

Nathalie JULIEN • Éric MARTIN

# L'USINE du FUTUR

## Stratégies et déploiement

Industrie 4.0,  
de l'IoT aux jumeaux numériques

2<sup>e</sup> édition

DUNOD

Graphiste couverture : Pierre-André Gualino

Composition : Nord Compo

Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du photocopillage.

Le Code de la propriété intellectuelle du 1<sup>er</sup> juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique s'est généralisée dans les établissements

d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la possibilité même pour

les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée. Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du Centre français d'exploitation du

droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).



© Dunod, 2018, 2021

11 rue Paul Bert, 92240 Malakoff

[www.dunod.com](http://www.dunod.com)

ISBN 978-2-10-082329-1

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2<sup>e</sup> et 3<sup>e</sup> a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

# Table des matières

<b>Préface</b>	XI
<b>Introduction</b>	XIII
<b>Partie 1</b>	
<b>Comprendre les enjeux</b>	1
<b>Chapitre 1 ■ Évolution et objectifs</b>	3
État des lieux	3
Pourquoi l'usine du futur ?	3
Une nouvelle révolution industrielle	4
Le contexte international	5
Une priorité mondiale	13
Pour s'y retrouver	15
Technologies de rupture KET	15
Technologies pour la communication et l'interconnexion	17
Gestion des données	19
Vers une définition de l'usine du futur	21
Une usine performante	21
Une usine agile	22
Une usine responsable	22
<b>Chapitre 2 ■ Les axes de travail</b>	23
Augmentation de la connectivité	23
Le produit intelligent	23
L'usine connectée	25
Connecter les humains	26
Piloter les usines	27

Des logiciels qui communiquent	28
Les logiciels de l'entreprise	28
Le besoin de standards	30
Décloisonner les activités	31
Le virtuel pour l'aide à la décision	31
Développer des modèles adaptés	31
Simuler le fonctionnement de l'usine	31
Piloter l'usine	32
Amélioration du poste de travail	33
Réduire la pénibilité	33
Interaction Homme-Machine (IHM)	33
Accompagner le personnel	34
Une nouvelle organisation du travail	34
Anticiper les nouveaux risques	34
Sécuriser les données et les process	35
Le risque cyber dans l'industrie	35
Un enjeu majeur	37
Les bonnes pratiques	37
Témoignage 1 : Nicolas Chaillet	38
Un large spectre d'interventions technologiques,	
sous les aspects humain et stratégique	39
Structurer les relations entre les acteurs de l'industrie du futur	39
<b>Chapitre 3 ■ Les enjeux</b>	41
Le contexte industriel en France	41
Un déclin progressif	41
Le sursaut récent	42
Le soutien de l'État	43
Produit, service et consommateur	47
Un nouveau consommateur	47
Le produit est indissociable du service	48
Une autre vision de la performance	49
La rapidité	49
L'agilité	51
La qualité	52
L'innovation	53
Le respect de l'environnement	54
Repenser le système de production	55
Le pilotage par les données	55
Plus de flexibilité	56
Transformer les processus	56
Vers l'usine prédictive	57

Revaloriser le rôle de l’humain	57
Vers de nouveaux métiers	57
Responsabilité sociétale de l’entreprise RSE	60
Témoignage 2 : Pascal Perrot	61
Quel regard portez-vous sur l’évolution des besoins en systèmes automatisés et en pilotage des industries ?	62
En quoi le numérique peut-il accompagner ces enjeux ?	63
Quels sont les freins et verrous à lever pour répondre aux enjeux de l’industrie du XXI <sup>e</sup> siècle ?	64
<b>Partie 2</b>	
<b>Premiers pas</b>	65
<b>Chapitre 4 ■ Usine numérique</b>	67
Témoignage 3 : Frank Le Strat	67
Quel est l’intérêt des logiciels pour l’usine numérique ?	67
Quels sont les facteurs déclenchants pour franchir le pas ?	69
Quelles sont les bonnes pratiques du déploiement ?	70
Un exemple de retour sur investissement ?	70
Le système de fabrication intelligent	70
Caractéristiques	70
Particularités	71
Intégration horizontale	74
Flux entreprise	75
Flux produit	75
Flux process	76
Intégration verticale	78
Niveau entreprise	78
Niveau organisation	79
Niveau supervision	79
Niveau machine	80
Intelligence intégrée	80
Témoignage 4 : Michel Devos	82
Stratégies et performances pour le déploiement du MES	83
Comment déployer un MES ?	84
Organisation et management du MES	85
Les success stories	85
Interopérabilité et standards	85
Nos conseils	88

