reconfigurable machining lines via a set partitioning model. *International Journal of Production Research*, 52(13) :4026–4036, 2014.
- [5] H. Bruneliere, E. Burger, J. Cabot, and M. Wimmer. A Feature-based Survey of Model View Approaches. *Software & Systems Modeling*, pages 1–22, 2017.
- [6] H. Bruneliere, F. M. de Kerchove, G. Daniel, and J. Cabot. Towards Scalable Model Views on Heterogeneous Model Resources. In *ACM/IEEE 21th International Conference on Model Driven Engineering Languages and Systems (MODELS'18)*. ACM, 2018.
- [7] H. Bruneliere, J. Garcia, P. Desfray, D. E. Khelladi, R. Hebig, R. Bendraou, and J. Cabot. On Lightweight Metamodel Extension to Support Modeling Tools Agility. In *11th European Conference on Modelling Foundations and Applications (ECMFA 2015)*, pages 62–74. Springer, 2015.
- [8] H. Bruneliere, J. G. Perez, M. Wimmer, and J. Cabot. EMF Views : A View Mechanism for Integrating Heterogeneous Models. In *34th International Conference on Conceptual Modeling (ER 2015)*, pages 317–325. Springer, 2015.
- [9] R. Buyya, S. N. Srirama, G. Casale, R. Calheiros, Y. Simmhan, B. Varghese, E. Gelenbe, B. Javadi, L. M. Vaquero, M. A. S. Netto, A. N. Toosi, M. A. Rodriguez, I. M. Llorente, S. D. C. D. Vimercati, P. Samarati, D. Milojicic,

10. <https://www.carnot-tsn.fr>

- C. Varela, R. Bahsoon, M. D. D. Assuncao, O. Rana, W. Zhou, H. Jin, W. Gentsch, A. Y. Zomaya, and H. Shen. A manifesto for future generation cloud computing : Research directions for the next decade. *ACM Comput. Surv.*, 51(5) :105 :1–105 :38, Nov. 2018.
- [10] J. Cheng, W. Chen, F. Tao, and C.-L. Lin. Industrial IoT in 5g environment towards smart manufacturing. *Journal of Industrial Information Integration*, 10 :10–19, June 2018.
- [11] H. Coullon and J. Noyé. Reconsidering the Relationship between Cloud Computing and Cloud Manufacturing. In *SOHOMA 2017*, Nantes, France, Oct. 2017.
- [12] J. Darrous, S. Ibrahim, A. C. Zhou, and C. Pérez. Nitro : Network-aware virtual machine image management in geo-distributed clouds. In *18th IEEE/ACM International Symposium on Cluster, Cloud and Grid Computing, CCGRID 2018, Washington, DC, USA, May 1-4, 2018*, pages 553–562, 2018.
- [13] DGSI – Ministère de l’Intérieur. Ingérence économique. online, Jan. 2019.
- [14] A. J. Ferrer, J. M. Marquès, and J. Jorba. Towards the decentralised cloud : Survey on approaches and challenges for mobile, ad hoc, and edge computing. *ACM Comput. Surv.*, 51(6) :111 :1–111 :36, Jan. 2019.
- [15] J. H. Gilmore and B. J. Pine II. The Four Faces of Mass Customization. *Harvard Business Review*, (January–February 1997), Jan. 1997.
- [16] E. Glaessgen and D. Stargel. The Digital Twin Paradigm for Future NASA and US Air Force Vehicles. In *53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference 20th AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Conference 14th AIAA*, page 1818, 2012.
- [17] F. R. Golra. *A Refinement based methodology for software process modeling*. PhD thesis, INFO - Dépt. Informatique (Institut Mines-Télécom-Télécom Bretagne-UEB), Jan. 2014.
- [18] F. R. Golra, A. Beugnard, F. Dagnat, C. Guychard, and S. Guerin. Addressing Modularity for Heterogeneous Multi-model Systems using Model Federation. In *MODULARITY 2016 : 15th International Conference on Modularity*, pages 206–211, 2016.
- [19] F. R. Golra, A. Beugnard, F. Dagnat, C. Guychard, and S. Guerin. Using free modeling as an agile method for developing domain specific modeling languages. In *MODELS 2016 : ACM/IEEE 19th International Conference on Model Driven Engineering Languages and Systems*, pages 24–34, 2016.
- [20] F. R. Golra, F. Dagnat, R. Bendraou, and A. Beugnard. Continuous Process Compliance Using Model Driven Engineering. In S. I. Publishing, editor, *MEDI 2017 : 7th International Conference on Model and Data Engineering*, pages 42–56, 2017.
- [21] C. Guychard, S. Guerin, A. Koudri, F. Dagnat, and A. Beugnard. Conceptual interoperability through Models Federation. In *Semantic Information Federation Community Workshop*, 2013.

