



**P r o d u c t i o n i n d u s t r i e l l e
a u t o m a t i s é e e t i n f o r m a t i s é e**

Chapitre 0
Industrie 4.0 : concept et réalité

Qu'est-ce que l'**Industrie 4.0** dans le monde de la production ? S'agit-il de l'avènement de nouvelles technologies en milieu industriel ? S'agit-il singulièrement d'une mutation technologique ou d'un changement radical dans l'automatisation et l'informatisation de la production ? Ou ne s'agit-il que d'une époque ou d'un moment dans le long processus d'industrialisation de la production ? Car ce processus qui a démarré au milieu du XVIII^{ème} siècle avec sa mécanisation, s'est poursuivi au XIX^{ème} avec son automatisation et au XX^{ème} avec son informatisation.

En réalité, le concept d'Industrie 4.0 désigne plutôt l'état actuel de ce long processus qui voit des usines devenir assez « intelligentes » pour répondre à toute demande, pour optimiser l'usage de leurs ressources et mieux réutiliser leurs investissements. Ce concept est donc plus un *point d'orgue* ou point d'étape qu'une rupture majeure dans l'évolution du fonctionnement et du pilotage des systèmes de production industrielle. Il s'agit d'un moment propice à faire le point sur des mutations technologiques dont est l'objet ce long processus en devenir permanent. En effet, si les technologies de l'Industrie 4.0 sont bien présentes et largement opérantes, elles existent pour certaines d'entre elles depuis bien longtemps et concernent chacun des trois compartiments constitutifs de tout système de production industrielle : la transformation de matières, le traitement d'informations et la prise de décisions.

Ce sont, s'agissant d'abord de la transformation de matières, les capteurs, les actionneurs et les automates programmables constitutifs des systèmes automatisés ; ce sont aussi les machines-outils à commande numérique, les robots, les systèmes de convoyage ou de positionnement ; ce sont enfin les systèmes du contrôle non-destructif et de la maintenance, l'un et l'autre assistés par ordinateur ; etc.

S'agissant ensuite du traitement d'informations, ce sont les systèmes client-serveur, les grandes bases de données, les serveurs locaux ou distants, les réseaux informatiques et de télécommunications ; ce sont aussi les systèmes de gestion et de planification à court et moyen termes de la production, d'ordonnancement et de lancement des fabrications, de suivi des stocks et de déclenchement des approvisionnements, etc.

S'agissant enfin de la prise de décisions, ce sont, assistés par ordinateur, les systèmes bien sûr de dessin, mais surtout de conception de produits et de procédés ; ce sont les systèmes et outils d'organisation de la production par groupement analogiques, les systèmes et outils de veille autant de la clientèle que de la concurrence, les systèmes et outils de planification à long terme de la production, etc.

S'ils voient continuellement s'accroître leurs performances, ces systèmes et outils existent depuis bien longtemps. Pour autant, leur seule existence ne suffit pas pour voir une n^{ième} mutation industrielle dans l'émergence du concept d'Industrie 4.0. C'est plutôt la conjonction d'innovations ou l'apparition de différentes solutions technologiques qui incite à énoncer ce concept. L'énoncé de quelques-unes de ces innovations ou de ces solutions montrent que sont là encore concernés les trois mêmes compartiments de tout système de production industrielle : transformation de matières, traitement d'informations et prise de décisions.

Concernant à nouveau la transformation de matières, c'est, premier exemple, l'**impression 3D** ou fabrication additive qui ne donne plus forme à un objet par enlèvement mais par ajout de matière ; un procédé de fabrication permettant d'obtenir des formes complexes impossibles à réaliser par soustraction de matière. L'impression 3D est singulièrement pertinente pour non seulement réaliser des prototypes, mais aussi pour produire des petites séries ou répondre industriellement à des demandes particulières. C'est, second exemple, la « **cobotique** » : ces robots collaboratifs dont les performances sont associées aux compétences et aptitudes d'opérateurs humains. Assistés avec force et précision dans l'exécution de gestes physiques souvent répétitifs, ces opérateurs bénéficient par exemple en local d'un exosquelette ou à distance d'une télécommande ; ils conservent en revanche toute leur autonomie pour analyser les situations et décider des actions à

engager. C'est enfin, troisième exemple, le **contrôle non destructif** d'objets lors de leur fabrication ou sous contraintes d'utilisation : contrôle dimensionnel par contact ou au laser, capture d'images par thermographie, radiographie, ultrasons, ... ou après imprégnation par ressuage de produits pénétrants et fluorescents. Basés pour l'essentiel sur la saisie de données, ces systèmes de capture et de traitement d'images sont largement déployés sur les îlots ou lignes de fabrication ; ils facilitent et fiabilisent le contrôle-qualité avant d'éditer le rapport de conformité aux normes de l'objet fabriqué.

