

Mathieu Moze : Robotique et Industrie du Futur : bases et vecteurs de transition

PRÉSENTATION DE LA LEÇON INAUGURALE DU 28 SEPTEMBRE 2023

L'Industrie du Futur est un concept. Alors que le terme semble désigner le futur de l'industrie, son acceptation actuelle esquisse plutôt un objectif global dont les attentes, les termes et les moyens sont encore à définir précisément et font l'objet de nombreux débats.

Il part d'un constat globalement accepté, en particulier autour des années 2010 : celui que la désindustrialisation des pays « riches » au cours des décennies précédentes est préjudiciable au bien-être et au développement de leur économie, de leur société et de leurs individus.

Il a ensuite bénéficié d'un enthousiasme généralisé pour la technologie, avec notamment la prise de conscience du potentiel du numérique, pour aboutir à une certitude : la technologie va permettre d'adresser les enjeux de la réindustrialisation.

Une révolution industrielle organisée

L'Industrie du Futur est régulièrement présentée sous le terme industrie 4.0 pour souligner le fait qu'il s'agit de la 4^{ème} révolution industrielle. La première, qui eut lieu au début du XIX^e siècle, est marquée par la convergence de multiples facteurs, dont l'emblème est la mécanisation des moyens de production actionnés par une forte puissance rendue possible par l'utilisation d'énergie fossile, permettant la production à grande échelle de biens manufacturés. La deuxième fait référence à l'utilisation de l'électricité et de l'organisation du travail du début du XX^e siècle, aujourd'hui critiquée pour la place qu'elle donne au travailleur, et la troisième à l'automatisation et à l'arrivée de l'ordinateur à partir des années 60. La quatrième, actuelle, a pour base la communication et mène à l'industrie « intelligente » selon la relation intelligence = automatisation + communication. Cette nouvelle approche est globale et ne concerne pas uniquement l'industrie : elle implique la notion de Systèmes Cyber-Physiques (ou CPS de l'anglais Cyber-Physical Systems), dans laquelle le système n'est plus isolé mais est intégré dans un environnement, avec qui il échange de la puissance et des informations, et qu'il convient alors de connaître, d'analyser, voire de contrôler.

Faire face à de nouveaux enjeux

Jusqu'aux alentours de 2015, les documents à destination du grand public présentent essentiellement les technologies et les possibilités qu'elles ouvrent. L'enjeu affiché, lorsqu'il est exprimé, est alors clairement la productivité. Depuis, d'autres considérations sont également évoquées, ce qui peut s'expliquer par une prise de conscience et par une préoccupation croissante, notamment des pouvoirs publics, d'impératifs sociaux et environnementaux.

La transition, ou transformation, numérique est affichée comme un enjeu majeur par le gouvernement et des incitations ont été proposées au travers d'aides financières, depuis le début des années 2010 pour la création de preuves de concept qu'il s'agit encore de transformer en solutions pérennes, de guides de déploiement et de structuration de la filière au cours des cinq dernières années [AIF, 2021]. Les motivations, rarement présentées sur les premiers supports, sont essentiellement associées à un gain de productivité nécessaire au modèle social et créateur d'emplois, puisque des emplois de service seraient induits pour chaque nouvel emploi industriel et que la productivité bénéficierait d'un meilleur rendement du capital investi [Blanchet, 2022]. Alors que l'automatisation des décennies précédentes a permis d'augmenter le volume potentiel de production, l'augmentation de la production nécessitait celle du capital investi générant alors un accroissement du résultat des entreprises. Il est attendu par l'utilisation du numérique un accroissement du résultat à iso capital investi (augmentation du ROCE, Return On Capital Employed), par sa meilleure utilisation et par une augmentation des revenus de service, notamment connectés, peu gourmands en capital.

