

Avant-propos

C'est avec un immense enthousiasme que je vous présente cet ouvrage intitulé *Innovation et IoT : l'essor des industries intelligentes 4.0, 5.0 et de la société 5.0*. Il est l'aboutissement de plus de vingt années d'enseignement universitaire, de recherche appliquée et d'encadrement de projets dans les domaines des systèmes automatisés et de l'Internet des objets (IoT). Il s'adresse à tous ceux qui souhaitent comprendre les profondes mutations que traversent aujourd'hui les industries, portées par les révolutions technologiques de l'industrie 4.0, de l'industrie 5.0, et élargies à la vision sociétale de la société 5.0.

Les industries intelligentes, stimulées par des avancées telles que l'intelligence artificielle, l'IoT, les réseaux 6G, la robotique collaborative et l'informatique quantique, redéfinissent les logiques industrielles traditionnelles. Ces technologies permettent une connectivité renforcée, une gestion optimisée des ressources et une interaction inédite entre l'humain et la machine. Dans cette dynamique, l'IoT joue un rôle clé en interconnectant objets, capteurs et systèmes pour favoriser une production plus agile, intelligente et prédictive. L'industrie 4.0 s'est construite autour de cette automatisation avancée, portée par les systèmes cyber-physiques. Mais aujourd'hui, une nouvelle ère émerge : celle de l'industrie 5.0, où la technologie s'humanise et met en avant la durabilité, le bien-être et la collaboration homme-machine.

L'industrie 5.0 et la société 5.0 s'imposent ainsi comme des modèles centrés sur l'humain. Elles ambitionnent de concilier innovation technologique, progrès social et respect de l'environnement. Loin de se limiter à une course à la performance, elles proposent une vision équilibrée entre efficacité industrielle, éthique et responsabilité collective. L'industrie 5.0 intègre des principes tels que l'économie circulaire et la réduction de l'empreinte écologique, tandis que la société 5.0, conceptualisée au Japon, vise une société plus inclusive, dans laquelle les technologies de pointe contribuent à résoudre les grands défis économiques, sociaux et environnementaux.

Cet ouvrage explore en profondeur ces transitions vers des systèmes intelligents et responsables. Il met en lumière le rôle central de l'IoT et des systèmes embarqués dans cette évolution, tout en introduisant des technologies émergentes telles que les jumeaux numériques, l'analyse de données en temps réel, l'Edge Computing, le Vibe Coding, ou encore les réseaux 6G et l'IoT spatial. Pour faciliter la compréhension, des schémas techniques, études de cas, tableaux comparatifs et exemples pratiques viennent illustrer les concepts exposés.

Mais au-delà des aspects technologiques, cet ouvrage invite à réfléchir aux enjeux éthiques et sociétaux liés à cette transformation. Il interroge notre rapport à la donnée, à la vie privée, à la gouvernance algorithmique et à la soutenabilité environnementale. La société 5.0 nous rappelle que l'innovation doit être guidée par des valeurs humaines, pour une technologie véritablement au service de l'homme.

Structuré en plusieurs chapitres, l'ouvrage débute par une introduction aux fondements de l'IoT et des industries 4.0 et 5.0. Il développe ensuite les architectures techniques, les problématiques de cybersécurité, les normes industrielles et les cas d'application, avant de s'ouvrir aux perspectives futures telles que l'IoT spatial ou les technologies quantiques. Enfin, il propose une réflexion sur les conditions d'une innovation durable et éthique.

Mon ambition est d'offrir ici un ouvrage à la fois accessible, structuré et ancré dans les réalités du terrain, afin d'accompagner les étudiants, les professionnels et les passionnés dans leur compréhension et leur appropriation de ces enjeux majeurs. J'espère qu'il saura éveiller votre curiosité, nourrir votre réflexion et, pourquoi pas, inspirer vos projets futurs.

Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la concrétisation de ce projet, ainsi que vous, chers lecteurs, pour l'intérêt que vous portez à ces thématiques déterminantes pour notre avenir commun. Ensemble, explorons les horizons que nous ouvrent l'IoT, l'intelligence artificielle et les technologies émergentes pour bâtir une industrie plus intelligente, plus durable et plus humaine.

Cet ouvrage s'appuie sur une convergence multidisciplinaire de concepts, de technologies et de visions qui reflètent l'évolution vers des systèmes intelligents, durables et éthiques. Parmi les thématiques principales abordées :

- IoT (Internet des objets), IIoT (Internet industriel des objets), systèmes embarqués, systèmes cyber-physiques, jumeaux numériques, robots collaboratifs, intelligence artificielle, automatisation intelligente, Edge Computing, informatique quantique, réseaux 6G, IoT spatial, blockchain ;

- les enjeux liés aux données sont également traités, à travers les notions de gouvernance des données, cybersécurité, résilience des systèmes et interopérabilité ;
- sur les plans industriel et environnemental, l’ouvrage explore des approches orientées vers l’économie circulaire, la durabilité et la collaboration homme-machine ;
- une attention particulière est portée aux dimensions éthiques et sociétales, autour de la société 5.0, l’ingénierie 5.0, l’éducation 5.0, l’université 5.0, la gouvernance 5.0 et l’éthique 5.0, qui fondent une vision d’innovation responsable et inclusive.

Bonne lecture à toutes et à tous.