Concernant ensuite le traitement des informations, C'est d'abord le **Cloud Computing** et ses serveurs distants sur lesquels ne sont pas seulement sauvegardées, mais synchronisées des données traitées sur différents postes de travail ; des serveurs sur lesquels ces données sont mises à la disposition des utilisateurs qui y ont accès et qui s'en partagent à tout moment et en tout lieu le contenu. C'est ensuite l'**Internet des Objets** qui ne relie plus seulement des postes de travail et leurs utilisateurs, mais qui relie des objets portant un code-barres lu par un laser, un QR-code lu par un objectif photographique ou une étiquette RFID lue à courte distance par un émetteur-récepteur, ... Chaque objet est identifié par les informations qu'il véhicule ; il est suivi individuellement au fur et à mesure de ses déplacements, des changements d'état ou des modifications qu'il subit. Par son développement, l'Internet de objets contribue au développement du Big Data et de ses très grandes bases de données. Le **Big Data** en milieu industriel, ce sont d'énormes volumes de données générées et saisies, puis mises à disposition et partagées ; ce sont donc *a priori* de gros fichiers de données technico-commerciales auxquels ont accès les entreprises industrielles pour gérer les relations, en entrée, avec leurs fournisseurs ou sous-traitants et, en sortie, avec leurs distributeurs ou clients.

Concernant enfin la prise de décisions, c'est bien sûr encore le **Big Data** et ces très gros fichiers que ces mêmes entreprises ont appris à croiser pour générer les informations utiles à l'élaboration de leurs décisions stratégiques. Mais ce sont surtout peut-être les systèmes de **simulation en 3D** qui assistent les concepteurs d'objets ou de procédés au moment de décider, de choisir une solution plutôt qu'une autre. Ce sont des systèmes qui leur apportent des représentations fidèles de la réalité ; des systèmes qui leur permettent d'accéder virtuellement au réel, de s'affranchir de contraintes telle que la vision de l'intérieur d'un objet dans lequel bien sûr on ne peut pas « rentrer ». Ce sont par conséquent des systèmes qui leur donnent le droit à l'erreur ou leur permettent d'essayer sans risque avant de décider ou de choisir. Et ce sont enfin les systèmes de la **réalité augmentée** qui ajoutent à tout instant sur une image du réel des données auxquelles naturellement l'utilisateur n'aurait pas accès : par exemple l'utilisateur voit sur son écran ou dans ses lunettes connectées une image du réel à laquelle sont superposées des informations lui indiquant la prochaine action à conduire, guidant son geste, repérant les risques d'erreurs ou l'alertant sur celle qu'il vient de commettre, etc. Appliquées conjointement en milieu industriel, la simulation en 3D et la réalité augmentée permettent d'anticiper les contraintes futures d'une fabrication, puis d'entraîner pour les former les opérateurs sur leur futur poste de travail.

Deux autres familles d'innovations ou de solutions technologiques méritent ici d'être citées parce que concernant l'ensemble du système de production et pas l'un ou l'autre des trois sous-systèmes où sont transformées des matières, traitées des informations et prises des décisions. Ces deux familles d'innovations et de solutions technologiques ont pour noms : l'**Industrial Internet** et l'**Intelligence Artificielle**.

L'**Industrial Internet**, ça n'est ni plus ni moins que l'application de l'ensemble des normes et protocoles d'Internet au milieu industriel pour échanger ou transférer données et informations. Ce sont singulièrement les données générées par des machines ou postes de travail dans un processus de fabrication. Ce sont par conséquent les données saisies par des capteurs sur des îlots ou lignes de fabrication ; les données saisies sur des objets fabriqués, contrôlés ou stockés ; les données saisies sur des colis ou palettes expédiés et suivis durant leur transport. Mais ce sont aussi les commandes passées par des clients finaux, par les agences d'un réseau commercial ou par les partenaires d'un réseau de distribution. Et plus largement encore ce sont le transfert et le traitement des données requis pour répondre à des demandes-clients diversifiées ;

pour ajuster en temps réel la fabrication de produits semi-ouvrés ou de produits finis ; pour optimiser, dans un processus industriel, les conditions de fabrication, la consommation de matières premières et d'énergie, la mobilisation au sein des équipes de professionnels ou de collaborateurs, etc.

