

Industrie 4.0 : quelles stratégies numériques ?

**La numérisation de l'industrie
dans les entreprises du *Mittelstand* allemand**

Novembre 2015 – Paris - Berlin



AUTEURS

Dorothee Kohler, Directeur Général, KOHLER C&C

Jean-Daniel Weisz, Associé, KOHLER C&C

Editorial de Nicolas Dufourcq

France, USA, Corée du Sud, Allemagne, Chine, la course vers l'Industrie du Futur, la *Smart Factory* ou l'Industrie 4.0 est maintenant engagée. Une majorité d'industriels dans chaque pays ont compris qu'ils n'échapperaient pas à la vague numérique et qu'ils doivent réaliser de nouveaux apprentissages, repenser les avantages compétitifs de leur entreprise et imaginer de nouveaux *business models*. La donne a changé : « Ce ne sont pas les plus gros qui mangeront les petits...mais les plus rapides qui mangeront les plus lents ! » comme l'illustre cette étude.

Au-delà des seules industries BtoC, c'est tout l'écosystème industriel qui est concerné par la transformation numérique : le client n'est plus en bout de chaîne mais investi d'un nouveau pouvoir où derrière chacun de ses besoins avérés ou à révéler se cache l'algorithme d'une nouvelle application. La révolution numérique est en train d'effriter les frontières entre le BtoB et le BtoC en interconnectant en temps réel des offres et des demandes qui s'ignoraient.

Les cloisons entre filières, branches et métiers vont tomber pour laisser la place au génie de l'hybridation, du collaboratif et de l'instantané. Dans ce nouvel environnement, devenir et rester leader ne s'apparente plus à une course en solitaire au long cours. L'avantage ira à celui qui saura, en associant ses clients, faire naître des complémentarités insoupçonnées entre des *business*.

Nous avons la chance extraordinaire de pouvoir inventer nos nouveaux avantages compétitifs et de tirer parti des atouts de la France, en particulier dans les TIC. Un des enseignements clés de cette note sur l'Industrie 4.0 est de nous montrer comment, en Allemagne, un nouvel imaginaire industriel et le foisonnement de partenariats sont en train de fertiliser de nouveaux terrains de croissance pour les entreprises du *Mittelstand*.

Industrie 4.0 est une vision industrielle où les chefs d'entreprise, les chercheurs, les universitaires, les représentants de l'Etat et des organisations syndicales s'associent

pour relever le défi de la numérisation 4.0. Elle questionne toutes les dimensions de l'entreprise et de la société : technologies de production, modes de consommation, marché du travail, formation, manière de manager, dialogue social, efficacité de l'Etat, politique énergétique, coûts de production, sécurité des données d'usage....

Et le financement ! Les investissements numériques sont lourds, avec des ROI longs. De nombreux chefs d'entreprise demandent à être accompagnés dans ce contexte de forte incertitude. Ils connaissent l'engagement de Bpifrance à leurs côtés. Avec son offre dédiée numérique, Bpifrance est déjà positionnée comme un acteur de référence pour le financement de la transformation numérique auprès des ETI et des PME.

Je souhaite que ce voyage exploratoire Outre-Rhin vous donne envie d'en savoir plus et de conquérir cette industrie du futur sans frontière.

Nicolas Dufourcq

Sommaire

Editorial de Nicolas Dufourcq	3
Sommaire	5
Les 6 idées clés à retenir	6
Introduction	7
1. Industrie 4.0 : une utopie allemande ?	10
1.1. La vision d'une quatrième révolution industrielle	10
1.2. Un marché potentiel énorme.....	18
1.3. La peur de perdre le leadership industriel.....	20
1.4. Quand la construction d'un nouvel imaginaire industriel chasse la peur	22
2. Quel est l'impact du numérique sur la chaîne de valeur ?	23
2.1. Des impacts sur toute la chaîne de valeur	23
2.2. L'éclatement de la chaîne de valeur	25
2.3. Une frontière de plus en plus ténue entre industrie et services	31
2.4. Coopérations au sommet pour les <i>global players</i> de l'Industrie 4.0.....	35
3. Comment les entreprises du <i>Mittelstand</i> réagissent face à la numérisation ?	40
3.1. Un désintérêt apparent du <i>Mittelstand</i> face à la numérisation	40
3.2. Le rôle des barrières culturelles et psychologiques	42
3.3. Cybersécurité : une peur justifiée	48
3.4. Des démonstrateurs pour évangéliser	52
3.5. L'effet d'entraînement du <i>Mittelstand</i> premium	55
Conclusion.....	61
Bibliographie sélective.....	63
Remerciements	65