Témoignage 5 : Julien Chanony	88
L'agilité est la rencontre de la réactivité des personnes avec une information efficace	88
Il faut veiller à la bonne circulation des données	88
Une première étape : la gestion du flux d'informations	89
Un mot d'ordre, l'agilité	89
<b>Chapitre 5 ■ Usine virtuelle</b>	91
Témoignage 6 : Philippe Boutinaud	91
Contexte	93
Définition	93
Enjeux	93
Applications	94
Méthodologie proposée	97
Développer une bibliothèque numérique	97
Collecter les données	97
Établir des modèles	98
Simuler les fonctionnements	100
Interfacer les modèles	100
Piloter les systèmes	102
Témoignage 7 : Patrick Pirrat	105
La virtualisation pour lever les contraintes de l'industrialisation dans la démarche d'innovation	105
Le numérique au service de l'hybridation des produits, des process et des coopérations hommes-systèmes	106
Améliorer les systèmes	107
Optimiser la conception	107
Reconfigurer les systèmes	107
Témoignage 8 : Emmanuel Morice et Virginie Rigaudeau-Saidali	108
L'humain, facteur clé de la transition numérique	108
Deux exemples concrets de transformation numérique	108
Associer la transformation numérique au lean pour avoir un ROI optimal	109
Expérimenter et disséminer	109
Exemples	110
<b>Chapitre 6 ■ Mise en œuvre d'un cobot</b>	113
Contexte	113
L'importance des TMS	113
Robot vs cobot	115
Les caractéristiques d'un cobot	123

Méthodologie	124
Étude du poste de travail	125
Étude de la solution	126
Mise en œuvre	127
Témoignage 9 : Jean Philippe Laurent	129
Le numérique au service de l'équipe autonome	130
La robotisation et la cohabitation	131
Le bureau d'études et l'usine virtuelle	131
Notre expérience par l'exemple	132
Contexte de l'étude	132
Étude du poste de travail	133
Étude de la solution	133
Mise en œuvre	134
<b>Chapitre 7 ■ Aide à la décision</b>	<b>135</b>
Témoignage 10 : Thierry Valot	135
L'impact du numérique sur notre Business model	135
Une approche collaborative pour la mise en œuvre de l'intelligence artificielle	136
Contexte	137
Big data	137
Le cycle de vie des données	138
L'intelligence opérationnelle	140
L'informatique décisionnelle	141
Data mining	143
Aide multi-critères à la décision	144
Les outils de Business Intelligence	145
L'émergence de nouveaux métiers	147
Témoignage 11 : Romuald Rituit	147
<b>Partie 3</b>	
<b>Vers une stratégie globale</b>	<b>149</b>
<b>Chapitre 8 ■ Les méthodes</b>	<b>151</b>
L'excellence opérationnelle	151
Contexte	151
Qualité totale et approche processus	152
Maintenance productive totale TPM	156
<i>Lean</i>	157
Six Sigma	158
Quelques outils de l'excellence opérationnelle	161

Modèle SCOR	166
Modélisation de la chaîne logistique	166
Mesure de l'efficacité	172
Méthode SIPOC	174
Présentation de la méthode	174
Les étapes de mise en œuvre	175
La description du processus	176
Témoignage 12 : Martin Lambert	178
Pensez grand, commencez petit	178
Des principes directeurs pour la gouvernance d'un projet	179
Histoire d'une réussite : Premier Tech Digital main dans la main avec Cascades	179
<b>Chapitre 9 ■ Les modèles et langages</b>	<b>183</b>
Modélisation des processus par BPMN	183
Définition	184
Principes	184
Les différents types de diagramme	193
Conseils	195
Modélisation de la communication machine B2MML	196
Présentation	196
Principes	197
Exemple	199
Plateformes et logiciels	204
Plateformes pour BPMN	204
Plateforme pour B2MML	206
<b>Chapitre 10 ■ Stratégie et évolution</b>	<b>207</b>
Un nouveau modèle économique	207
La société se transforme	207
Les français habitués au numérique	208
Le délicat problème des emplois	208
L'humain au centre de l'usine	212
Le client au centre de l'innovation	212
L'employé au centre de la production	212
L'entreprise comme ascenseur social	213
Les leçons du confinement	215
La mondialisation en question	215
Les conséquences économiques	216
Une accélération de la transformation	216
Une autre façon de travailler	217
Vers des organisations résilientes	218