Quant à l'application de l'**Intelligence Artificielle** en milieu industriel, elle recouvre des solutions technologiques très différentes qui trouvent leur pertinence dans différents sous-ensembles du système de production. L'Intelligence Artificielle est, premier exemple de solution technologique, devenue incontournable pour concevoir et modéliser des systèmes complexes, pour en simuler les conditions d'utilisation et en prédire le comportement. Elle est, second exemple de solution, très présente dans la reconnaissance de formes, dans l'apprentissage ou l'optimisation de gestes physiques exécutés par un robot. Elle est, dernier exemple, présente dans l'analyse des défaillances et l'élaboration de diagnostics pour une maintenance prédictive de machines ou de lignes flexibles automatisés. Mais bien d'autres solutions technologiques relèvent aussi de l'Intelligence Artificielle lorsqu'il s'agit d'explorer de grandes bases de données pour détecter l'information pertinente. Ce sont aussi celles mises à profit dans le suivi qualitatif de gros volumes d'objets connectés, dans la sécurisation des systèmes d'informations et de pilotage, dans la planification à long terme d'une production et dans l'aide à la prise de décision des gestionnaires, ...

Bref, l'intelligence artificielle est en quelque sorte « la matière première » de la plupart des innovations technologiques précédemment citées et mise à profit pour transformer des matières, traiter des informations et prendre des décisions. Elle est faite d'un ensemble de théories et de techniques qui rendent des systèmes technologiques capables de faire plus que ce qui leur a été demandé, donc capables d'apporter une valeur ajoutée ; des systèmes qui, pour certains, ne fonctionnent plus seulement selon un mode strictement algorithmique, mais selon un mode devenu en partie heuristique ; des systèmes capables, par leurs performances, de remplacer l'homme, non plus seulement sur les tâches les plus dévalorisantes du milieu industriel, mais sur de plus en plus de tâches nobles.

Industrie 4.0 : concept ou réalité ? Cette question ne se pose plus pour ne s'être peut-être jamais vraiment posée car Industrie 4.0 est aujourd'hui à la fois un concept et une réalité ; ou plus exactement un double ensemble assez cohérent de concepts théoriques articulés et de réalités pratiques intégrées. Déclinés dans les dix chapitres qui suivent, ces concepts y sont en relation avec les technologies qui les concrétisent.

L'ouvrage commence par caler les concepts de marché, de produit et d'entreprise avant de s'interroger sur la mécanisation et l'automatisation des tâches, sur l'industrialisation et l'informatisation d'une production. En d'autres termes, l'ouvrage décline les composants et donc les invariants de tout système de **Production Industrielle Automatisée et Informatisée** qui devient un **système productique** ; c'est-à-dire un système capable à la fois de produire plus avec moins de moyens, de répondre à toute nouvelle demande, de satisfaire le client autant dans l'instant que dans le temps et de réutiliser ses investissements matériels et immatériels, en performances-machines et en compétences humaines.

L'ouvrage se veut exhaustif sur ce que fait toute entreprise industrielle qui automatise et informatise son système de production, qui le rend flexible pour rester compétitive. Il recouvre cinq grands thèmes traités en dix chapitres :

- production industrielle (chap. 1, 2 et 3),
- automatisation de la production (chap. 4 et 5),
- gestion de la production (chap. 6),
- technologies de la productique (chap. 7 et 8),
- méthodologie en productique (chap. 9 et 10).

Il s'adresse aux acteurs-clés du fonctionnement de tout système de production : les conducteurs de lignes et responsables de sites industriels pour la fabrication des produits, les techniciens et ingénieurs des bureaux d'études et bureaux des méthodes pour la conception respectivement des produits et des procédés, les gestionnaires de la production pour les achats et les approvisionnements et pour la planification et le lancement des fabrications. Il s'adresse donc à tous ceux en charge de la production (conduite, supervision et maintenance de systèmes) ou en charge d'un support à la production (définition d'architectures, conception de systèmes et suivi de production). Chez tous ceux à qui il s'adresse, l'ouvrage vise la maîtrise d'un corps de concepts préalablement durcis et nécessaires :