Introduction

I.1. Contexte de l'industrie 4.0 et 5.0

Au cours de son histoire, l'industrie a traversé plusieurs révolutions majeures, chacune marquée par des ruptures technologiques décisives. La première révolution industrielle, initiée vers 1784, a introduit la mécanisation grâce à l'usage de la machine à vapeur et de l'énergie hydraulique, amorçant ainsi le passage de l'artisanat à une production mécanisée. La deuxième, autour de 1870, a vu l'essor de l'électricité et l'introduction de la chaîne de montage, donnant naissance à la production de masse et accélérant l'industrialisation des sociétés. Dans les années 1970, la troisième révolution industrielle s'est appuyée sur l'informatique et l'électronique pour automatiser les processus, grâce notamment aux ordinateurs et aux systèmes programmables, marquant une nouvelle ère d'efficacité industrielle.

Au début du XXI^e siècle, l'industrie 4.0, apparue autour de 2010, a inauguré l'ère du numérique industriel en intégrant les systèmes cyber-physiques, l'Internet des objets (IoT), le Big Data et l'intelligence artificielle. Cette convergence technologique a donné naissance à des usines intelligentes, interconnectées et capables d'optimiser leurs processus en temps réel. Aujourd'hui, l'industrie 5.0, amorcée à partir de 2020, marque un tournant vers une approche plus humaine et durable. Elle privilégie la collaboration entre les opérateurs humains et les robots (cobots), la personnalisation de la production, ainsi que l'adoption de technologies cognitives et de principes issus de la bioéconomie. En parallèle, la société 5.0 émerge comme une vision intégrée du progrès, visant à mobiliser les technologies avancées – telles que l'IA, l'IoT et la robotique – pour répondre aux grands défis sociétaux, en conciliant performance économique, bien-être humain et durabilité environnementale (Lasi *et al.* 2014 ; Frank *et al.* 2019 ; Adel 2022).

Comme l'illustre la figure I.1, qui retrace l'évolution des révolutions industrielles depuis la mécanisation (1.0) jusqu'à l'ère collaborative (5.0), ces transformations reflètent une industrialisation en constante accélération. Chaque étape, marquée par des ruptures technologiques comme l'électrification (2.0), l'automatisation (3.0) ou la numérisation (4.0), a conduit à une production toujours plus intelligente, interconnectée et, aujourd'hui, résolument centrée sur l'humain avec l'industrie 5.0.

Cette progression linéaire, tracée de 1780 à 2050 sur la frise chronologique, intègre aujourd'hui des exigences écologiques et sociétales, marquant le passage d'une logique purement technologique à une approche systémique équilibrant innovation et durabilité. En adoptant dès maintenant des modèles économiques circulaires et équitables, les acteurs industriels peuvent fonder des innovations véritablement responsables tout en préservant les ressources naturelles. Cette collaboration renforcée entre entreprises, gouvernements et communautés locales dessine à l'horizon 2050 un nouveau standard industriel, où performance et respect de l'environnement convergent pour le bien-être collectif.

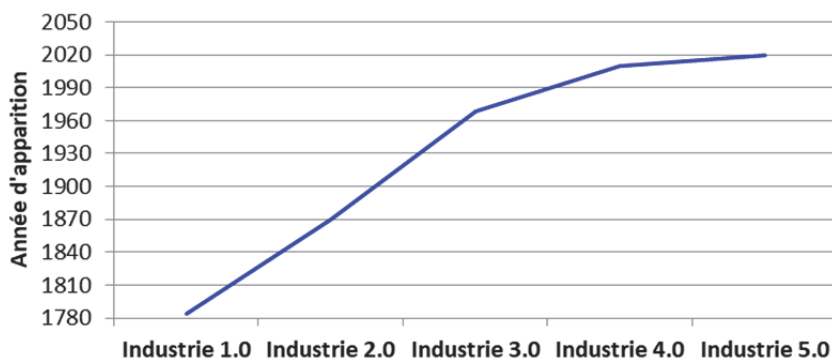


Figure I.1. Évolution temporelle des révolutions industrielles

La figure I.2 relate de manière progressive et synthétique l'évolution des révolutions industrielles, de l'industrie 1.0 à la société 5.0, en soulignant les ruptures technologiques et les changements de paradigme associés à chaque époque (Mourtzis *et al.* 2022). L'industrie 1.0 (1784), marquée par la mécanisation industrielle, repose sur l'utilisation de la machine à vapeur, de l'énergie hydraulique et de la production mécanique. Elle laisse place à l'industrie 2.0 (1870), fondée sur la production de masse rendue possible par l'électricité et les chaînes d'assemblage. Avec l'industrie 3.0 (1969), l'automatisation devient numérique grâce à l'introduction des ordinateurs, de l'électronique, des automates programmables et des systèmes informatiques. Ce

tournant est suivi par l'industrie 4.0 (2010), souvent désignée comme l'usine intelligente, qui intègre des systèmes cyber-physiques, l'Internet des objets (IoT), l'intelligence artificielle, le Cloud Computing et les données massives (Big Data) pour une production connectée et adaptative.

La transition actuelle vers l'industrie 5.0 (2020+), centrée sur la collaboration homme-machine, marque un recentrage sur l'humain dans un environnement technologique avancé. Cette ère mobilise des systèmes cognitifs, la cobotique, la robotique intelligente, la personnalisation, la bioéconomie, les ressources renouvelables et la durabilité. En parallèle, émerge la société 5.0 (2020+), qui dépasse le seul cadre industriel pour viser un modèle global d'innovation orienté vers le bien-être humain. Elle s'appuie sur les mêmes technologies (IA, IoT, Big Data) mais dans une finalité plus large : résoudre les défis sociaux et environnementaux, réconcilier progrès économique et valeurs humaines. Ainsi, cette représentation permet de visualiser non seulement l'évolution technologique, mais aussi l'élargissement des enjeux – des gains de productivité à la recherche d'un équilibre durable et éthique entre technologie, société et environnement (Zhang *et al.* 2017a, 2017b).

