

Nathalie JULIEN • Éric MARTIN

LE JUMEAU NUMÉRIQUE

De l'intelligence artificielle
à l'industrie agile

DUNOD

Direction artistique : Élisabeth Hébert
Conception graphique de la couverture : Pierre-André Gualino
Illustrations de couverture : Chesky/shutterstock
Mise en pages : 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^{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, 2020

11 rue Paul Bert, 92240 Malakoff

www.dunod.com

ISBN 978-2-10-080028-5

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

Introduction	1
---------------------	----------

Partie 1

Un élément clé de la transition numérique

Chapitre 1 ■ L'Industrie du futur	7
1.1 Une transformation de la société	7
1.1.1 Le consomm'acteur	7
1.1.2 L'expérience utilisateur	8
1.1.3 La notion de travail évolue	9
1.1.4 Une collaboration humain-système	9
1.2 La 4 ^e révolution industrielle	10
1.2.1 Dans le monde	10
1.2.2 <i>Digital factory</i> et <i>digital manufacturing</i>	11
1.2.3 Les systèmes cyber-physiques	12
1.3 Une entreprise performante	12
1.3.1 Transformer les organisations	13
1.3.2 Une usine tournée vers le client	14
1.3.3 Une usine innovante	15
1.4 Une entreprise agile	16
1.4.1 Une usine connectée	16
1.4.2 Une usine flexible	18
1.5 Une entreprise responsable	19
1.5.1 Une usine propre	19
1.5.2 L'humain au centre de la production	22
Chapitre 2 ■ Les différentes formes du jumeau numérique	25
2.1 Les origines du concept	26
2.2 De nombreuses définitions	27
2.2.1 Le degré de maturité	28
2.2.2 L'objet modélisé tout au long de sa vie	29
2.2.3 Les types de données	31
2.2.4 Les usages	32

2.3 Des technologies clés	34
2.3.1 <i>Internet of Things IoT</i>	34
2.3.2 <i>Industrial Internet of Things IioT</i>	34
2.3.3 API	35
2.3.4 <i>Big data</i>	35
2.3.5 <i>Cloud computing</i>	35
2.3.6 <i>Data mining</i>	36
2.3.7 Intelligence artificielle	36
2.3.8 Aide multicritère à la décision	37
2.3.9 Réalité virtuelle	38
2.3.10 Réalité augmentée	38
2.3.11 Cybersécurité industrielle	38
2.4 Une vision intégrée	39
Chapitre 3 ■ Le numérique dans l'industrie	43
3.1 L'omniprésence de la donnée	43
3.1.1 La donnée opérationnelle	45
3.1.2 La donnée pour la gestion	46
3.1.3 La donnée liée à l'environnement	47
3.2 Le système de fabrication intelligent SMS	48
3.2.1 Productivité	50
3.2.2 Agilité	50
3.2.3 Qualité	50
3.2.4 Durabilité	52
3.3 L'usine numérique	52
3.3.1 Intégration verticale	52
3.3.2 Intégration horizontale	55
3.3.3 Intelligence intégrée	58
3.4 La continuité numérique	60
3.4.1 Flux digital	60
3.4.2 Des données diverses	60
3.4.3 Cohérence des données	61
3.4.4 Interopérabilité	61
3.5 Pour une donnée raisonnée	62
3.5.1 Une donnée sécurisée	62
3.5.2 La sobriété numérique	63
3.5.3 Du <i>Big data</i> au <i>Lean data</i>	65
3.5.4 L'exclusion numérique	66
3.5.5 La propriété de la donnée	66

Partie 2

Enjeux et moyens

Chapitre 4 ■ L'impact pour l'entreprise	71
4.1 Un marché prometteur	71
4.1.1 Un contexte favorable	71
4.1.2 Une recherche en émergence	72
4.1.3 Des entreprises engagées	73
4.2 Des secteurs d'activité variés	74
4.2.1 Aérospatial	74
4.2.2 Automobile	75
4.2.3 Énergie	75
4.2.4 Transports	77
4.2.5 Santé	78
4.2.6 Infrastructures et urbanisme	79
4.2.7 Production	80
4.2.8 Divers	81
4.3 Les bénéfiques	82
4.3.1 L'intérêt du jumeau numérique dans le PLM	82
4.3.2 Améliorer les performances	84
4.3.3 Générer de nouveaux <i>Business models</i>	85
4.3.4 Favoriser la collaboration	85
4.4 Des défis importants	86
4.4.1 Un investissement conséquent	86
4.4.2 Une structure des données à définir	87
4.4.3 Des personnes à former	88
4.4.4 Des données à protéger	88
Chapitre 5 ■ Une large gamme d'applications	89
5.1 Fabriquer une usine	89
5.1.1 Maquette numérique et implantation	90
5.1.2 Évolutions et flexibilité	90
5.2 Optimiser une ligne	91
5.2.1 Améliorer les performances	92
5.2.2 Visualiser par la réalité augmentée	93
5.2.3 Modéliser différents objets	94
5.2.4 Anticiper les problèmes	95
5.2.5 Gérer la qualité	96
5.2.6 Reconfigurer le système	96

