

Avant-propos

Dans un monde en perpétuelle évolution, la digitalisation des systèmes de production s'impose comme une nécessité incontournable. Cette dynamique est alimentée par des facteurs internes à l'entreprise, tels que l'intégration de nouvelles fonctionnalités et la recherche de performances opérationnelles, ainsi que par des exigences externes émanant de l'écosystème, telles que la traçabilité rigoureuse des composants lors de la fabrication ou des reportings de suivi disponibles en temps réel sur des plateformes partagées. L'industrie 4.0, avec ses promesses de flexibilité, d'autonomie et d'optimisation, redéfinit les contours de la fabrication moderne.

Cet ouvrage a pour objectif d'explorer les multiples dimensions de cette transformation dans les premiers chapitres, tout en mettant en lumière les concepts clés qui structurent la transition numérique des systèmes de production dans les chapitres suivants. En nous appuyant sur des méthodes de transition éprouvées au sein de la plateforme 4.0 de l'École nationale supérieure d'arts et métiers (ENSAM), nous offrirons un retour d'expérience enrichissant ainsi que des approches permettant de mieux encadrer les phases de transition. Nous aborderons également la complexité et les risques à considérer lors des étapes préparatoires.

Nous analyserons comment des solutions telles que le calcul intelligent et le jumeau numérique peuvent offrir des réponses adaptées aux défis contemporains. Par ailleurs, nous examinerons le rôle des systèmes de pilotage dynamique, qui favorisent l'ordonnancement des opérations en temps réel, garantissant ainsi agilité et réactivité au sein des chaînes de production. De plus, nous proposerons des architectures de conception intégrant la dimension communicationnelle, fonctionnelle et organique des systèmes industriels digitalisés.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers les doctorants qui ont contribué à cette recherche ; leur engagement et leurs idées ont été essentiels. Je remercie tout

particulièrement Patrick Le Men, qui a dirigé plusieurs centres de formation par apprentissage spécialisés dans les parcours d'ingénieurs. Son aide et ses conseils ont été inestimables tout au long de ce projet, enrichissant ce travail et approfondissant les connaissances présentées ici. Enfin, je remercie l'ensemble des collègues ainsi que les partenaires institutionnels et industriels qui ont rendu ce travail possible et pertinent.

Cet ouvrage s'adresse aux professionnels, chercheurs et étudiants désireux de comprendre les implications de cette transformation numérique. Il est conçu comme un guide pratique basé sur des approches expérimentées, offrant des perspectives éclairées sur les méthodes de transition vers des systèmes industriels digitalisés. Nous espérons que ces réflexions contribueront à une compréhension approfondie des enjeux de la transition digitale et encourageront des initiatives innovantes au sein de l'industrie.

Bienvenue dans cet univers fascinant et complexe, où machines communicantes et intelligence artificielle s'unissent pour façonner les systèmes de production industriels de demain.

Introduction

Le principe de la digitalisation industrielle fut présenté pour la première fois en 2011 à l'occasion du salon de la technologie industrielle d'Hanovre. Appelée aussi industrie 4.0, industrie du futur ou usine intelligente, elle correspond à la quatrième révolution industrielle dans la continuité des révolutions précédentes. L'histoire du progrès industriel a connu auparavant trois révolutions. La première apparaît à la fin du XVII^e siècle au Royaume-Uni, la deuxième à la fin du XIX^e siècle aux États-Unis et en Allemagne, et la troisième à la fin du XX^e siècle aux États-Unis et au Japon.

Généralement, les facteurs qui amorcent une révolution industrielle sont toujours les mêmes. Des inventions ou innovations technologiques, un marché favorable et des investisseurs prêts à prendre des risques. La vapeur, le fer et le charbon ont fait émerger la première révolution industrielle qui a propulsé au XVIII^e siècle l'Angleterre au rang de puissance économique. La deuxième, qui se situe entre 1890 et 1910, a vu le jour en Allemagne et aux États-Unis. Elle trouve ses fondements dans les nouvelles sources d'énergie comme l'électricité, le pétrole et dans l'industrie lourde. La troisième, qui se produit entre 1970 et 2000, débute aux États-Unis et au Japon. Initiée par des innovations technologiques multiples dans l'information, la communication, le nucléaire, et dans l'industrie du transport, elle ouvre ainsi la voie vers la mondialisation.