- pour se sensibiliser à une réalité industrielle et technologique,
 - pour accueillir des innovations techniques, organisationnelles et humaines en milieu industriel,
 - pour se préparer à mettre en œuvre et conduire des systèmes automatisés et informatisés flexibles.
-

Production industrielle automatisée et informatisée

Table des matières

Chapitre 1 - Entreprise et production

- Marchés et produits
- Evolution des marchés
- Evolution des produits
- Croissance de la complexité et de l'incertitude
- Stratégies d'adaptation
 - Le système-entreprise
 - L'adaptation du système de production
- Activités industrielles de production
 - Deux types de processus industriels
 - Trois types de fabrication
- Conclusion

Chapitre 2 - Informatique et production

- Mécanisation des tâches
 - De l'objet fabriqué à l'outil fabricant
 - De la conception du produit à la conception du procédé
- Automatisation des tâches
 - Dualité partie opérative – partie commande
 - D'un rapport physique à un rapport informationnel
- Emergence de l'informatique
 - De la logique câblée à la logique programmée
 - Dualité matériel - logiciel
- Intégration des systèmes
 - De la dissémination à l'intégration des technologies
 - Entre système maître-esclave et système client-serveur
 - Normalisation des systèmes et de leurs applications
- Inflation du concept d'information
 - Dualité matière – information
 - Dualité réalité observée – réalité représentée
 - Dualité réalité essayée – réalité simulée
- Conclusion

Chapitre 3 - Système de production industrielle

- Modélisation d'un système de production industrielle
 - Trois sous-systèmes
 - Système physique
 - Système informationnel
 - Système décisionnel
- Fonctionnement du système de production
 - Un carrefour : la gestion de production
 - Deux voies parallèles : le technique et le commercial
 - Production et fabrication
- Automatisation du système de production
 - Automatisation des trois sous-systèmes
 - Premier inventaire des XAO
- Conclusion

Chapitre 4 - Système productique

- Système intégré de production
 - Production intégrée par ordinateur (*CIM*-niveau 1)
 - Management intégré par ordinateur (*CIM*-niveau 2)
- Architecture d'un système intégré de production
 - Les niveaux de la productique
 - Les technologies de la productique
 - L'optimisation par l'intégration
- Domaine d'intervention de l'homme
 - Trois niveaux de décision
 - Rémanence des effets de la décision
- La productique : pourquoi faire ?
 - Compétitivité de l'entreprise
 - Simultanéité d'objectifs à atteindre
 - Gestion des aléas (du discontinu au continu)
- Conclusion

Chapitre 5 - Organisation et optimisation de la production

- Optimisation par standardisation de la production (flexibilité)
 - Dualité produit-procédé & conception généralisée
 - Standardisation des pièces & des nomenclatures
 - Standardisation des outils & des gammes
 - Organisation de la production par groupements analogiques
- Optimisation par planification de la production (productivité)
 - Conduite (temps réel) & planification (temps différé)
 - Planification de la production dans le temps
 - Gestion des données techniques & commerciales
- Optimisation par gestion de la production
 - Gestion par les délais de livraison : *Distribution Requirements Planning (DRP)*
 - Gestion par la prévision : *Materials Requirements Planning (MRP)*
 - Gestion par la demande : Double flux de produits & d'étiquettes (Kanban)
- Optimisation par « qualification » de la production (qualité)
 - Qualité orientée-client
 - Qualité orientée-production
- Conclusion

Chapitre 6 - Organisation et implantation de la fabrication

- Organisation de la fabrication
 - Types de systèmes automatisés et informatisés implantés dans un atelier
 - Types d'informations circulant dans un atelier
 - Types d'ateliers selon la variété des produits
- La maîtrise de l'espace et du temps dans l'atelier
 - La maîtrise de l'espace : sections homogènes / hétérogènes
 - La maîtrise du temps : différé / réel (long, moyen et court terme)
- Ateliers automatisés à pilotage centralisé ou réparti
 - Exemple d'un atelier automatisé à pilotage centralisé (usinage)
 - Exemple d'un atelier automatisé à pilotage réparti (assemblage)
- Conclusion