Vers l'usine verte	218
Une usine propre	218
Une usine autonome	219
Témoignage 13 : Axel Krid	220
Dématérialisation	220
Fiabilisation des processus et recentrage sur le métier	221
Pénibilité au travail	221
Quels sont les freins ?	221
Pour aller plus loin...	222
Franchir le pas	222
Les facteurs de succès	223
Se faire accompagner	225
La maturité numérique	225
Développer sa stratégie	226
Testez-vous !	228
<b>Conclusion</b>	<b>233</b>
<b>Remerciements</b>	<b>235</b>
<b>Glossaire</b>	<b>237</b>
<b>Bibliographie</b>	<b>249</b>
<b>Index</b>	<b>253</b>



# Préface

L'industrie du futur est une des transitions initiées par la métamorphose numérique de l'économie et de la société, qui a trouvé ses prémices dans le développement de l'électronique, de l'informatique et des télécoms et est entrée à l'orée du <sup>XXI</sup><sup>e</sup> siècle en phase d'accélération et de déploiement dans tous les secteurs d'activité.

Cette évolution est un véritable challenge pour les acteurs qui doivent en même temps, intégrer les vagues successives de ruptures apportées par les technologies numériques et anticiper sur les révolutions profondes de long terme qu'elles enclenchent sur les modes de production, sur les produits, et sur l'organisation de l'entreprise ; le tout s'inscrivant dans une évolution globale et systémique de la société, de son économie et de sa soutenabilité.

Dans cette perspective, les auteurs ont pris le parti de définir, expliquer, informer, faire sentir, pour accompagner les décideurs dans l'appréhension des transformations, et en même temps d'éclairer les chemins à parcourir et les premiers pas à franchir en s'appuyant sur les témoignages de ceux qui ont engagé leur entreprise dans cette aventure.

Ainsi la construction de l'ouvrage, en associant les différentes facettes de l'usine du futur, permet d'accompagner le lecteur dans sa compréhension, de faire émerger les points clefs de l'évolution et d'illustrer par des exemples les réponses qui peuvent être apportées.

Le panorama en début d'ouvrage sur la façon dont les questions de l'usine du futur, puis de l'industrie du futur sont abordées dans les différents pays, montre l'importance de la culture économique et sociale et de la perception globale de la société, face aux transformations de rupture. Il suggère à la fois de s'enrichir des expériences d'autres pays et de s'appuyer sur les atouts propres à la France.

Puis est abordé le point clef de la métamorphose numérique, qui opère dans un premier temps au travers de l'automatisation des outils et chaînes de fabrication, suivi de la création d'un véritable système nerveux « *machine to machine* », puis au travers

des technologies de l'intelligence autour des données, de la réalité virtuelle, de la coopération avec les robots et à venir avec les agents intelligents lorsqu'ils seront créés.

L'ouvrage aborde ensuite le cœur de la problématique spécifique de l'usine du futur. Elle associe technologies numériques, approvisionnement, énergie, processus et pilotage, et développement de l'excellence opérationnelle et informationnelle. Sont présentées les technologies mobilisables, les outils et les méthodes, avec un enrichissement par des témoignages et descriptions techniques de l'offre. Ceci débouche ensuite sur des propositions concrètes de formalisation des analyses et des méthodes pour se préparer et entrer dans l'aventure.

Même si ce n'est pas le cœur de l'ouvrage, sont exposés ensuite de façon synthétique les points et questions clés de moyen et long terme du cadre d'évolution de l'usine du futur, fournissant des éléments de sens et d'enjeux à creuser pour éclairer les décisions.

Sont ainsi évoqués les problématiques de coordination automatique *machine to machine*, la place de l'humain dans les processus de pilotage, la coopération avec les robots, les traitements algorithmiques et les agents intelligents ; mais aussi le potentiel et la complexité offerte par la maîtrise du double numérique de l'usine virtuelle et son potentiel de simulation, de pilotage et de diagnostic ; et enfin l'explosion des flux de donnée, leur traitement massif, et leurs rôles dans les processus d'analyse et de décision.

Sont également abordées directement ou introduites les grandes questions de la transformation numérique globale de l'entreprise, de la place de l'humain dans les relations aux automatismes et à l'intelligence artificielle et de la dialectique entre performances et éthique. Et pour finir l'usine et l'entreprise du futur sont situées dans l'espace sociétal global de modèle économique, d'emploi, de métiers, de formation, de développement durable.