5.3 Former un opérateur	97
5.4 Organiser un chantier	98
5.5 Maintenir un équipement	101
5.5.1 Aide au diagnostic	101
5.5.2 Aide à l'intervention	102
5.5.3 Télémaintenance	102
5.5.4 Maintenance prédictive	103
5.6 Gérer un produit	106
Chapitre 6 ■ Concevoir son jumeau	109
6.1 Démarche	109
6.1.1 Une démarche adaptée	109
6.1.2 Une démarche progressive	112
6.1.3 Une démarche transversale	113
6.1.4 Une démarche sécurisée	114
6.1.5 Une démarche évolutive	115
6.2 Questions importantes	115
6.2.1 Stratégie	115
6.2.2 Connaissances et moyens	116
6.2.3 Définition et structure	116
6.2.4 Communication et facteur humain	117
6.3 Les outils	117
6.3.1 Plateformes <i>IoT</i> et <i>Cloud</i>	118
6.3.2 Logiciels d'analyse et de simulation	118
6.3.3 Logiciels intégrant l'IA	119
6.4 Méthodologie proposée	119
6.4.1 Établir les modèles et l'architecture	120
6.4.2 Développer les usages	123
6.4.3 Mettre en œuvre les applications	124
6.5 Paroles d'experts	125
6.5.1 L'implémentation doit rester au plus près des cas d'usages demandés par les utilisateurs	125
6.5.2 Des jumeaux pour tous les contextes	129
6.5.3 La stratégie du jumeau numérique	131
6.5.4 La transformation du management par le numérique	133
6.5.5 L'interaction homme-système est primordiale	135

Partie 3

Mise en œuvre

Chapitre 7 ■ De la donnée aux modèles	141
7.1 Principales caractéristiques de l'architecture	141
7.1.1 Une architecture multi-dimensionnelle	141
7.1.2 Une architecture hiérarchisée	142
7.1.3 Une connectivité temps réel	144
7.1.4 Des modèles variés et interopérables	144
7.1.5 Une architecture sécurisée	145
7.2 Le patrimoine digital	146
7.2.1 Recueillir	146
7.2.2 Intégrer	148
7.2.3 Exploiter	150
7.2.4 Fiabiliser	151
7.3 La standardisation	152
7.3.1 De nombreux standards pour le SMS	153
7.3.2 Modèle RAMI 4.0	160
7.3.3 Norme ISO 23247	161
Chapitre 8 ■ Des modèles aux usages	163
8.1 Les outils scientifiques	163
8.1.1 Analyse des données	163
8.1.2 Apprentissage automatique	167
8.2 Définition des usages	170
8.2.1 Analyse et simulation	171
8.2.2 Optimisation et cognition	174
8.2.3 Conceptualisation, comparaison et collaboration	175
8.3 Une plateforme de services	178
Chapitre 9 ■ Des usages aux applications	181
9.1 Méthodologie de déploiement	181
9.1.1 Définir les applications	182
9.1.2 Définir les usages	183
9.1.3 Déterminer les services	184
9.1.4 Définir les données et les modèles	186
9.2 Paroles d'experts	187
9.2.1 Le jumeau numérique pour la logistique	187
9.2.2 Un jumeau spécifique pour l'industrie chimique	188
9.2.3 L'expérience du jumeau numérique chez EDF	190
9.2.4 Le jumeau numérique dans le secteur naval	193

Le jumeau numérique

9.2.5	Le jumeau numérique pour le bâtiment	195
9.2.6	Le jumeau numérique dans le secteur pétrolier	198
9.2.7	Ordonnancement de ligne faible consommation	200
9.2.8	Entretien de la flotte de turbines à gaz de Siemens	202
9.3	Vers un Internet des jumeaux ?	204
9.3.1	Une avancée majeure	204
9.3.2	Différentes versions d'un jumeau numérique	204
9.3.3	Accompagner le changement	205
9.3.4	Un jumeau personnalisé	205
9.3.5	De l'Internet des objets à l'Internet des jumeaux	206
	Conclusion	207
	Remerciements	209
	Glossaire	211
	Bibliographie	227
	Index	230