Depuis, le monde a connu une quatrième révolution, qui a engagé l'usine ultra-connectée grâce aux nouvelles technologies de l'information et de la communication, offrant ainsi de nouvelles fonctionnalités mieux adaptées au nouvel écosystème. Les bouleversements climatiques et leurs conséquences incitent certains experts à envisager un nouveau modèle de consommation, plus sobre et durable. Parallèlement, des réflexions émergent sur la place de l'humain dans cette transformation globale. Ces questionnements ouvrent la voie à une éventuelle cinquième révolution industrielle, qui irait bien au-delà des seules avancées technologiques.

Toutes les révolutions industrielles ont amené une nouvelle dynamique économique en raison des gains de productivité, offrant ainsi de nouveaux services ou rendant accessibles des produits à un grand nombre de consommateurs. Elles entraînent, par ailleurs, des évolutions sociétales et humaines. Malgré l'amélioration des conditions de travail, la population active a été souvent amenée à changer de métier ou à s'adapter, à migrer vers les bassins d'emploi, à accepter un contrôle strict des tâches ou encore à adopter des postures inappropriées pouvant impacter la santé.

L'humain n'a pas toujours été au centre des transformations industrielles. Les grands modèles économiques sur lesquels sont bâtis les projets d'investissements industriels privilégient les performances financières. Cependant, les conséquences des 2^e et 3^e révolutions industrielles sur l'environnement sont à présent incontestables. La pollution des sols, le réchauffement climatique, les particules fines ont réveillé une conscience collective sur la nécessité d'adopter un nouveau modèle de consommation durable, décarboné, équitable et centré sur le bien-être social de l'humain. Du fait des nouvelles fonctionnalités proposées, la 4^e révolution industrielle s'inscrit partiellement dans ce schéma. Autant les usines intelligentes pourront réduire l'empreinte énergétique, recycler *in situ* les chutes, limiter la matière première, etc., autant leur développement soulève des interrogations dont certaines sont stratégiques pour l'entreprise, telles que la cybersécurité ou encore la dépendance envers les plateformes numériques qui offrent des outils pour la digitalisation et le pilotage des systèmes de production.

Il est indéniable que les révolutions industrielles précédentes ont propulsé l'humanité dans un progrès sans commune mesure. Qui aurait pu imaginer un laboratoire scientifique mobile explorant la planète Mars grâce à une intelligence embarquée ? Mais dans le même temps, elles ont généré des inégalités nord-sud et des conséquences climatiques et environnementales irréversibles. Le défi, à présent, consiste à inscrire la 4^e ou par extension la 5^e révolution industrielle dans un schéma différent qui met sur la même échelle, la performance économique, le bien-être humain et la préservation de la planète.

D'une part, il est certain que les entreprises doivent intégrer ces bouleversements dès maintenant pour éviter d'en subir les conséquences à l'avenir. Peu importe leur taille, les entreprises jouent un rôle majeur dans la société : elles ne se contentent pas de fournir des produits ou des services, mais sont également des lieux de vie où les employés s'investissent pour créer de la valeur ajoutée, dont l'activité doit perdurer et prospérer. La digitalisation des processus industriels peut constituer une réponse partielle pour atteindre des objectifs tels que la décarbonation, la personnalisation, la

production locale, la recyclabilité, la durabilité, la maintenabilité, le partage, et même l'adaptation au télétravail, dans le cadre d'un nouveau modèle socioéconomique transparent.

Nous vivons une période charnière où l'humanité prend conscience de la nécessité de changer ses comportements, notamment en matière de consommation de produits et de services. Par ailleurs, les nouvelles technologies proposent des solutions prometteuses pour relever ces défis. Il revient désormais aux décideurs politiques de faire comprendre que cette transition nécessaire engendre des coûts.

Dans ce contexte, cet ouvrage explore la transition des entreprises vers la digitalisation de leurs systèmes de production. Il s'adresse aussi bien au grand public qu'aux étudiants et aux professionnels souhaitant comprendre les enjeux de cette transformation, notamment en termes de méthodologie, d'opportunités, d'emploi, de risques et d'intégration technologique. Les premiers chapitres offrent un aperçu des fondamentaux de l'industrie 4.0 et décrivent les principaux concepts qui interagissent pour former une ligne de production digitalisée. Enfin, une présentation détaillée de la plateforme 4.0 est proposée, dans laquelle des solutions ont été expérimentées par des chercheurs de l'École nationale supérieure d'arts et métiers de Paris. Les chapitres suivants présentent des expériences concrètes mettant en œuvre quatre fonctionnalités adaptées aux installations existantes.