Au-delà de l'accroissement du bénéfice des investisseurs, des enjeux sociaux et environnementaux apparaissent maintenant majeurs. Ils sont liés aux transitions écologique et énergétique, au travers de la nécessité de réductions de gaz à effet de serre, de la consommation énergétique et des déchets. Les tensions internationales récentes amènent également à une prise de conscience de l'enjeu de l'approvisionnement en énergie, en produits finis et en matières premières, de leur extraction à leur acheminement, ou recyclées, au travers d'une économie circulaire.

Un concept plus qu'un modèle

La définition de l'Industrie du Futur n'est pas suffisamment aboutie pour servir de modèle mais des tendances globales sont acceptées. Le concept repose sur une redéfinition des relations existantes entre les éléments traditionnels de l'industrie : le produit, le client, la production, le développement, l'organisation et le management, la conception, les salariés, la société et l'environnement. La partie suivante présente brièvement le concept dont une description plus précise peut être trouvée dans [Blanchet, 2022] ou [Julien et Martin, 2021] par exemple.

Le produit est défini par le client, qui demande une réponse adaptée et individualisée et ne se contente plus d'une proposition générique. Il est évident que la production de masse du XX^e siècle ne peut adresser ces exigences spécifiques et les approches modulaires du début des années 2000, employées pour réduire les coûts en favorisant la réutilisation d'éléments standardisés, ne peuvent être utilisées que par la démultiplication d'options dont le nombre rend difficile la lecture de l'offre et ne permet finalement pas l'économie d'échelle, de la conception à la distribution, espérée. Il apparaît alors que la production de l'industrie du futur devra être individualisée et les moyens devront être reconfigurables à la volée. Des outils de prédiction de tendances globales, au travers par exemple d'analyses statistiques, seront disponibles afin de les anticiper. Les matières premières seront également commandées en temps réel auprès de fournisseurs sélectionnés en fonction de la disponibilité et des délais de livraison, ils seront alors essentiellement locaux et les éléments de Responsabilité Sociale et Environnementale des participants seront partagés et utilisés pour la sélection. L'approche MAAS (de l'anglais Manufacturing As A Service) va jusqu'à prédire une répartition d'unités de production de petite taille et non spécialisées, distribuées notamment dans les centres urbains et capables de reconfiguration rapide.

La simulation, la modélisation et l'analyse statistique deviennent les éléments principaux de la conception. La mise en place d'écosystèmes au travers de réseaux des systèmes de vente, d'approvisionnement, de production, de comptabilité, de marketing et d'organisation devient primordiale et au centre du concept. L'humain n'est plus concerné que par l'utilisation, voire la définition, du produit fini. Le salarié est moins impliqué dans l'opérationnel et son rôle se limite à la supervision de la fabrication ou aux services, en particulier à l'interface avec le client. Le management est également impacté : par la mise à disponibilité transversale de l'information, qui devient accessible partout où elle est nécessaire, les notions de remontée et de redescende ne sont plus pertinentes et la question se pose de l'intérêt d'une organisation pyramidale.

L'approche telle qu'envisagée sera alors agile, résiliente et responsable. L'objectif décrit passe par l'automatisation maximale de l'industrie, en non plus simplement de l'usine, avec pour pilier central la technologie.

Un agencement optimal de technologies existantes

Les technologies permettant la mise en place du concept de l'Industrie du Futur concernent évidemment celles de l'automatisation et de la communication. La communication permettant la mise à disposition de données, les technologies de leur traitement, informatiques, sont également habilitantes.

