

NATHALIE JULIEN
ÉRIC MARTIN

L'USINE DU FUTUR

STRATÉGIES ET DÉPLOIEMENT

INDUSTRIE 4.0,
DE L'IOT AUX
JUMEAUX
NUMÉRIQUES

DUNOD

Graphiste couverture : Julien Ysebaert

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^{er} 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

11 rue Paul Bert, 92240 Malakoff

ISBN 978-2-10-077702-0

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2° et 3° 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

Préface	IX
Introduction	1
Partie 1	
Comprendre les enjeux	3
Chapitre 1 ■ Évolution et objectifs	5
État des lieux	5
Pourquoi l'usine du futur ?	5
Une nouvelle révolution industrielle	6
Le contexte international	8
Pour s'y retrouver	15
Technologies de rupture KET	16
Technologies pour la communication et l'interconnexion	17
Gestion des données	19
Vers une définition de l'usine du futur	22
Une usine performante	22
Une usine agile	22
Une usine responsable	23
Chapitre 2 ■ Les axes de travail	25
Augmentation de la connectivité	25
Le produit intelligent	26
L'usine connectée	27
Connecter les humains	29
Piloter les usines	30
Des logiciels qui communiquent	30
Les logiciels de l'entreprise	30
Le besoin de standards	32
Décloisonner les activités	33
Le virtuel pour l'aide à la décision	33
Développer des modèles adaptés	33
Simuler le fonctionnement de l'usine	34
Piloter l'usine	34

Amélioration du poste de travail	35
Réduire la pénibilité	35
Interaction Homme-Machine (IHM)	36
Accompagner le personnel	36
Une nouvelle organisation du travail	36
Sécuriser les données et les process	37
Un enjeu majeur	37
Les bonnes pratiques	37
Chapitre 3 ■ Les enjeux	39
L'affaire de tous	39
Le contexte industriel en France	39
Un nouveau consommateur	40
Le produit est indissociable du service	41
Une autre vision de la performance	42
La rapidité	42
L'agilité	44
La qualité	46
L'innovation	46
Le respect de l'environnement	47
Repenser le système de production	48
Le pilotage par les données	48
Plus de flexibilité	49
Transformer les processus	50
Vers l'usine prédictive	50
Revaloriser le rôle de l'humain	51
Vers de nouveaux métiers	51
Responsabilité sociétale de l'entreprise RSE	53
Témoignage	55
Quel regard portez-vous sur l'évolution des besoins en systèmes automatisés et en pilotage des industries ?	55
En quoi le numérique peut-il accompagner ces enjeux ?	56
Quels sont les freins et verrous à lever pour répondre aux enjeux de l'industrie du XXI ^e siècle ?	57
Partie 2	
Premiers pas	59
Chapitre 4 ■ Usine numérique	61
Témoignage	61
Quel est l'intérêt des logiciels pour l'usine numérique ?	61
Quels sont les facteurs déclenchants pour franchir le pas ?	63

Quelles sont les bonnes pratiques du déploiement ?	64
Un exemple de retour sur investissement ?	64
Le système de fabrication intelligent	64
Caractéristiques	64
Particularités	65
Intégration horizontale	68
Flux entreprise	69
Flux produit	69
Flux process	70
Intégration verticale	72
Niveau entreprise	72
Niveau organisation	73
Niveau supervision	73
Niveau machine	74
Intelligence intégrée	74
Interopérabilité et standards	76
Nos conseils	79
Chapitre 5 ■ Usine virtuelle	81
Contexte	81
Définition	81
Enjeux	81
Applications	82
Témoignage	85
Méthodologie proposée	87
Développer une bibliothèque numérique	88
Collecter les données	88
Établir des modèles	88
Simuler les fonctionnements	90
Interfacer les modèles	90
Piloter les systèmes	92
Améliorer les systèmes	95
Optimiser la conception	95
Reconfigurer les systèmes	95
Exemples	96
Chapitre 6 ■ Mise en œuvre d'un cobot	97
Contexte	97
L'importance des TMS	97
Robot vs cobot	99
Les caractéristiques d'un cobot	107