- [22] B. J. P. II, B. Victor, and A. C. Boynton. Making Mass Customization Work. *Harvard Business Review*, (September–October 1993), Sept. 1993.
- [23] A. K. S. Jardine, D. Lin, and D. Banjevic. A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 20(7) :1483–1510, Oct. 2006.
- [24] A. Koudri, C. Guychard, S. Guerin, A. Beugnard, J. Champeau, and F. Dagnat. De la nécessité de fédérer des modèles dans une chaîne d’outils. *Génie logiciel*, 105 :18 – 23, June 2013.
- [25] A. Kumar. From mass customization to mass personalization : a strategic transformation. *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, 19(4) :533, Apr. 2008.
- [26] Y.-H. Kuo and A. Kusiak. From data to big data in production research : the past and future trends. *International Journal of Production Research*, 0(0) :1–26, Mar. 2018.
- [27] A. Kusiak. Smart manufacturing must embrace big data. *Nature News*, 544(7648) :23, Apr. 2017.
- [28] F. Lamberti, F. Manuri, A. Sanna, G. Paravati, P. Pezzolla, and P. Montuschi. Challenges, Opportunities, and Future Trends of Emerging Techniques for Augmented Reality-Based Maintenance. *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing*, 2(4) :411–421, Dec. 2014.
- [29] J. Lee, B. Bagheri, and H.-A. Kao. A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*, 3 :18 – 23, 2015.
- [30] J. Lee, E. Lapira, B. Bagheri, and H.-a. Kao. Recent advances and trends in predictive manufacturing systems in big data environment. *Manufacturing Letters*, 1(1) :38–41, Oct. 2013.
- [31] C. Li, Y. Xue, J. Wang, W. Zhang, and T. Li. Edge-oriented computing paradigms : A survey on architecture design and system management. *ACM Comput. Surv.*, 51(2) :39 :1–39 :34, Apr. 2018.
- [32] Y. Lu, X. Xu, and J. Xu. Development of a hybrid manufacturing cloud. *Journal of Manufacturing Systems*, 33(4) :551 – 566, 2014.
- [33] M. G. Mehrabi, A. G. Ulsoy, and Y. Koren. Reconfigurable manufacturing systems : Key to future manufacturing. *Journal of Intelligent manufacturing*, 11(4) :403–419, 2000.
- [34] A. Muller, A. Crespo Marquez, and B. Iung. On the concept of e-maintenance : Review and current research. *Reliability Engineering & System Safety*, 93(8) :1165–1187, Aug. 2008.
- [35] D. A. Nithia. *Transitioning into New Manufacturing Paradigm : To Succeed in the Customer Centric Business Environment—Agility, Speed and Responsiveness*. “The Lean Manufacturing Enterprise”. Partridge Publishing Singapore, Nov. 2018.

- [36] S. K. Ong, M. L. Yuan, and A. Y. C. Nee. Augmented reality applications in manufacturing : a survey. *International Journal of Production Research*, 46(10) :2707–2742, May 2008.
- [37] A. Parrott and L. Warshaw. Industry 4.0 and the Digital Twin - Manufacturing Meets its Match. <https://www2.deloitte.com/insights/us/en/focus/industry-4-0/digital-twin-technology-smart-factory.html>, 2017. Online; accessed September 2018.
- [38] Y. Peng, M. Dong, and M. J. Zuo. Current status of machine prognostics in condition-based maintenance : a review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 50(1) :297–313, Sept. 2010.
- [39] B. Schmidt and L. Wang. Cloud-enhanced predictive maintenance. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 99(1) :5–13, Oct. 2018.
- [40] W. SHI, J. CAO, Q. ZHANG, Y. LI, and L. XU. Edge computing : Vision and challenges. *IEEE INTERNET OF THINGS JOURNAL*, 3(5) :637–646, Oct. 2016.
- [41] X.-S. Si, W. Wang, C.-H. Hu, and D.-H. Zhou. Remaining useful life estimation – A review on the statistical data driven approaches. *European Journal of Operational Research*, 213(1) :1–14, Aug. 2011.
- [42] F. Tao, Q. Qi, A. Liu, and A. Kusiak. Data-driven smart manufacturing. *Journal of Manufacturing Systems*, 48 :157–169, July 2018.
- [43] F. Tao, L. Zhang, V. C. Venkatesh, Y. Luo, and Y. Cheng. Cloud manufacturing : a computing and service-oriented manufacturing model. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B : Journal of Engineering Manufacture*, 225(10) :1969–1976, 2011.
- [44] K.-D. Thoben, S. Wiesner, and T. Wuest. “Industrie 4.0” and Smart Manufacturing – A Review of Research Issues and Application Examples. *International Journal of Automation Technology*, 11(1) :4–16, Jan. 2017.
- [45] T. H.-J. Uhlemann, C. Lehmann, and R. Steinhilper. The Digital Twin : Realizing the Cyber-Physical Production System for Industry 4.0. *Procedia Cirp*, 61 :335–340, 2017.
- [46] K. Wang, Y. Wang, J. O. Strandhagen, and T. Yu. *Advanced Manufacturing and Automation V*. WIT Press, Feb. 2016.
- [47] X. Wang, S. K. Ong, and A. Y. C. Nee. A comprehensive survey of augmented reality assembly research. *Advances in Manufacturing*, 4(1) :1–22, Mar. 2016.
- [48] D. Wu, M. J. Greer, D. W. Rosen, and D. Schaefer. Cloud manufacturing : Strategic vision and state-of-the-art. *Journal of Manufacturing Systems*, 32(4) :564 – 579, 2013.
- [49] X. Xu. From cloud computing to cloud manufacturing. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 28(1) :75 – 86, 2012.

- [50] A. Yadav and S. C. Jayswal. Modelling of flexible manufacturing system : a review. *International Journal of Production Research*, 56(7) :2464–2487, Apr. 2018.
- [51] L. Zhang, Y. Luo, F. Tao, B. H. Li, L. Ren, X. Zhang, H. Guo, Y. Cheng, A. Hu, and Y. Liu. Cloud manufacturing : a new manufacturing paradigm. *Enterprise Information Systems*, 8(2) :167–187, 2014.
- [52] R. Y. Zhong, X. Xu, E. Klotz, and S. T. Newman. Intelligent manufacturing in the context of industry 4.0 : A review. *Engineering*, 3(5) :616 – 630, 2017.
- [53] A. C. Zhou, S. Ibrahim, and B. He. On achieving efficient data transfer for graph processing in geo-distributed datacenters. In *37th IEEE International Conference on Distributed Computing Systems, ICDCS 2017, Atlanta, GA, USA, June 5-8, 2017*, pages 1397–1407, 2017.