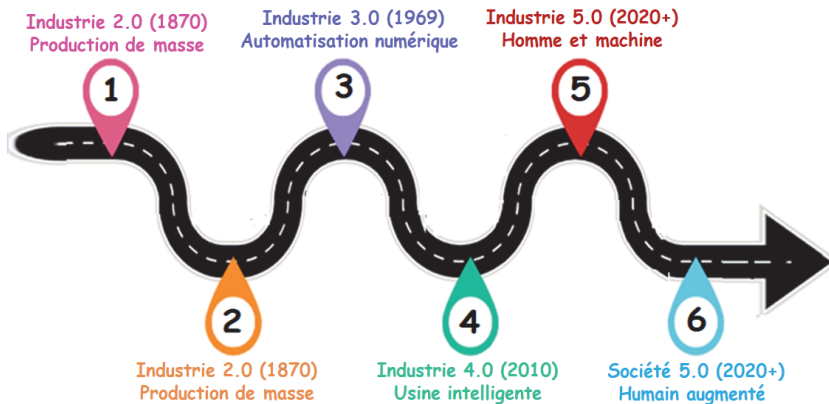


Figure I.2. Évolution des révolutions industrielles et société 5.0

Ainsi, ces deux figures I.1 et I.2 montrent une vision complète et complémentaire de l'évolution industrielle. Ensemble, ces représentations montrent comment l'industrie a évolué d'une approche purement mécanique et productive vers un écosystème complexe intégrant innovation technologique, dimension humaine et responsabilité écologique. La société 5.0, point d'aboutissement de cette double évolution et symbole de la synthèse entre progrès technique et bien-être collectif, sera détaillée dans les prochains chapitres.

Parmi ces révolutions industrielles, l'industrie 4.0 marque un tournant décisif en intégrant pleinement le numérique au cœur des systèmes de production. L'industrie 4.0 se caractérise par l'intégration des systèmes cyber-physiques (CPS), la connectivité à travers l'Internet des objets (IoT) et l'exploitation des données massives (Big Data) pour l'optimisation et la prise de décisions. Cette révolution vise à créer des « usines intelligentes », où les machines, les capteurs et les processus sont interconnectés pour réagir en temps réel aux changements de la production ou de la demande.

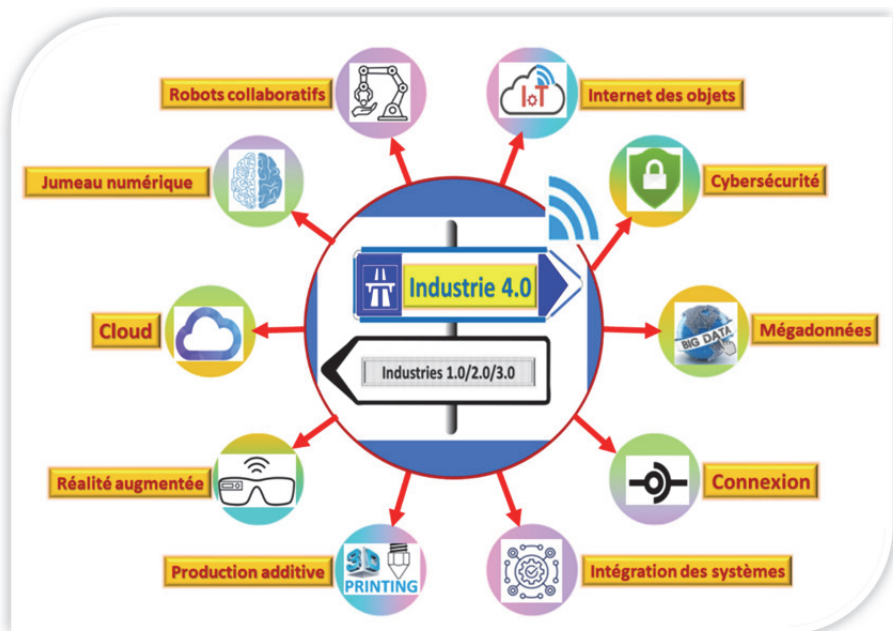


Figure I.3. La révolution de l'industrie 4.0

La figure I.3 présente les composants fondamentaux de l'industrie 4.0, représentés sous forme d'un réseau autour d'un panneau de transition depuis les anciennes industries (1.0/2.0/3.0). Les technologies mises en avant incluent l'Internet des objets (IoT), la cybersécurité, le Cloud, les mégadonnées (Big Data) et l'intégration des systèmes. Elle souligne également l'importance des robots collaboratifs, des jumeaux numériques, de la réalité augmentée et de la production additive dans la transformation numérique des usines. Cette révolution vise à rendre la production plus intelligente, connectée et efficiente.

Cependant, au-delà de l'industrie 4.0, l'industrie 5.0 apporte une dimension humaine et collaborative. Contrairement à son prédécesseur, elle met l'accent sur l'interaction harmonieuse entre les humains et les machines. Elle introduit des concepts tels que les cobots (robots collaboratifs) et favorise un équilibre entre l'efficacité technologique et les aspirations sociétales, telles que la durabilité, l'éthique et le bien-être des travailleurs.