Méthodologie	108
Étude du poste de travail	109
Étude de la solution	110
Mise en œuvre	111
Notre expérience par l'exemple	114
Contexte de l'étude	114
Étude du poste de travail	114
Étude de la solution	115
Mise en œuvre	115
Chapitre 7 ■ Aide à la décision	117
Contexte	117
<i>Big data</i>	117
Le cycle de vie des données	118
L'intelligence opérationnelle	120
L'informatique décisionnelle	122
Data mining	123
Aide multi-critères à la décision	124
Les outils de Business Intelligence	125
L'émergence de nouveaux métiers	127
Témoignage	128
Partie 3	
Vers une stratégie globale	131
Chapitre 8 ■ Les méthodes	133
L'excellence opérationnelle	133
Contexte	133
Qualité totale et approche processus	134
Maintenance productive totale TPM	138
Lean	140
Six Sigma	141
Quelques outils de l'excellence opérationnelle	143
Modèle SCOR	148
Modélisation de la chaîne logistique	148
Mesure de l'efficacité	154
Méthode SIPOC	156
Présentation de la méthode	157
Les étapes de mise en œuvre	157
La description du processus	158

Chapitre 9 ■ Les modèles et langages	161
Modélisation des processus par BPMN	161
Définition	162
Principes	162
Les différents types de diagramme	171
Conseils	173
Modélisation de la communication machine B2MML	174
Présentation	174
Principes	175
Exemple	177
Plateformes et logiciels	182
Plateformes pour BPMN	182
Plateforme pour B2MML	184
Chapitre 10 ■ Stratégie et évolution	185
Un nouveau modèle économique	185
La société se transforme	185
Les français habitués au numérique	186
Le délicat problème des emplois	186
L'humain au centre de l'usine	188
Le client au centre de l'innovation	188
L'employé au centre de la production	188
L'entreprise comme ascenseur social	189
Vers l'usine verte	190
Une usine propre	191
Une usine autonome	191
Pour aller plus loin...	192
Franchir le pas	192
Témoignage	194
Se faire accompagner	196
La maturité numérique	197
Développer sa stratégie	198
Testez-vous !	200
Conclusion	205
Remerciements	207
Glossaire	209
Bibliographie	221
Index	225

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 xxi^e 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 clefs 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 faire le premier pas pour entrer dans le monde de l'usine du XXI^e 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

Integrated 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 emplies 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 abordable par 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 différents 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.

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, puis 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	5
Chapitre 2 ■ Les axes de travail	25
Chapitre 3 ■ Les enjeux	39

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.

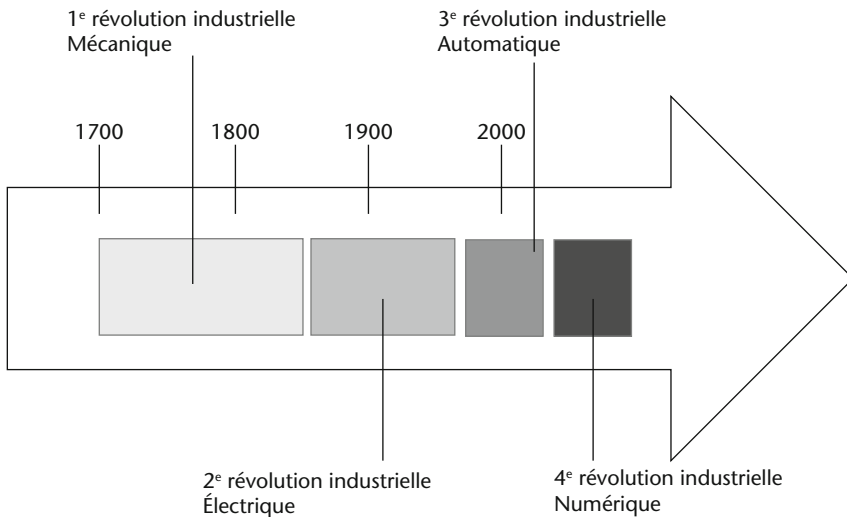


Figure 1.1 – Les quatre révolutions industrielles

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^{ème} siècle, puis se propage en France au début du XIX^{ème} 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 2^{ème} révolution industrielle commence à la fin du XVIII^{ème} 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 habilité 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 est 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.