Introduction

Le jumeau numérique est un concept récent dans le monde industriel mais son essor depuis 2017 est impressionnant, à tel point que certains parlent de *buzz word*, c'est-à-dire de mot à la mode. En effet, on peut être tenté d'y voir une simple mode, d'autant que les contours de ce concept sont encore flous ; on dénombre plus de 50 articles de recherche proposant chacun une nouvelle définition du terme *digital twin*. Mais cette confusion des premiers pas ne doit pas cacher l'énorme enjeu que représente le jumeau numérique pour le domaine industriel car il est l'un des piliers de l'Industrie 4.0 en permettant la fusion des espaces physique et virtuel pour créer le système cyber-physique sur lequel est basée la 4^e révolution industrielle.

Dans une industrie en pleine transformation, en quête de compétitivité, d'efficacité et d'accroissement de valeur ajoutée, le jumeau numérique permet une meilleure transversalité pour l'ensemble des acteurs de la chaîne de valeur, tant en interne qu'en externe, et cela allant du concepteur à l'exploitant. Le déploiement de cette technologie, porté par l'innovation ainsi que par le besoin de réduire les coûts et le temps de développement des produits, est aussi accéléré par le déploiement de l'IoT et du *Big data*.

Surtout présent en Allemagne, en Chine et aux États-Unis, le jumeau numérique est encore peu connu en France. Pourtant, la variété de ses applications combinée à un contexte technologique et économique très favorable à son développement fait que le jumeau numérique fera bientôt partie de notre quotidien. Car il permet non seulement de renforcer la performance des produits, d'anticiper les étapes de leur cycle de vie, mais aussi d'optimiser les performances des lignes de production ou de développer de la maintenance prédictive.

Dans l'aéronautique, où le jumeau numérique est né, il permet de simuler les réactions physiques des engins, de surveiller le fonctionnement des systèmes et d'assurer la sécurité des équipages. Dans la construction, il permet de vérifier comment le bâtiment évolue dans son environnement, de déterminer l'ampleur des travaux ou les éventuels problèmes de sécurité à venir. Dans l'industrie automobile, il contribue à la sécurité des véhicules en contrôlant les systèmes ou les pièces devant être remplacées et en alertant les équipes de maintenance. Chacun pourra, au travers du jumeau numérique, développer des opportunités de créer une continuité numérique lui permettant de faire évoluer tant ses services que son modèle économique.

Nous sommes enseignants-chercheurs dans une école d'ingénieurs et responsables du projet Industrie du futur (*Digital Factory & Manufacturing*) au sein du laboratoire UMR CNRS LabSTICC, donc 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, les recherches académiques et la réalité du terrain chez nos partenaires industriels. Il y a deux ans, nous écrivions un premier ouvrage sur l'usine du futur¹ dans lequel nous exprimions, concernant le jumeau numérique : « C'est une technologie en fort développement dans le domaine de l'industrie car ces applications sont multiples : dans le domaine de la conception pour vérifier en amont très tôt les qualités du produit ou du système ; dans le domaine de la formation pour générer un avatar numérique qui interagit par la réalité virtuelle avec l'utilisateur à former ; dans le domaine de la surveillance pour simuler en parallèle le fonctionnement du système réel et signaler les dérives de comportement ; dans le domaine du fonctionnement où un modèle numérique intégré au système automatisé lui permet de s'autocorriger en cas de dérive de comportement et s'auto-adapter en cas d'évolution du contexte. »

Depuis, le jumeau numérique a continué à se développer et surtout à s'imposer comme un défi pour tous, défi non seulement technique, mais également organisationnel et humain ; il nécessite la collaboration de l'ensemble des acteurs pour créer un outil efficient et respectueux de l'humain. Ce livre fait donc le point sur cette idée émergente afin de répondre à de nombreuses questions qu'elle soulève ; il est évident qu'on peut s'attendre à de fortes évolutions dans les prochains mois. Cependant, le but de cet ouvrage est d'informer, d'éclairer et de fournir des pistes de réflexion aussi bien pour le grand public que pour les professionnels et les responsables qui s'interrogent sur les méthodes et les outils à mettre en place. Ce livre propose une première approche des différentes problématiques et une méthodologie générale pour la mise en œuvre d'un jumeau numérique dans un contexte industriel. 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.