La robotique est l'un des emblèmes de l'Industrie du Futur. Les robots sont définis par une norme [ISO8373, 2021] comme étant des mécanismes programmables, actionnés avec un degré d'autonomie pour effectuer des opérations de locomotion, de manipulation ou de positionnement. La programmation couplée à l'autonomie, c'est-à-dire à la faculté de fonctionner sans opérateur, permet l'agilité nécessaire à la reconfiguration. Les robots industriels (à différencier des robots de service à destination des particuliers et des robots médicaux) sont adaptés au contexte industriel, ils ont été initialement imaginés et conçus pour cela. Les attentes associées sont évidemment celles de tout produit fini évoquées précédemment, avec quelques particularités. Les travaux se concentrent actuellement sur l'augmentation de la charge transportée, ce qui nécessite alors une structure plus rigide au détriment de la vitesse de déplacement et de l'énergie nécessaire au fonctionnement. L'allègement est possible mais la souplesse de structure associée entraîne inévitablement une diminution de la précision et donc de la qualité de fabrication. Le cercle vertueux de l'allègement est le défi des constructeurs, relevé à l'aide d'innovations dans la structure dont le développement de robots parallèles à câbles est emblématique. L'optimisation des trajectoires de travail est également une réponse actuelle au défi énergétique. Ces approches sont développées avec le support d'outils informatiques puissants, passant notamment par des technologies d'intelligence artificielle. Elles ont permis le développement de solutions multirobots dans lesquelles plusieurs robots sont synchronisés pour l'exécution d'une tâche, de manière série, par exemple sur une chaîne de production, ou de manière parallèle lorsque plusieurs robots opèrent dans le même espace de travail.

L'adaptation de l'exécution d'une tâche par un robot en fonction d'un autre robot, ou de son environnement, a également permis d'envisager le travail collaboratif d'un humain et d'un robot, pour lequel ce dernier n'est plus isolé dans une cage sécurisée et est alors désigné par le terme cobot. Il est utilisé en support à l'humain, les exosquelettes étant emblématiques de cette approche, et la sécurisation est encore à fiabiliser.

De manière générale des outils de simulation sont adaptés à l'étude de solutions de production, non seulement pour accélérer le temps de développement en évitant ou diminuant la phase de prototypage et essais, mais aussi pour prendre en compte les interactions des systèmes avec leur environnement, conformément à la notion de CPS pour laquelle l'analyse n'est plus possible sans moyen de calcul informatisé.

Des algorithmes sont nécessaires en temps réel et le traitement des données utilise la remontée d'informations des machines, issues de capteurs dits intelligents, donc communicants. Leur mise à disposition se fait au niveau de la machine au travers d'un SCADA (de l'anglais Supervisory Control and Data Acquisition), d'un ensemble de machines, au sein d'une cellule ou d'un atelier par exemple, au travers d'un MES (de l'anglais Manufacturing Exécution System), et de l'infrastructure de l'entreprise et de ses services fonctionnels au travers d'un ERP (de l'anglais Enterprise Resource Planning).

Le traitement est réalisé à chacun des niveaux en fonction de l'utilisation attendue des résultats et des logiciels sont maintenant disponibles et spécialisés pour cela. Les données traitées peuvent également remonter jusqu'au CRM (de l'anglais Customer Relationship Management) et il devient envisageable d'automatiser la prise en compte d'une demande spécifique d'un client, le déclenchement de l'approvisionnement en matière première, l'organisation de la fabrication, et la chaîne logistique.

Deux types de logiciels sont donc requis : ceux permettant la communication et la prise en compte des données entre machines et ceux permettant l'analyse, la supervision et la commande par des humains, de l'opérateur au responsable marketing.

Le premier bénéficie des avancées de l'automatisation des décennies précédentes, en particulier des théories de l'automatique et de la commande des systèmes dynamiques, et nécessite essentiellement des protocoles de communication définis et standardisés, objets de l'IloT (de l'anglais Industrial Internet of Things, ou plus généralement IoT en omettant le caractère industriel) implémentés sur une technologie matérielle adaptée à l'environnement industriel.

Le second est basé sur l'utilisation d'IHM (Interfaces Humain-Machine) dont le développement est souvent spécifique et lié aux caractéristiques de la machine considérée ou des données. Une autre application concerne le traitement statistique des informations. Au cours des dernières années, il a entraîné la mise en place d'organisations dédiées, voire l'émergence d'une discipline à part entière, la science des données (ou en anglais Data Science). Elle passe par la mise en place d'outils logiciels permettant la mise en évidence d'indicateurs dont la génération est issue d'une analyse par expertise ou de l'application de techniques d'apprentissage machine, couramment appelé Intelligence Artificielle. Ces dernières nécessitent des données d'entraînement et une infrastructure logicielle adaptée au stockage et au calcul, que ce soit dans le cas du traitement d'informations internes à l'entreprise, par exemple pour la détection d'anomalies dans la production ou dans l'approvisionnement, ou de celui d'informations externes, par exemples celles améliorant les performances du marketing ou l'accompagnement des clients dans la spécification de leurs besoins, en complément de formations adaptées et de moyens de simulation simples et intuitifs.