Les deux auteurs, enseignants chercheurs en École d'ingénieur apportent une contribution remarquable par la qualité et la pertinence du contenu, par l'approche pédagogique de construction d'un chemin de compréhension progressive, légitimé par les témoignages et expériences.

Dans une période de lancement de l'initiative French Fab, d'accélération de son programme d'excellence porté par l'Alliance Industrie du Futur, notamment pour l'accompagnement des PME et ETI dans cette métamorphose numérique, cet ouvrage est un élément pertinent et opportun de sensibilisation qui doit permettre aux décideurs d'appréhender la problématique de l'usine du futur dans ses dimensions à la fois stratégiques et pragmatiques et les aider à faire le premier pas pour entrer dans le monde de l'usine du XXI<sup>e</sup> siècle.

Francis Jutand  
Directeur Général de l'IMT  
Membre fondateur de l'Alliance pour l'Industrie du Futur

# Introduction

*Ce n'est pas parce que les choses sont difficiles que nous n'osons pas,  
c'est parce que nous n'osons pas qu'elles sont difficiles.*

*Sénèque*

**I***ntegrated industry, smart factory, digital manufacturing, usine du futur, industrie 4.0...* Les termes pour qualifier la transition numérique dans l'industrie foisonnent. Parmi toutes les notions qui émergent, il est difficile de s'y retrouver et, soyons honnêtes, c'est un sujet qui fait facilement polémique. Certains plongent dans la transformation emplit d'enthousiasme, alors que pour beaucoup, ce sujet active de nombreuses peurs : les pertes d'emploi, la prise de contrôle des grands groupes sur les informations privées, la peur du changement, l'exclusion numérique...

À l'image de la société, le numérique traverse et bouleverse l'industrie, les modes de fabrication, les organisations et les interactions en reliant les composants, les machines, les hommes, à tous les niveaux. Les possibilités d'innovation deviennent incommensurables et si les risques de dérive existent, ce n'est qu'en comprenant clairement les enjeux que nous pourrions agir de façon responsable. Car l'objectif premier de l'usine du futur ne correspond pas à davantage d'automatisation, mais à plus d'intelligence dans la mise en réseau des machines entre elles et des machines avec les hommes, générant moins de pénibilité pour les hommes.

Nous sommes enseignants-chercheurs dans une école d'ingénieurs et fortement impliqués auprès des entreprises. Notre travail alliant formation, recherche et transfert industriel, nous sommes régulièrement témoins de l'importante dichotomie entre les discours politiques et stratégiques et la réalité du terrain. Même si la plupart des dirigeants de grands groupes sont convaincus de la nécessité de franchir le pas, force est de constater que de nombreux dirigeants de PME/ETI ne se sentent pas capables

de franchir le cap sans accompagnement, de même que beaucoup de responsables opérationnels ne savent pas par où commencer, faute de compétences en interne.

C'est la raison principale de cet ouvrage : informer, expliquer et guider à la fois le grand public et les responsables qui s'interrogent sur les méthodes et les outils à mettre en place. Ce livre propose une première approche des différents domaines et une cartographie des problématiques essentielles pour aborder l'ensemble des notions liées à l'usine du futur. Nous avons voulu faire un ouvrage concret et accessible à tous, illustré de nombreux exemples et témoignages et nous nous sommes focalisés sur les concepts plutôt que les techniques en elles-mêmes afin de communiquer des notions pérennes tout en étant efficaces car les techniques décrites aujourd'hui risqueraient d'être rapidement obsolètes.

Comme vous le verrez, les différentes thématiques en sont à des degrés de maturité divers et le sujet de l'usine du futur est tellement vaste, que nous avons dû cibler les priorités du présent ouvrage tout en ayant conscience que certains sujets mériteraient d'être développés ultérieurement. En attendant, nous avons souhaité fournir aux lecteurs les notions de base lui permettant ensuite d'approfondir le sujet à l'aide de la bibliographie proposée.

Ce livre est paru pour la première fois en juin 2018 et le succès fut au rendez-vous puisqu'il était épuisé moins de dix-huit mois plus tard, preuve que cette thématique motive de nombreuses personnes. Au moment où nous écrivons cette deuxième édition, en janvier 2021, plus de 1 200 exemplaires ont été vendus car l'intérêt du public, spécialiste ou non, ne faiblit pas. Durant ces deux années, le contexte national et international a fortement évolué ; nous avons ajouté dans cette nouvelle édition des données et des analyses sur cette période pré et post-Covid ; car si la pandémie a bouleversé notre quotidien personnel et professionnel, elle a aussi mis en exergue les faiblesses des anciens schémas et l'urgence de modifier notre vision non seulement de la production, mais aussi des organisations, de la consommation et même du travail.