L'industrie 4.0 et l'industrie 5.0 ne se contentent pas de transformer les processus de production. Elles redéfinissent également la manière dont les entreprises conçoivent leurs stratégies, interagissent avec leurs clients et répondent aux enjeux sociétaux et environnementaux. En ce sens, ces paradigmes constituent un tournant décisif pour les écosystèmes industriels mondiaux.

I.2. Émergence de l'IoT : un catalyseur de transformation

I.2.1. Historique de l'Internet des objets

Le terme « Internet des objets », qui est au cœur de ces transformations industrielles, a été introduit par Kevin Ashton en 1999 lors d'une présentation chez l'entreprise multinationale américaine Procter & Gamble (P&G) (Ashton 2009).

À cette époque, la RFID (*Radio Frequency Identification*) est une technologie qui utilise des ondes radio pour identifier et suivre des objets à distance. Elle repose sur des étiquettes électroniques (tags) et des lecteurs, permettant de collecter des données sans contact physique) commençait à être utilisée dans la chaîne d'approvisionnement de l'entreprise P&G. Ashton a eu l'idée de relier cette technologie émergente à un concept déjà très populaire : l'Internet.

En combinant ces deux idées, il a inventé l'expression « Internet des objets », qui décrit un monde où les objets physiques (comme les produits suivis par RFID) sont connectés et communiquent entre eux *via* Internet, sans nécessiter d'intervention humaine directe. Cette expression est devenue fondamentale dans le domaine des technologies connectées, car elle a ouvert la voie à une vision où les objets eux-mêmes génèrent et partagent des données, transformant ainsi notre façon d'interagir avec la technologie.

Bien qu'il en soit l'initiateur, Ashton précise que l'Internet des objets (*Internet of Things*, IoT) représente une évolution où les objets deviennent des sources clés d'information, réduisant la dépendance aux humains pour la collecte de données.

L'Internet des objets révolutionne notre environnement en connectant des objets physiques à Internet, leur permettant de collecter, échanger et analyser des données pour devenir des acteurs autonomes au sein d'écosystèmes intelligents.

Cette transformation connaît une croissance exponentielle : d'à peine 1 milliard d'objets connectés en 2010, le parc mondial est passé à 20 milliards en 2015 et devrait atteindre 75 milliards en 2025, pour dépasser les 100 milliards d'ici 2030 (figure I.4).

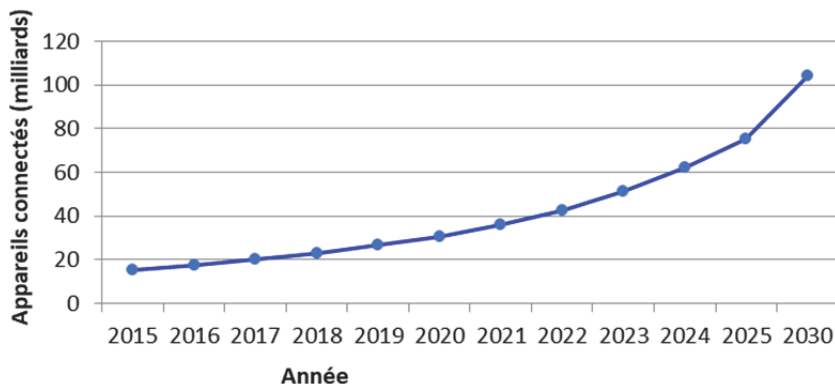


Figure I.4. Évolution des objets connectés IoT (2015-2030)

Cette courbe de croissance révèle deux phases marquantes : une progression régulière jusqu'en 2025 (malgré un léger ralentissement en 2019-2020 probablement lié à des facteurs économiques), suivie d'une accélération brutale portée par l'adoption massive dans les industries 4.0, les villes intelligentes et la santé connectée. Cette prolifération sans précédent, tout en ouvrant des perspectives immenses pour l'efficacité opérationnelle, pose des défis cruciaux en matière de cybersécurité, de gestion des données et de scalabilité des infrastructures réseaux (Mhamdi *et al.* 2022).

I.2.2. L'Internet des objets industriels (IIoT) : une révolution multidimensionnelle pour l'industrie du futur

L'Internet des objets industriels (IIoT) constitue la véritable colonne vertébrale numérique de l'industrie 4.0. En apportant une connectivité intelligente à l'ensemble des dispositifs industriels – des capteurs aux machines-outils, en passant par les systèmes de contrôle et les automates programmables –, il permet une transformation en

profondeur des processus de production. Grâce à des réseaux à latence ultra-faible, les données générées sur le terrain peuvent être collectées, analysées et exploitées en temps réel, ouvrant la voie à des environnements industriels adaptatifs, interconnectés et hautement réactifs. Cette fusion entre les mondes physique et numérique repose sur trois piliers fondamentaux : une infrastructure dense de capteurs intelligents, des réseaux de communication fiables et à faible latence et des plateformes d'analyse avancées intégrant des technologies comme l'intelligence artificielle, l'apprentissage automatique et le traitement décentralisé (Da Xu *et al.* 2014).

L'essor de l'IIoT s'accompagne d'une évolution significative de l'architecture informatique sous-jacente, désormais organisée en trois couches de traitement inter-dépendantes : le Cloud Computing, le Fog Computing et le Edge Computing (figure I.5). Cette organisation distribuée permet de répondre aux nouveaux défis liés à la volumétrie, à la variabilité et à la vélocité des données industrielles (Al-Shareeda *et al.* 2024).