Repenser la place de l'humain

D'une analyse du potentiel technologique, l'approche Industrie du Futur est progressivement passée à celle d'une ébauche des évolutions souhaitables de l'industrie, voire de la société, des conséquences attendues et des moyens pour les obtenir. Le couplage des expertises techniques et sociologiques est devenu nécessaire et il apparaît que l'humain revient au centre des préoccupations : celui qui conçoit, celui qui fabrique, celui qui organise, celui qui utilise et celui qui s'insère et crée finalement une société respectueuse des valeurs qu'elle revendique.

Le rôle prédominant des technologies est non seulement lié à leurs niveaux de maturité atteints mais également à leur acceptation sociale croissante. Les réseaux, en particulier sociaux, sont maintenant d'un usage généralisé et la question d'une approche similaire dans l'industrie peut se poser. Il semble nécessaire de se rappeler que si les risques ne sont souvent pas critiques pour un usage domestique, de loisir, ils sont bien avérés pour un usage industriel sur lequel reposerait une organisation sociale et économique.

Des solutions sont étudiées pour sécuriser les transferts d'information entre les éléments technologiques, de l'introduction de pare-feux sur les couches intermédiaires des réseaux au chiffrement des informations voire de leur inscription sur des chaînes de blocs.

L'interaction entre les machines et les humains est à fiabiliser. Il s'agit évidemment pour la machine de rendre disponible les éléments techniques et environnementaux adaptés à une situation au travers d'une interface et il est alors classiquement considéré que leur pertinence doit être optimisée au travers d'une synthèse générée en temps réel. La question se pose de la fiabilité de cette synthèse et de son acceptabilité, c'est à dire de la confiance que l'homme lui accorde, en particulier si elle est à la base de sa prise de décision. Par exemple, la notion de synthèse implique que des choix sont faits par une machine de taire certaines informations et l'humain peut alors se demander si l'absence d'information tient lieu d'information ou encore si la machine n'oriente finalement pas la décision. Les travaux de Claude Shannon, en 1948 [Shannon, 1948a,b], permettent d'établir que la multiplication des données n'entraîne pas nécessairement un accroissement de l'information et leur pertinence, ou entropie, est à considérer. Dans le cas de la prise de décision industrielle, deux conséquences sont en jeu : celle de l'effet direct de la décision, par exemple une diminution de l'approvisionnement d'une certaine matière première qui pourrait entraîner une pénurie, et celle de la responsabilité puisque la prise de décision engage le décideur, il est redevable du premier effet et risque des sanctions. La question se pose alors du meilleur équilibre entre degré d'autonomie et responsabilité de l'humain.

Trois voies sont envisageables : transférer la responsabilité à la machine, c'est-à-dire à son concepteur ou producteur, laisser la responsabilité à l'utilisateur, c'est-à-dire notamment garantir son niveau de formation et d'information, ou enfin transférer la responsabilité à une autorité de certification de la machine. Ces voies ne sont pas mutuellement exclusives et sont par exemple mises en œuvre simultanément dans le cas des systèmes embarqués temps réel aéronautiques. Leur déploiement sur tout type de processus hybride numérique/humain pourrait être mis en place au travers de standards administratifs et juridiques, permettant une certaine modularité des processus, au-delà de celle des technologies.