Le livre est composé de trois parties : la première partie donne les éléments de contexte, la deuxième les enjeux et les moyens, la troisième développe la mise en œuvre.

1 N. Julien, E. Martin, *L'Usine du futur – Stratégies et déploiement*, Éditions Dunod, 2018.

Dans la première partie, vous trouverez dans le chapitre 1 une introduction aux principes clés de l'Industrie 4.0 ou Industrie du futur dont le jumeau numérique est un élément majeur ; ce chapitre reprend le contexte de la transition numérique dans l'industrie et les conclusions de notre premier ouvrage en définissant une nouvelle vision de l'entreprise, performante, agile et responsable. Le chapitre 2 rappelle l'historique de la notion de jumeau numérique, ses différentes définitions et les technologies clés sur lesquelles il repose, avant d'introduire notre vision intégrant les aspects modèles, usages et applications. Le chapitre 3 propose un panorama du numérique dans l'industrie, les données, les outils et les modèles.

La deuxième partie propose d'examiner l'intérêt de mettre en place le jumeau numérique dans ce contexte. Le chapitre 4 expose l'impact pour l'entreprise, les secteurs d'activité concernés, les bénéfices attendus et les défis à surmonter. Le chapitre 5 développe toutes les applications possibles dans le monde industriel et le chapitre 6 donne quelques premiers éléments d'une démarche de déploiement illustrés par des témoignages d'industriels proposant des outils.

La troisième partie détaille la structure et l'organisation que nous proposons pour développer votre propre jumeau numérique. Le chapitre 7 expose comment on peut recueillir les données et les assembler ou les transformer en modèles. Le chapitre 8 indique l'ensemble des usages qui pourront être construits sur ces modèles et la structure d'une architecture du jumeau numérique basée sur les usages. Le chapitre 9 indique le développement des applications à partir des usages ; ce chapitre donne également la parole à des experts industriels qui partagent leur expérience de la mise en œuvre du jumeau numérique.

Comment lire ce livre ? À votre rythme et selon votre besoin... Soit en suivant la progression qui vous est proposée en allant de plus en plus vers les aspects 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.

Partie 1

Un élément clé de la transition numérique

Chapitre 1 ■ L'Industrie du futur	7
Chapitre 2 ■ Les différentes formes du jumeau numérique	25
Chapitre 3 ■ Le numérique dans l'industrie	43

Chapitre 1

L'Industrie du futur

Ce chapitre introduit le concept d'Industrie du futur, réponse indispensable à la transition numérique que vit notre société, et les paradigmes qui l'accompagnent. Il rappelle qu'il est nécessaire pour le monde industriel d'évoluer vers une nouvelle vision de l'entreprise, performante, agile et responsable.

1.1 Une transformation de la société

Notre société connaît une profonde mutation liée aux technologies numériques. Avec 150 milliards d'objets connectés annoncés dans le monde de 2025, la collaboration et la personnalisation deviennent deux éléments clés de notre vie quotidienne. Ce n'est plus seulement notre façon de communiquer qui évolue, mais aussi notre mode de vie, nos moyens d'interagir dans la société, jusqu'à transformer notre façon de penser, nos exigences et notre vision du travail. Notre manière de consommer en est donc impactée, nos besoins et nos attentes en termes de produit comme de service ont grandement évolué vers plus de qualité, de personnalisation de produit, d'accompagnement par les services mais aussi d'éthique avec l'impact environnemental et sociétal. De plus, l'innovation dans les usages est devenue plus importante que l'innovation dans les technologies.

1.1.1 Le consomm'acteur

L'utilisateur fait de nos jours un usage incessant des outils numériques pour s'informer, pour consommer, pour établir des liens sociaux... Il a donc de nouvelles attentes comme une personnalisation de plus en plus poussée, des variations rapides avec des nouveautés constantes, des délais de livraison courts avec des modes de livraison adaptés, un niveau d'exigence élevé, une réactivité à ses besoins... Grâce au développement des moyens d'accès et de partage de l'information, il est mieux informé et devient influent ;

les forums deviennent des contre-pouvoirs puissants pour accepter ou rejeter rapidement un produit. Le client doit être observé pour être connu et identifié, il s'attend à être mieux écouté, impliqué dans la définition de l'offre voire dans la conception du produit car il se sent de plus en plus concerné par ce qu'il consomme et établit un lien très personnel avec les marques ; pour qualifier ces nouveaux comportements, on parle de consomm'acteur ou de pro-sommateur (pour producteur-consommateur) pour reprendre l'expression de l'économiste Jeremy Rifkin.