Chapitre 7 – Systèmes automatisés de fabrication

- Action – Information - Décision
 - Mécanisation et automatisation d'une opération de fabrication
 - De l'élément à l'ensemble : un modèle unique
- Organisation des systèmes automatisés
 - Organisation de la partie opérative (PO)
 - Les actionneurs physiques
 - Les capteurs de saisie de données
 - Organisation de la partie commande (PC)
 - Organisation des interfaces
 - La conversion d'énergie
 - La conversion de puissance
 - La conversion analogique/numérique ou numérique/analogique
- Conception de la partie commande
 - Représentation fonctionnelle (schémas-blocs)
 - Représentation logique (GRAFCET)
 - Représentation temporelle (chronogramme)
 - Représentation technologique (symboles normalisés)
- Conception de la partie opérative
 - Principes de conception
 - Premier principe : *s'affranchir de toute forme d'anthropomorphisme*
 - Deuxième principe : *bien séparer la physique du geste du geste physique*
 - Troisième principe : *bien s'affranchir du « réflex de l'étau »*
 - Choix d'un actionneur
 - Choix d'un capteur
- Conclusion

Chapitre 8 – Logique, interfaces et sécurité des systèmes automatisés

- L'information et son support
 - Informations logiques, numériques et analogiques
 - Conversion Numérique-Analogique (NA) / Analogique-Numérique (AN)
 - Acquisition de données : de la grandeur physique à l'information traitable
 - Traitement des données : l'Automate Programmable Industriel (API)
- Les interfaces Homme-Machine (IHM) et Machine -Machine (IM)
 - Dialogue avec les systèmes automatisés de fabrication
 - Supervision de la fabrication dans un système productique
 - Niveau 1 & 2 : partie commande et réseau local industriel
- La logique et son écriture
 - Les propositions logiques
 - Les variables logiques
 - Les opérateurs logiques de base
 - Les fonctions logiques combinatoires
 - Les deux théorèmes d'Auguste de Morgan
 - Les fonctions logiques séquentielles
- La sécurité des systèmes
 - Guide d'Étude des Méthodes de Marche et d'Arrêt (GEMMA - ADEPA 1981)
 - Sélection des modes nécessaires de marche et d'arrêt
 - Détermination des conditions de passage d'un mode à l'autre
 - Les trois boucles fonctionnelles du GEMMA
 - La localisation statistique des défaillances matérielles
 - Les notions de fonctionnement normal et de fonctionnement en mode dégradé
- Conclusion

Chapitre 9 – Productique : stratégie de développement

- La productique : pourquoi faire ?
 - Intégration d'une stratégie productique
 - Données quantitatives/qualitatives & données externe/internes
 - Croisement des six points de vue
 - Les trois points de vue économique, marketing et stratégique
 - Les trois points de vue technique, organisationnel et humain
- Stratégie de développement de la productique
 - Elaboration de la stratégie productique : détermination des projets
 - Etape A : analyse globale du système de production
 - Etape B : identification et priorisation des secteurs concernés
 - Etape C : choix technologiques et chiffrages des réalisations envisagées
 - Etape D : planification des réalisations et de leur intégration
 - Mise en œuvre de la stratégie productique : conduite des projets
 - Etape 1 : définir ET planifier
 - Etape 2 : concevoir ET réaliser
 - Etape 3 : mettre en œuvre ET exploiter
 - Etape 4 : maintenir ET faire évoluer
 - Trois règles simples
 - Règle 1 sur la prise en compte de fonctionnalités
 - Règle 2 sur l'intégration de solutions technologiques
 - Règles 3 sur l'évolutivité des investissements consentis
- Conclusion

Chapitre 10 – Productique : conduite de projets

- Modélisation de la conduite du projet
 - Entre méthode et modèle
 - Mission & directives
 - Fonction pilotage & fonction exécution
 - Ressources d'entrée & ressources de sortie
 - Indicateurs d'évaluation du projet
- Etude d'opportunité
 - Objectifs visés
 - Méthode de réalisation
 - Structure du rapport d'opportunité
- Cahier des charges
 - Objectifs visés
 - Méthode de rédaction
 - Structure du cahier des charges
- Evaluation économique
 - Objectif visé
 - Méthode de calcul
 - Inventaire des coûts et recettes imputables à la conduite du projet
 - Calcul du temps de retour sur investissement
- Plan d'action
 - Objectifs visés
 - Méthode d'établissement
 - Structure du plan d'action
- Pilotage d'un groupe de projet
 - Constituer le groupe de projet
 - Organiser le travail du groupe
 - Animer le groupe de travail
 - Promouvoir le groupe, ses membres et son œuvre
- Conclusion

Glossaire