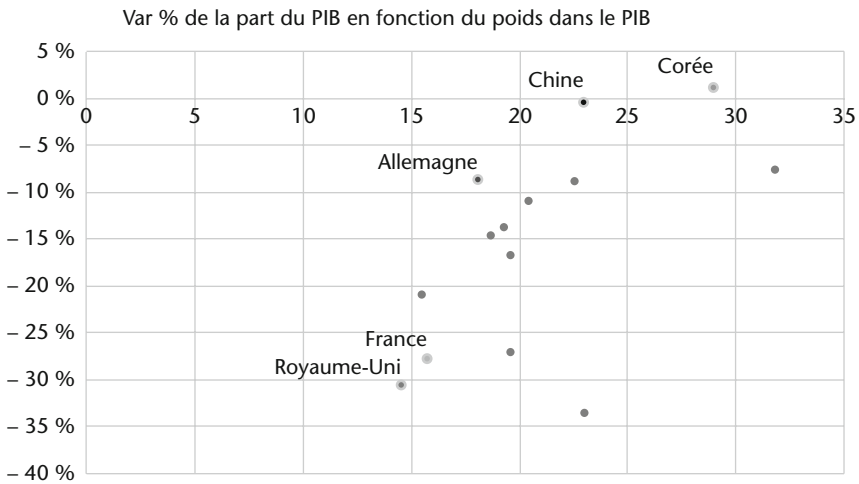
Objets connectés : un déploiement exponentiel

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 en fonction du poids de l'industrie dans ce dernier pour différents pays. Ceux pour lesquels l'industrie a le poids le plus important dans le PIB sont ceux qui connaissent une variabilité moindre.



D'après les données de la Banque mondiale

Figure 1.2 – Variabilité du PIB en fonction du poids de l'industrie

L'Allemagne a été un précurseur mondial avec le concept *Industrie 4.0* issu d'une réflexion regroupant les mondes industriel, politique et académique dès les années 2000. Y voyant l'opportunité de redevenir compétitifs et de recréer des emplois, l'ensemble des pays industriels matures ont par la suite décliné leur propre programme de renouveau industriel, vite suivis par les pays émergents.

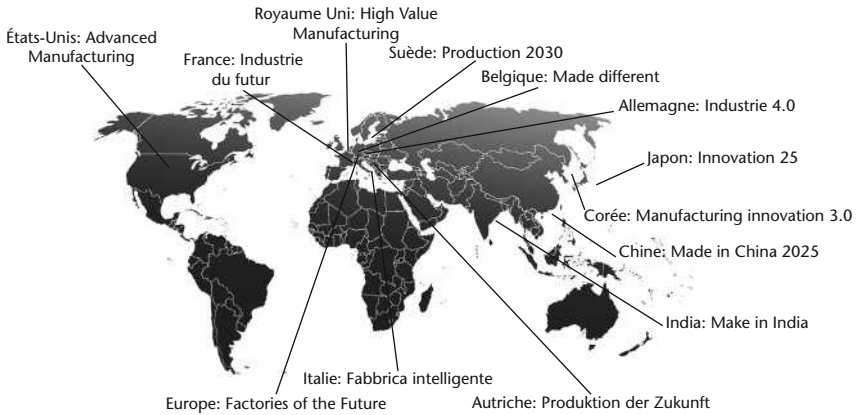
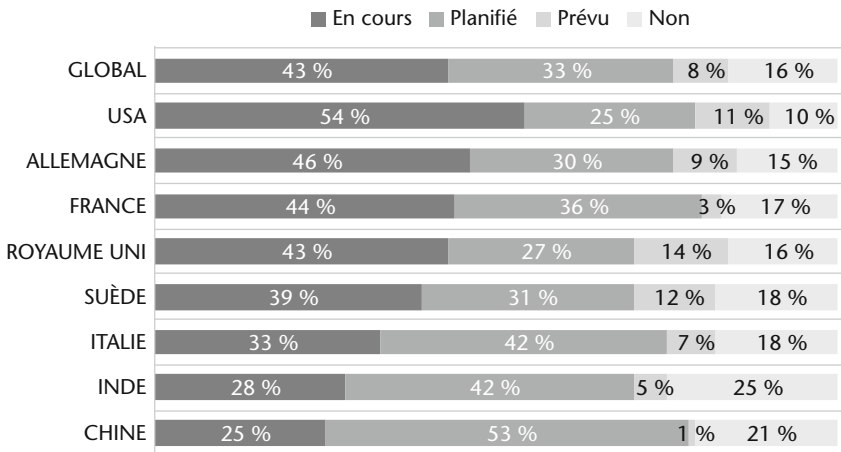


Figure 1.3 – Le contexte international (© pirate-Fotolia)

La Figure 1.3 indique les initiatives lancées au niveau mondial et la Figure 1.4 montre l'état d'avancement des projets d'implantation d'usine du futur pour différents pays.



Source : Cap Gemini

Figure 1.4 – Implantation mondiale des usines du futur