Finalement, le concept Industrie du Futur est une réponse technologique aux défis industriels, environnementaux et sociétaux actuels. La technologie devient disponible pour cela, malgré la nécessité d'une diminution des coûts par l'innovation et par la standardisation des moyens, et le rêve de l'autonomisation de la production des biens est envisageable : la flexibilité, la résilience et l'agilité de la production est apportée par des solutions robotiques, pour faire, et algorithmiques, pour décider et organiser. En théorie, l'approche est optimale lorsque l'environnement est parfaitement modélisé et contrôlé. L'humain, par son autonomie, la variabilité de sa rationalité et des critères qu'il considère, dépendants d'éléments parfois subjectifs, est l'un des verrous du déploiement d'une automatisation globale, en particulier de l'industrie. Sa prise en compte devra encore être l'objet des développements à venir, non seulement pour assurer la transition vers la sécurisation et l'optimalité du tout automatisé, mais également, essentiellement, pour lui garantir la place qu'il souhaite dans un tel environnement, en fonction des motivations, ambitions et valeurs des individus qui le composent. L'industrie du futur, au travers notamment de la technologie, devra être un moyen vers cette révolution.

[AIF, 2021] Alliance Industrie du Futur, *Labellisation de la nouvelle Filière « Solutions Industrie du Futur »*, communiqué de presse du 9 avril 2021 (www.industrie-dufutur.org et www.solutionsindustriedufutur.org, consultés le 12 juin 2022)

[Blanchet, 2022] Max Blanchet, *L'industrie du XXI^e siècle, Les champions industriels de demain : agilité, résilience et responsabilité*, Eyrolles, 6 janvier 2022, ISBN 2416004751

[ISO8373, 2021] ISO8373:2021, *Robotique – Vocabulaire*, novembre 2021

[Julien et Martin, 2021] Nathalie Julien et Eric Martin, *L'usine du futur, Stratégie et déploiement, Industrie 4.0, de l'IoT aux jumeaux numériques*, Dunod, 5 mai 2021, ISBN 2100777025

[Shannon, 1948a,b] Claude E. Shannon, « *A Mathematical Theory of Communication* », Bell System Technical Journal, vol. 27, no 3, juillet 1948, p. 379-423 (DOI 10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x), no 4, octobre 1948, p. 623-666 (DOI 10.1002/j.1538-7305.1948.tb00917.x)

PARRAIN DE LA CÉRÉMONIE

Frédéric Sanchez est président de l'Alliance Industrie du Futur, président du comité stratégique de la filière Solutions Industries du Futur, président du directoire du groupe Fives.

Il sera représenté lors de la leçon inaugurale par **Thierry Valot**, directeur Innovation et Digital du groupe Fives.

BIOGRAPHIE DE MATHIEU MOZE

Mathieu Moze est professeur du Cnam, titulaire de la chaire Robotique et Industrie du Futur depuis 2021. Il a été formé à la mécanique en Angleterre (Kingston University) et à l'École nationale d'Ingénieurs de Tarbes dont il est ingénieur en mécatronique (2003). Après avoir obtenu un DEA en systèmes automatisés de l'Institut national Polytechnique de Toulouse (2003), il mène des recherches sur l'analyse des systèmes fractionnaires et la commande robuste au laboratoire de l'Intégration du Matériau au Système (IMS) et obtient un doctorat en automatique de l'Université de Bordeaux (2007), au sein de laquelle il complète son parcours par des travaux avec Bosch en Allemagne et par une formation de terrain, dédiée à l'innovation en PME.

Il rejoint l'industrie chez Safran avant d'intégrer rapidement, en 2010, la Direction Scientifique du Groupe PSA (Stellantis) où il mène et encadre des travaux de recherche avancée sur la mécatronique, le stockage électrique et la conduite autonome. Il y est successivement en charge du laboratoire commun avec l'IMS (Université de Bordeaux) dans le domaine de l'électronique et des systèmes de 2011 à 2015, du laboratoire commun avec le Key Lab for Machine Perception (Université de Pékin) dans le domaine du machine learning de 2017 à 2020 ainsi que du programme doctoral du groupe de 2019 à 2021. Il a également mené des travaux dans le domaine de la certification des turbomachines en 2016 et 2017, au Canada.