1.1.2 L'expérience utilisateur

Nombre de produits du quotidien sont devenus complexes, comprenant des composants mécaniques, électroniques et de l'informatique embarquée. Ils incorporent une part grandissante de logiciels pour fonctionner et deviennent ainsi intelligents et communicants. Cependant, cette complexité se doit d'être transparente pour s'effacer au profit de l'expérience utilisateur qui occupe une place prééminente dès la conception.

L'expérience utilisateur définit le ressenti de l'utilisateur et sa perception de la qualité du produit ; cela intègre donc l'ensemble des prestations et services associés au produit final. Pour répondre à ces nouveaux besoins, les entreprises doivent donc développer non seulement le design et l'ergonomie aussi bien matérielle que logicielle mais également la connaissance de leurs clients en instaurant avec eux un climat de confiance et de collaboration. Une première possibilité consiste à intégrer des capteurs remontant des informations sur l'utilisation du produit, son paramétrage et les habitudes du client. On peut aussi associer les clients au processus de conception, en leur donnant la possibilité de donner leur avis, par exemple *via* les réseaux sociaux.

Nous sommes donc à présent dans une économie de la fonctionnalité, basée sur la valorisation de l'usage et du service. Il s'agit de proposer une solution complète à la demande client intégrant de plus en plus de services accompagnant le produit qui se transforme ainsi en une véritable plateforme à partir de laquelle le fabricant peut fournir un bouquet de services à valeur ajoutée : réglage personnalisé du produit, télémaintenance, mise à jour fonctionnelle, conseils autour de l'utilisation... Certains parlent alors de méta-produit. Un méta-produit est fortement axé sur le client, intelligent et personnalisable, intégrant des unités sensorielles/informatiques, puisant de l'information distribuée dans le *Cloud*, avec une tendance de production collaborative (à travers Internet) de produits configurables et intelligents. Les fonctionnalités requises d'un nouveau méta-produit seront configurées

par les utilisateurs finaux ; ceci touche aussi bien les vêtements personnalisés que les robots de production et d'assistance.

1.1.3 La notion de travail évolue

On va vraisemblablement assister sur les prochaines années à une transformation des emplois et de la notion même de travail. En effet, de plus en plus de travailleurs recherchent autonomie et flexibilité comme le confirme l'augmentation de l'auto-entrepreneuriat. De plus, le travail à la demande se généralise et le travail à distance devient possible notamment avec le jumeau numérique ; dans les usines virtuelles, nul besoin que l'expertise soit dans l'usine. Les jeunes générations sont beaucoup plus à l'aise avec les technologies numériques mais ils sont aussi plus exigeants vis-à-vis de leurs employeurs. Ils recherchent un travail qui ait du sens, des entreprises qui affichent leurs valeurs ; ils sont souvent difficiles à fidéliser dans une entreprise car ils n'hésitent pas à changer d'emploi ou à le cumuler avec une autre activité très différente plutôt que de se définir par leur seule carrière. Ils le revendiquent même et les *slashers* (personnes qui ont plusieurs activités) seraient plus de deux millions en France.

Dans certains pays et pour certains secteurs de l'industrie, il devient donc très difficile de recruter sur des postes à faible valeur ajoutée. De plus, on estime que 75 % des métiers actuels de l'industrie ont une probabilité forte d'être automatisés partiellement ou totalement ; les emplois directs sur la ligne de production seront probablement les plus touchés. On peut prévoir une période de transition avec la disparition et la transformation de certains emplois avant que de nouveaux émergent, autour de services ou d'activités innovantes. De nouvelles compétences deviennent nécessaires dans l'entreprise comme dans la société et de nouveaux métiers s'imposent, comme le *data scientist*, capable de traiter et d'interpréter les données métiers pour en extraire de la connaissance.