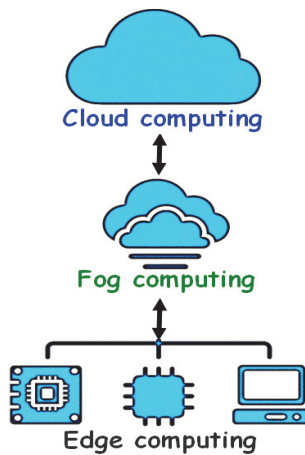


Figure I.5. Interaction entre Cloud, Fog et Edge Computing

À l'échelon supérieur, le Cloud Computing repose sur de vastes centres de données distants offrant une puissance de calcul et une capacité de stockage quasi illimitées. Il est idéal pour l'analyse de données massives, l'entraînement de modèles d'intelligence artificielle, la gestion de la maintenance prédictive à grande échelle, ou encore l'accès à des tableaux de bord globaux. Cependant, son principal inconvénient réside dans la latence induite par l'éloignement des centres de calcul, qui peut être rédhibitoire dans des contextes où la réactivité en temps réel est cruciale.

Pour pallier cette limitation, une couche intermédiaire s'est développée : le Fog Computing. Localisé à proximité des équipements de terrain, dans des passerelles industrielles, des micro-data centers ou des équipements réseau intelligents, le Fog permet de prétraiter les données au plus proche de leur source tout en bénéficiant d'une capacité de calcul raisonnable. Il agit comme un filtre intelligent, agrégeant, analysant et priorisant les flux de données avant leur envoi vers le Cloud. Cela permet de réduire la charge réseau, d'abaisser la latence et de conserver une certaine autonomie analytique. Le Fog est particulièrement adapté aux environnements industriels complexes tels que les systèmes de transport intelligents, les réseaux énergétiques décentralisés ou les chaînes de production automatisées nécessitant une supervision locale renforcée (Al-Shareeda *et al.* 2024).

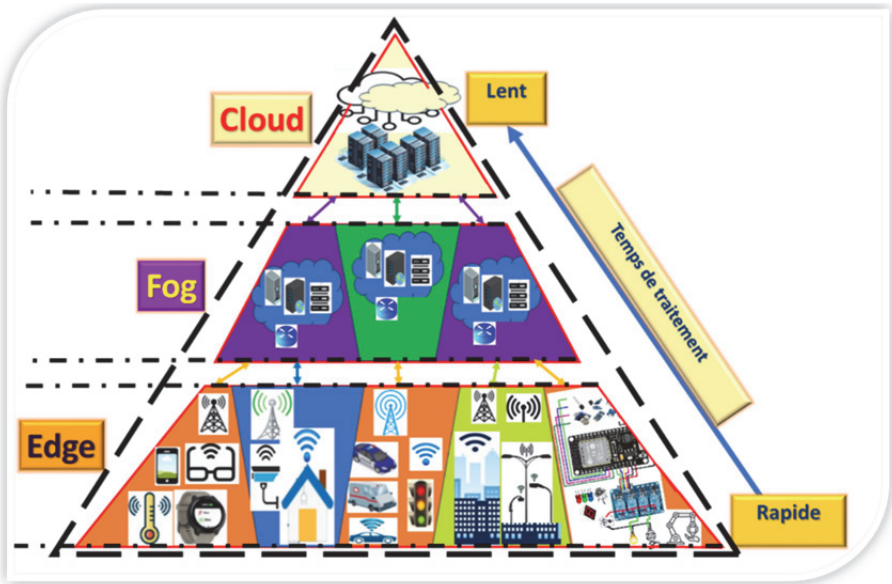


Figure I.6. Niveaux de traitement des données IoT industriel

À la base de cette hiérarchie (figure I.6), le Edge Computing se distingue par sa capacité à effectuer le traitement directement au niveau des dispositifs ou à très faible distance. Il s'appuie sur des composants embarqués comme les cartes électroniques programmables (Raspberry Pi, Arduino, ESP32, ZedBoard, etc.), les capteurs intelligents capables d'analyse locale, ou encore les ordinateurs industriels compacts. Cette approche permet une prise de décision instantanée et autonome, essentielle pour la réactivité des systèmes critiques. Dans un contexte industriel, cela se traduit

par exemple par la détection immédiate d'un défaut sur une ligne de production et l'exécution automatique d'une action corrective, sans dépendre d'une infrastructure distante.

Cette architecture distribuée à trois niveaux offre une synergie efficace entre réactivité locale, coordination régionale et optimisation globale. Elle trouve de multiples applications dans des domaines variés. Dans les véhicules autonomes, l'Edge traite en temps réel les données des capteurs embarqués pour éviter un obstacle ; le Fog coordonne les véhicules à l'échelle d'un quartier pour optimiser les trajets ; le Cloud, quant à lui, analyse les données agrégées pour améliorer les algorithmes de navigation. En domotique, un thermostat intelligent ajuste la température grâce à l'Edge, un système de gestion de bâtiment régule l'ensemble des appartements grâce au Fog, tandis que le Cloud stocke l'historique énergétique pour optimiser la consommation. Dans l'industrie 4.0, les capteurs Edge surveillent l'état des équipements, le Fog supervise les ateliers et le Cloud anticipe les besoins en maintenance ou optimise la chaîne d'approvisionnement.