Comment lire ce livre ? À votre rythme et selon votre besoin... Soit en suivant la progression qui vous est proposée en allant vers les aspects de plus en plus techniques, soit en allant chercher plus particulièrement les informations liées à un thème spécifique. Un glossaire en fin d'ouvrage vous guidera dans la multitude des termes techniques et des abréviations en français et en anglais.

La première partie de l'ouvrage « Comprendre les enjeux » a été conçue pour être accessible à tous, avec ou sans culture technique et fournir une première vision de la thématique en présentant tout d'abord un état des lieux et une définition des principaux termes, avant d'aborder les principaux thèmes de l'usine du futur et enfin les enjeux.

La deuxième partie « Les axes de travail » permet d'entrer dans la démarche de façon pragmatique et développe pour chaque chapitre des cas d'étude concrets illustrés par

des exemples autour de l'usine numérique, l'usine virtuelle, la mise en œuvre d'un cobot et l'aide à la décision.

Enfin la troisième partie « Vers une stratégie globale » approfondit les notions vues auparavant en explicitant tout d'abord les méthodes, puis les modèles avant de récapituler tous les éléments nécessaires à une stratégie efficace.

En espérant que cet ouvrage réponde à vos interrogations, nous vous souhaitons donc un bon voyage dans le monde de toutes les possibilités... !



# Partie 1

## Comprendre les enjeux

Chapitre 1 ■ Évolution et objectifs .....	3
Chapitre 2 ■ Les axes de travail .....	23
Chapitre 3 ■ Les enjeux .....	41



# Chapitre 1

# Évolution et objectifs

Nous allons présenter l'état des lieux du numérique dans l'industrie manufacturière. Un rapide historique sera suivi d'un point sur le contexte international et de quelques définitions. Nous exposerons enfin les objectifs de l'usine du futur.

## 1.1 État des lieux

### 1.1.1 Pourquoi l'usine du futur ?

Notre société connaît une profonde transformation liée aux technologies numériques. Ce n'est plus seulement notre façon de communiquer qui évolue, mais également notre mode de vie, notre façon de travailler et de penser nos interactions dans la société : collaboration et personnalisation sont deux des facteurs clés liés à la numérisation. Par conséquent, notre façon de consommer se transforme également, au même titre que nos besoins et nos attentes en termes de produit et de service. L'usine du futur est la réponse nécessaire à cette évolution, basée sur des innovations de rupture essentiellement dans les domaines du pilotage (*digital factory*) et du façonnage (*digital manufacturing*), afin de maintenir une activité industrielle compétitive. Il ne s'agit pas seulement de moderniser l'outil de production mais bien de revoir en profondeur les modes de production, les organisations et les relations avec le consommateur en utilisant les technologies numériques.

En effet, le consommateur devient de plus en plus exigeant en termes de qualité, de personnalisation de produit, d'accompagnement par les services mais aussi d'impact environnemental et sociétal. De plus, l'innovation est devenue plus importante dans les usages que dans les technologies. Cela nécessite de repenser complètement les méthodes et les moyens de production.

L'usine du futur est une réponse à ces évolutions énergétique, écologique, numérique, organisationnelle et sociétale. Reposant sur des technologies existantes ou émergentes, elle demande de repenser aussi bien la façon de piloter

l'entreprise que la façon de produire avec une refonte complète de l'organisation de l'entreprise dans un monde où les outils numériques font tomber la cloison entre industrie et services.

### 1.1.2 Une nouvelle révolution industrielle

Pour certains auteurs, l'industrie du futur serait la marque de la quatrième révolution industrielle, qui fait suite à la mécanisation et la machine à vapeur, l'électricité, la production de masse et enfin l'informatisation et l'automatisation comme représenté sur la Figure 1.1.