1.1.4 Une collaboration humain-système

L'icône définit une économie numérique qui serait parvenue à sa pleine efficacité ; elle décrit cette évolution du travail comme le passage de la main-d'œuvre au « cerveau d'œuvre » qui représente la collaboration entre le cerveau humain et l'automate ou la ressource informatique. Les tâches répétitives ou pénibles sont automatisées pour laisser l'humain s'occuper de la conception de produits nouveaux, des traitements des cas particuliers et des aléas, des services... Donc l'humain se charge des tâches à plus forte valeur ajoutée pour les parties le plus en interaction avec le client, l'expertise et le pilotage,

plus valorisantes mais nécessitant plus de compétences. Malgré les progrès des interfaces humain-machine, chacun devra adapter son rôle et ses compétences aux nouvelles technologies. On peut également permettre à l'opérateur de se former *via* un OTS (*Operator Training Simulator*), environnement dynamique qui reproduit les conditions du process industriel.

Avec la dématérialisation et l'interconnexion des produits, des machines et des individus, les communications quasi instantanées *via* un réseau d'interconnexion mondial, les frontières spatiales, économiques, sociales sont abolies. Le volume des données explose, l'information est certes accessible, mais peu savent véritablement exploiter ces données pour en extraire des connaissances qui vont permettre l'innovation indispensable pour répondre à des besoins qui évoluent très vite.

La donnée est devenue le moteur de l'évolution des entreprises. Car auparavant, la donnée, et la connaissance qui en découle, étaient considérées comme des objectifs. L'universalité et l'accessibilité des données dans notre société actuelle en font à présent des moyens pour donner un sens au travail, le décharger des aspects pénibles, répétitifs et le rendre attractif. L'information étant accessible, ce qui donne du sens, c'est de comprendre ce qu'on fait et pourquoi, comment on le fait et comment on interagit avec les autres, mais également comprendre ce que font les autres, pourquoi et quels sont leurs besoins.

1.2 La 4^e révolution industrielle

Digital manufacturing, smart factory, usine du futur, Industrie 4.0... les termes pour qualifier la transition numérique dans l'industrie foisonnent. L'Industrie du futur serait la marque de la 4^e révolution industrielle. La 1^e révolution se déroule de 1760 à 1840 avec la machine à vapeur qui permet la production mécanisée et les chemins de fer. La 2^e révolution démarre à la fin du XIX^e siècle avec la production de masse grâce à l'électricité et les chaînes de montage. La 3^e révolution industrielle émerge dans les années 1960 avec la naissance de l'informatique et la robotisation. La 4^e révolution a lieu maintenant avec l'interconnexion des moyens de production et le développement de l'intelligence artificielle. Les changements qu'elle implique se diffusent beaucoup plus rapidement que les précédentes.

1.2.1 Dans le monde

C'est l'Allemagne qui a été le précurseur 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.

En Europe, l'ensemble des pays ont suivi l'initiative allemande. Horizon 2020 du 8^e PCRD est un programme européen incluant l'initiative *Factories of the Future* (FoF), partenariat public-privé de recherche et développement visant à aider les entreprises manufacturières à faire face à la concurrence internationale en soutenant le développement de technologies clés génériques (KET) à l'usage des différentes industries de fabrication. La Commission européenne s'est engagée à fournir des financements à hauteur de 1 150 M€ (sur 7 ans) pour soutenir le développement de nouvelles techniques et de nouveaux systèmes de production pour l'industrie de fabrication.

En France, le projet Industrie du futur a été lancé en 2015. L'objectif est de relancer le secteur industriel français en comblant son retard, en modernisant l'appareil productif et en accompagnant sa transformation numérique afin de s'adapter aux nouveaux usages et gagner en compétitivité. Ce projet, similaire au plan allemand mais donnant une part plus importante à l'humain et à l'énergie, est piloté par l'Alliance Industrie du futur.

Le fait de réaliser sur le territoire des tâches complexes et innovantes, en proposant de plus petites séries et en s'adaptant rapidement à la variation de la demande, constitue une réponse forte à la concurrence internationale et la délocalisation dont on perçoit aujourd'hui les limites avec les problèmes de qualité et de compétences. Cela nécessite de repenser notre modèle de production et d'élargir la vision du produit.

1.2.2 *Digital factory et digital manufacturing*

Cette 4^e révolution qu'est l'Industrie du futur représente un système global inter-communicant avec des usines flexibles, intégrées et connectées. Toutes les briques technologiques sont déjà existantes : objets connectés et capteurs, automates, robotique, mobilité, *Big data* et *Cloud*, biotechnologies, énergies renouvelables, intelligence artificielle, stockage de l'énergie électrique, nouveaux matériaux... C'est justement la conjonction de toutes ces possibilités et leur combinaison qui offre un énorme potentiel d'évolution.

Reposant sur ces technologies existantes ou émergentes, il s'agit 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. Il ne s'agit donc 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. Cette révolution