Ainsi, l'architecture Cloud-Fog-Edge constitue le socle technologique de l'industrie 4.0, en répondant simultanément aux exigences de performance, de résilience, de sécurité et de scalabilité. L'Edge joue un rôle central dans les environnements nécessitant des décisions immédiates, tandis que le Fog assure une coordination locale intelligente, et que le Cloud fournit une vision stratégique et analytique à long terme. L'intégration harmonieuse de ces trois niveaux est la clé d'une industrie véritablement intelligente, connectée et adaptable aux défis du futur.

Le tableau I.1 résume la structuration des niveaux de traitement des données de l'IoT industriel.

L'IIoT démontre son impact concret à travers plusieurs leviers opérationnels majeurs. Les entreprises constatent d'abord une optimisation significative des flux de production, avec des temps d'arrêt réduits de 30 % grâce aux capacités prédictives du système. La productivité globale des équipements s'améliore quant à elle de 25 à 40 %, tandis que les économies d'énergie atteignent régulièrement 20 % grâce à une gestion plus fine des ressources. Mais la véritable valeur ajoutée de l'IIoT réside dans sa capacité à transformer en profondeur les modèles économiques traditionnels. Il permet l'émergence de services innovants comme la maintenance conditionnelle en abonnement ou la production sur demande, tout en offrant une transparence totale sur la chaîne de valeur. Cette visibilité accrue donne aux décideurs industriels des outils d'analyse et de pilotage d'une précision inédite, marquant une rupture avec les méthodes traditionnelles de gestion de production.

Niveau	Description	Principales fonctionnalités	Temps de traitement	Nombre d'équipements
Cloud Computing	Traitement centralisé et stockage de données à grande échelle	Traitement Big Data Logique métier (<i>Business Logic</i>) Stockage des données	Lent	Milliers d'équipements
Fog Computing	Traitement distribué intermédiaire, proche des équipements Edge	Réseau local Analyse des données en temps réel Virtualisation/Standardisation	Moyen	Millions d'équipements
Edge Computing	Traitement local au plus proche des capteurs et actionneurs	Gestion des données en temps réel Visualisation à la source Systèmes embarqués et PC industriels Passerelles (<i>gateways</i>) Stockage local des micro-données Acquisition, prétraitement et filtrage des données (capteurs/contrôleurs)	Rapide	Milliards d'équipements

Tableau I.1. Structuration des niveaux de traitement des données de l'IoT industriel

Cette transition numérique ne s'effectue pas sans obstacles significatifs. Les entreprises doivent notamment relever trois défis cruciaux : sécuriser des infrastructures industrielles de plus en plus exposées aux cybermenaces, assurer l'interopérabilité entre des systèmes souvent hétérogènes et réussir l'intégration délicate avec les équipements existants. Pour surmonter ces écueils, une transformation globale s'impose – allant bien au-delà de la simple adoption technologique. Elle nécessite des investissements ciblés, une montée en compétences des équipes, et surtout une refonte en profondeur des processus opérationnels. Loin d'être une option, cette mutation s'est imposée comme une condition *sine qua non* pour rester compétitif dans le paysage industriel actuel. L'IIoT, en tant que catalyseur de cette révolution, pose déjà les fondations de l'industrie du futur. Dans cette prochaine étape, l'intelligence artificielle, les robots collaboratifs et les impératifs environnementaux fusionneront pour donner naissance à des unités de production intelligentes, capables de s'adapter en temps réel tout en minimisant leur impact écologique. Cette évolution promet non seulement

d'optimiser les performances industrielles, mais surtout de créer de nouveaux champs de valeur ajoutée, redéfinissant ainsi les règles de la compétitivité manufacturière.

1.2.3. Écosystèmes connectés

L'IoT agit comme un catalyseur en permettant une gestion plus efficace des ressources, une production intelligente et une maintenance prédictive. Par exemple, les capteurs IoT intégrés aux machines peuvent détecter les anomalies avant qu'elles ne conduisent à des pannes coûteuses, réduisant ainsi les temps d'arrêt imprévus. Ainsi, les capteurs IoT collectent des informations précieuses sur les performances des machines, les conditions de production et la qualité des produits. Ces données, une fois analysées grâce à l'intelligence artificielle (IA) et à l'analyse des données (*data analytics*), permettent une prise de décision plus rapide et plus précise. Les systèmes de maintenance prédictive utilisent des algorithmes pour identifier les problèmes potentiels avant qu'ils ne surviennent, évitant ainsi des arrêts de production coûteux. L'intégration de l'IoT avec d'autres technologies émergentes, comme l'intelligence artificielle et la robotique, ouvre des perspectives innovantes pour l'automatisation et la personnalisation des produits.

En outre, l'IoT favorise une flexibilité accrue dans la production, permettant une personnalisation des produits à grande échelle (*mass customization*). Les entreprises peuvent répondre plus efficacement aux besoins des clients tout en optimisant leurs ressources et en réduisant les déchets. Ainsi et avec son développement, l'IoT qui a le potentiel de révolutionner de nombreux secteurs (figure I.7), s'intègre dans divers domaines notamment l'industrie connectée, les villes et les maisons intelligentes, l'agriculture, la santé, l'énergie et l'environnement ainsi que les systèmes de transport intelligents (Trab *et al.* 2018 ; Zouinkhi *et al.* 2019 ; Almalki et Soufiene 2021 ; Kilani *et al.* 2022).