Face à l'ampleur du sujet de l'usine du futur, des priorités ont été établies pour mettre l'accent sur la transition, tout en gardant à l'esprit que certains domaines nécessiteront une exploration plus approfondie à l'avenir. Cet ouvrage vise à fournir un socle de connaissances essentielles ainsi qu'un retour d'expérience concret, permettant de bien appréhender les difficultés tout en bénéficiant d'idées et de conseils pour la phase de déploiement. Les lecteurs observeront que la transition vers des systèmes industriels digitalisés n'est pas linéaire et requiert des travaux d'ingénierie complémentaires, dont les coûts sont souvent imprévus.

Le premier chapitre explore la complexité de l'ère numérique et son impact sur l'emploi et la formation, soulignant comment la transition numérique redéfinit les paradigmes économiques et professionnels. Il analyse les recherches actuelles, propose des stratégies globales et examine les modèles économiques émergents, mettant en lumière les défis et opportunités de la révolution numérique. Le deuxième chapitre présente une synthèse des nouvelles fonctionnalités offertes par l'industrie 4.0, regroupées en trois catégories : « préparation », « pilotage » et « transverse ».

Le troisième chapitre présente les principaux concepts technologiques soutenant un système industriel digitalisé. Ces concepts, interdépendants et essentiels pour une

transition réussie, incluent les notions de données et d'informations, de systèmes de fabrication cyberphysique, d'Internet industriel des objets, de systèmes industriels cyberphysiques, de pilotage dynamique et de calculs intelligents. Le quatrième chapitre aborde les notions de modélisation et d'architecture, en incluant les concepts généraux, un modèle de référence, une architecture donnée à titre d'exemple, et un modèle hybride de transition. La notion d'hybride fait référence à un modèle intermédiaire entre une version peu flexible de type pyramidal et une version entièrement distribuée, mais moins adaptée aux besoins des entreprises disposant d'un outil de production conventionnel. Ainsi, l'avantage de ce modèle intermédiaire est de faciliter l'intégration des installations et équipements industriels existants.

Le cinquième chapitre se consacre à la plateforme 4.0. L'ENSAM a lancé en 2015 un projet ambitieux visant à développer une ligne de production à l'échelle 1. Ce projet a pour objectif de mener des recherches pour acquérir de nouvelles connaissances, de valider et évaluer l'efficacité des solutions proposées, et renforcer les programmes de formation des ingénieurs avec des compétences adaptées aux exigences de l'industrie 4.0. À la fin de ce chapitre, une étude est présentée sur l'intégration d'un scanner 3D en tant que système industriel cyberphysique dédié au contrôle de la qualité au sein de la plateforme 4.0.

Le sixième chapitre explore les systèmes de pilotage avancés, essentiels pour atteindre les objectifs de performance. Ces systèmes utilisent des technologies telles que l'intelligence artificielle, l'analyse de données avancée et la connectivité en temps réel pour améliorer la prise de décision, optimiser le flux, réduire les temps d'arrêt et minimiser la consommation énergétique. Le septième chapitre examine les principes d'un jumeau numérique sous trois angles : niveaux de maturité, catégorisation et mode d'exécution. Il détaille ensuite une démarche de conception d'un jumeau numérique, dont l'expérimentation a été réalisée sur la plateforme 4.0, en soulignant les défis technologiques et l'importance des compétences pluridisciplinaires.

Le huitième chapitre est dédié au cloud manufacturing, une technologie prometteuse pour l'industrie digitalisée. Il est structuré en quatre sections : d'abord, une classification générale des différents types de Clouds, suivie d'une méthodologie et d'un *framework* innovants pour intégrer et adapter des ressources Cloud aux besoins des systèmes de production digitalisés. Enfin, le neuvième chapitre aborde la fonctionnalité « optimisation » dans le contexte de l'industrie 4.0. En effet, les données massives collectées par les systèmes cyberphysiques et le réseau IIoT, conjuguées aux puissantes ressources calculatoires du cloud computing, ouvrent de nouvelles perspectives d'optimisation. À cet effet, une approche méthodologique expérimentale a été proposée et mise en œuvre sur un cas réel d'optimisation des conditions de coupe. Un *pipeline*

algorithmique, qui a été conçu en utilisant des outils du Cloud, permet de déterminer les paramètres de coupe qui minimisent la consommation énergétique, les nuisances vibratoires et le temps d'opération. Les résultats obtenus montrent qu'une intégration structurée de différentes technologies 4.0 est prometteuse, mais elle révèle également une complexité intrinsèque, en particulier dans le cadre d'une optimisation dynamique multiobjectif.