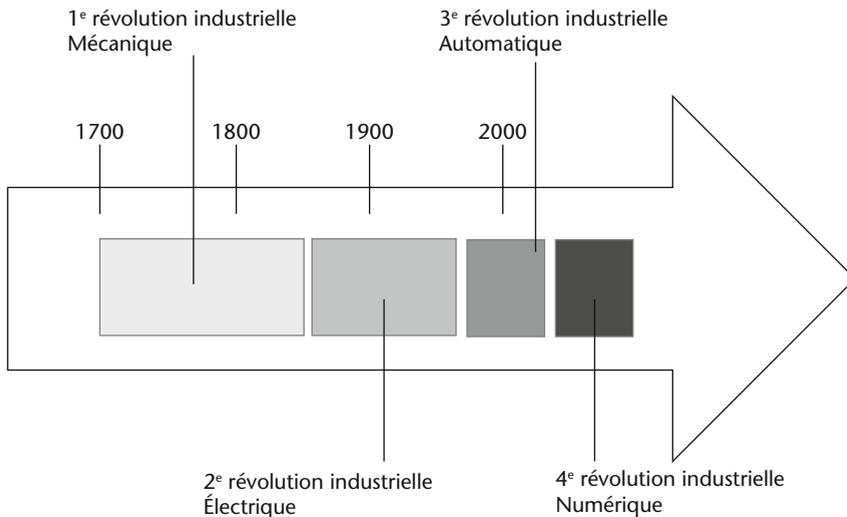


Figure 1.1 – Les quatre révolutions industrielles

La première révolution industrielle commence avec les évolutions technologiques suivantes : en 1705 la machine à vapeur, puis la machine à tisser mécanique en 1769 et la locomotive à vapeur en 1804. Cette révolution démarre en Grande-Bretagne à la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle, puis se propage en France au début du XIX<sup>e</sup> siècle avant de s'étendre à l'Allemagne, aux États-Unis, au Japon et à la Russie. Cette période est associée à une très forte augmentation démographique, à d'importantes migrations ainsi qu'à de grands bouleversements économiques et politiques.

La seconde révolution industrielle commence à la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle et repose sur les développements de l'électricité, de la mécanique, du pétrole et de la chimie ainsi que des moyens de communication (télégraphe et téléphone) et du transport collectif (chemins de fer et bateaux à vapeur) favorisant les échanges internationaux. Parallèlement, l'ingénieur Frederick Winslow Taylor invente, en 1911, le taylorisme, une organisation scientifique du travail qui permet d'augmenter la productivité des salariés, et Henry Ford instaure le montage à la chaîne.

La troisième révolution industrielle apparaît à partir de 1970 avec l'électronique et la création du transistor. S'ensuit l'essor des télécommunications, de l'informatique et du nucléaire avec la miniaturisation des matériels. Partie des États-Unis, puis du Japon et de l'Union européenne, la troisième révolution industrielle voit également naître les ordinateurs et Internet dans les années 1990. Deux produits ont particulièrement impacté la production industrielle : l'automate en 1968 et le robot en 1959. Les opérations de façonnage sont plus complexes et l'automatisation gagne en habileté tout en soulageant l'homme des tâches les plus dangereuses. Les organisations ont évolué dans la recherche de performance en termes de productivité, de qualité, de délais et de coûts, notamment par l'amélioration continue et l'élimination des gaspillages.

L'émergence de cette quatrième révolution que représente l'usine du futur était annoncée pour 2020. Elle représente un système global intercommuniquant avec des usines flexibles, intégrées et connectées. Toutes les briques technologiques existent déjà : objets connectés et capteurs, automates, robotique, mobilité, *big data* et *cloud*, biotechnologies, énergies renouvelables, intelligence artificielle, stockage de l'énergie électrique, nouveaux matériaux... Cette révolution numérique comporte deux domaines : la *digital factory* et le *digital manufacturing*.

La première intègre la dématérialisation et l'interconnexion des produits, des machines et des individus. Avec des communications quasi instantanées et un réseau d'interconnexion mondial, les frontières spatiales, économiques et sociales sont abolies, l'innovation est facilement accessible, les besoins évoluent très vite, le volume des données explose ; cela nécessite une adaptation rapide et constante de la part des entreprises.

### Objets connectés : un déploiement exponentiel

À l'horizon 2025, on annonce 150 milliards d'objets connectés dans le monde. ■

Les usines connectées reposent sur la modélisation numérique des processus et la mise en réseau des machines, des produits et des individus aboutissant à une production flexible, économe et intelligente accompagnée de services personnalisés. Le *digital manufacturing* intègre des technologies comme la mécatronique, l'intelligence artificielle dans des techniques de façonnage comme l'impression 3D, la cobotique, etc.

## 1.1.3 Le contexte international

La forte croissance de l'industrie d'après-guerre fait place dans les années 2000 à l'économie *fabless*, c'est-à-dire sans usine. Il faut la crise de 2008 pour constater que les pays avec une forte capacité industrielle résistent mieux aux bulles spéculatives, comme l'illustre la Figure 1.2 qui représente la variabilité du PIB