L'Internet des objets s'applique à de nombreux domaines pour améliorer l'efficacité et l'optimisation des ressources. Dans les villes intelligentes, il permet de gérer la circulation, l'éclairage public, la collecte des déchets et la qualité de l'air, contribuant ainsi à rendre les villes plus durables. Pour la gestion de l'eau, les systèmes IoT surveillent la consommation, détectent les fuites en temps réel et optimisent l'approvisionnement pour une utilisation plus rationnelle des ressources hydriques. Dans le secteur de la logistique, l'IoT améliore la chaîne d'approvisionnement en assurant un suivi en temps réel des marchandises, en optimisant les itinéraires et en garantissant une meilleure gestion des stocks. Le commerce de détail bénéficie également des technologies IoT grâce aux caisses automatiques, aux rayons intelligents surveillant les stocks et à l'analyse des comportements d'achat pour personnaliser les offres. En santé, l'IoT joue un rôle clé dans la surveillance des patients à distance,

l'utilisation des dispositifs médicaux connectés, la gestion des stocks hospitaliers et l'amélioration des soins *via* l'analyse des données de santé.

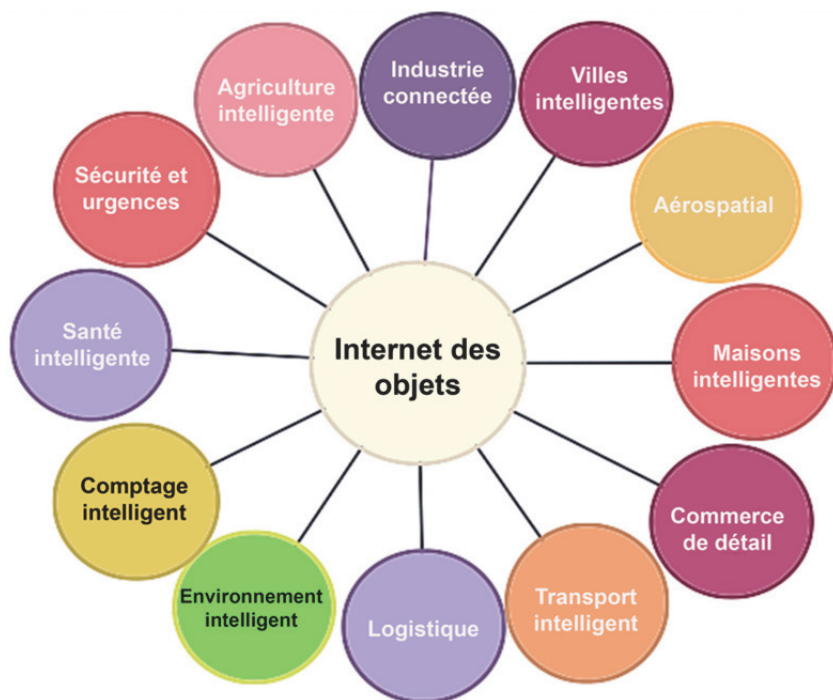


Figure I.7. *Écosystèmes connectés*

L'IoT apporte également des avancées significatives dans plusieurs autres secteurs. L'énergie intelligente repose sur l'optimisation de la production, du stockage et de la distribution de l'énergie grâce aux réseaux intelligents (*smart grids*), à l'intégration des énergies renouvelables et à une gestion adaptative en fonction de la demande. Cette approche vise à améliorer la durabilité et l'efficacité du système énergétique global. En complément, le comptage intelligent permet un suivi en temps réel de la consommation d'électricité, de gaz et d'eau, facilitant ainsi une gestion plus efficace et une réduction du gaspillage énergétique. Dans le domaine de l'agriculture intelligente, des capteurs et des drones connectés optimisent l'irrigation, surveillent la santé des cultures et du bétail, et améliorent la productivité agricole tout en réduisant l'impact environnemental. L'environnement intelligent repose sur des capteurs permettant de mesurer la pollution de l'air et de l'eau, de prévenir les catastrophes naturelles et de mieux gérer les ressources naturelles. Concernant la sécurité et les urgences, les caméras et capteurs intelligents aident à détecter les menaces en temps

réel, améliorent les interventions en cas de catastrophe et renforcent la sécurité publique grâce à l'analyse des données. Enfin, dans l'aérospatial, l'IoT est utilisé pour la maintenance prédictive des avions, l'amélioration de la gestion du trafic aérien et l'optimisation des opérations spatiales grâce aux capteurs intelligents et à l'analyse des données.

Ces diverses applications illustrent comment l'Internet des objets transforme de nombreux secteurs en apportant des solutions plus intelligentes, connectées et efficaces.

La synergie entre l'IoT et d'autres technologies émergentes, telles que la robotique, les systèmes autonomes et l'IA, renforce encore ces avantages. Par exemple, les cobots équipés de capteurs IoT peuvent collaborer avec les travailleurs humains pour améliorer la productivité tout en garantissant la sécurité. L'analyse des données en temps réel permet également de développer des modèles de prévision et d'optimisation, révolutionnant les chaînes d'approvisionnement et les stratégies de gestion.

Ainsi, l'IoT n'est pas simplement une technologie supplémentaire, mais un catalyseur clé qui transforme les paradigmes industriels en permettant une interconnexion et une intelligence inégalées.

La montée en puissance de l'IoT ne concerne pas seulement les grandes industries. Les petites et moyennes entreprises (PME) commencent également à adopter ces technologies, rendant les avantages accessibles à une plus large échelle. Cependant, ces transformations n'échappent pas à des défis tels que la cybersécurité, l'interopérabilité et la gestion des données massives.

À l'inverse de ses promesses d'efficacité et d'intelligence, l'univers des objets interconnectés se heurte à plusieurs limites critiques : exposition accrue aux intrusions numériques, incertitude quant à la fiabilité des informations échangées et concentration excessive des infrastructures de contrôle, nuisant à la robustesse globale du système. Pour faire face à ces failles structurelles, diverses approches technologiques sont mises en œuvre. Certaines architectures reposent sur des registres numériques inviolables et transparents qui permettent d'assurer la confiance sans tiers de confiance. D'autres privilégient des bases centralisées pour maximiser la rapidité d'exécution, ou s'orientent vers des structures décentralisées pour améliorer la résilience face aux pannes ou aux attaques. Des mécanismes innovants, tels que ceux reposant sur des algorithmes de consensus alternatifs, répondent quant à eux aux défis de l'extension à grande échelle. Le recours à des infrastructures numériques évolutives dans le nuage offre une grande souplesse d'adaptation, tandis que les réseaux d'échange direct entre nœuds permettent un partage autonome et distribué des ressources. Dans le contexte industriel intelligent, l'intégration de ces solutions permet non seulement

d'automatiser les tâches complexes et de fiabiliser les flux de données entre équipements autonomes, mais aussi de renforcer la coopération homme-machine. Certains systèmes assurent en outre une visibilité complète sur les chaînes de fabrication, tandis que d'autres ciblent des besoins opérationnels tels que le traitement rapide de grandes masses d'informations ou la fluidité des interactions à distance (Singh et Singh 2015 ; Mhamdi *et al.* 2022).

I.3. Objectifs et structure de l'ouvrage

L'objectif fondamental de cet ouvrage est de fournir une lecture complète, critique et prospective des transformations que connaît le monde industriel à l'ère des technologies intelligentes. En s'appuyant sur les paradigmes de l'industrie 4.0, de l'industrie 5.0 et de la société 5.0, il ambitionne d'éclairer les dynamiques à l'œuvre dans la transition vers des écosystèmes industriels plus interconnectés, autonomes, éthiques et centrés sur l'humain. Il s'adresse autant aux professionnels en quête de repositionnement stratégique ou technologique, qu'aux enseignants, chercheurs, étudiants en ingénierie ou en sciences appliquées, ainsi qu'à toute personne intéressée par les mutations industrielles du XXI^e siècle.

La structure de l'ouvrage a été pensée comme un parcours progressif, articulant fondements théoriques, retours d'expérience et perspectives d'avenir. L'introduction générale situe le lecteur dans le contexte global de la révolution numérique, en mettant en lumière les continuités et ruptures entre industrie 4.0 et industrie 5.0. Elle introduit également les concepts-clés de cette double transition : automatisation avancée, connectivité ubiquitaire, personnalisation à grande échelle, durabilité, résilience et inclusion.

Le chapitre 1 constitue le socle technique de l'ouvrage. Il explore l'Internet des objets (IoT) en tant que pierre angulaire de la connectivité industrielle moderne. On y analyse les architectures, les protocoles, les capteurs et les systèmes embarqués, tout en exposant les enjeux d'interopérabilité, de sécurité et de traitement des données dans les environnements industriels.

Le chapitre 2 prolonge cette base en abordant les grandes transformations induites par la convergence des technologies numériques, cyber-physiques et biologiques. Il montre comment la transition de l'industrie 4.0 à l'industrie 5.0 traduit un changement de paradigme : d'une logique purement orientée technologie vers une approche plus inclusive, où l'humain, la créativité et l'éthique deviennent des piliers de la nouvelle industrie.

Le chapitre 3 s'intéresse à l'automatisation intelligente et aux systèmes collaboratifs. On y étudie le rôle croissant de l'intelligence artificielle, de l'apprentissage automatique et des cobots dans les processus industriels. Ce chapitre met en lumière la manière dont l'interaction homme-machine évolue, en intégrant les notions de confort, d'adaptabilité et de coopération.

Le chapitre 4 aborde les défis complexes liés à l'adoption du modèle 5.0. Il traite des enjeux techniques (cybersécurité, interopérabilité, gestion des données massives), humains (compétences, acceptabilité, fatigue cognitive), sociétaux (inégalités, emploi, inclusion), mais aussi éthiques et géopolitiques. Des pistes de réflexion et de solution sont proposées pour accompagner une transition maîtrisée et équilibrée.

Le chapitre 5 adopte une posture résolument prospective. Il s'agit ici de scruter les lignes de force qui dessineront l'avenir des industries intelligentes entre 2030 et 2050 : technologies émergentes (6G, jumeaux numériques, Bio-IoT), nouvelles formes d'organisation (usines autonomes, production symbiotique), implications géopolitiques, questions de gouvernance mondiale et scénarios d'avenir entre utopie technologique et dystopie algorithmique.

La conclusion revient sur les principaux enseignements de l'ouvrage, tout en ouvrant la réflexion vers les futurs possibles de l'industrie. Elle pose une question essentielle : comment construire une industrie qui soit non seulement performante et innovante, mais aussi éthique, durable et profondément humaine ?

Ainsi, cet ouvrage se propose d'accompagner le lecteur dans la compréhension des transformations industrielles présentes et futures. En conjuguant exigence scientifique, accessibilité pédagogique et regard réflexif, il vise à fournir les outils nécessaires pour comprendre et anticiper les évolutions d'un paysage industriel à la fois complexe et porteur d'avenir.