Les 6 idées clés à retenir

1. Pour les Allemands, l'Industrie 4.0 tire son nom de l'avènement de la 4^{ème} révolution industrielle : l'introduction de l'internet des objets dans la production.
2. L'Industrie 4.0 répond au besoin d'individualisation croissante des produits et à la peur de voir des géants de l'internet comme Google capter l'exclusivité de la relation avec le client et monopoliser l'accès à ses données d'usage.
3. L'Industrie 4.0 est une ambition technologique qui consiste à produire des séries de taille 1 à des coûts équivalents à ceux de la production de masse.
4. Il s'agit de construire une offre allemande dans les technologies liées aux process de production et d'anticiper l'émergence de nouvelles chaînes de création de valeur, de nouveaux *business models* industriels avec leurs impacts en termes d'organisation du travail et de compétences métier.
5. Au-delà des avancées technologiques, le projet Industrie 4.0 initie un vaste mouvement de coopérations, de partenariats et d'alliances pour marier les industries mécaniques, électrotechniques et les technologies de l'internet.
6. Dans le mouvement de transformation digitale du tissu industriel, le *Mittelstand* premium (l'équivalent de nos ETI) joue un rôle majeur d'entraînement vis-à-vis des entreprises plus petites.

Introduction

Longtemps, l'industrie a pensé être à l'abri de la numérisation. Encore récemment, le dirigeant d'une entreprise du CAC40 soulignait sa prise de conscience tardive de ses enjeux : « il y a encore 2 ans, je pensais que c'était pour les autres ; aujourd'hui je ne dis plus ça ; tous les *business models* vont être attaqués ou sont déjà en train de l'être ; il y a une nécessité absolue à repenser la chaîne de valeur ; nos clients nous apportent de l'innovation ! » (Pierre-André de Chalendar, PDG de Saint Gobain).

Les grands groupes français disposent des ressources pour appréhender la transformation numérique. Mais qu'en est-il des PME et des ETI ?

Si la mobilisation des PME et des ETI est un enjeu affiché dans le projet de l'Alliance pour l'Industrie du Futur, il est essentiel de rendre visibles les enjeux de la numérisation de l'industrie pour ces entreprises et de faire de la transformation numérique une priorité pour leurs dirigeants.

La première difficulté vient de ce que la numérisation touche simultanément deux niveaux où s'expriment des résistances et des peurs face au changement :

- celui du développement et de l'intégration des technologies de la *smart factory* et de l'industrie 4.0 dans les entreprises,
- celui de la reconfiguration des *business models* existants avec l'apparition de nouveaux facteurs de compétitivité, d'une frontière de plus en plus ténue entre industrie et service et la captation possible de la valeur produite par les acteurs qui se sont rendus maîtres des données d'usage des clients.

Outre ce double enjeu de *change management* à grande échelle, les entretiens que nous avons menés auprès de chefs d'entreprise, nous ont permis d'identifier cinq idées communes largement diffusées en écho au challenge de la numérisation de l'industrie en France :

- ➔ « La numérisation touche avant tout le domaine des services avec les GAFANATU (Google, Apple, Facebook, Amazon, Netflix, Airbnb, Tweeter,

- Uber...)). L'industrie est donc faiblement concernée, surtout s'il s'agit d'entreprises dans le BtoB. »
- ➔ « A chaque pays, sa spécialité ! Les services de l'internet pour les USA, l'Industrie 4.0 pour l'Allemagne et les objets connectés pour la France. »
 - ➔ « La numérisation passe avant tout par des start-ups et l'internet des objets qui fournissent une nouvelle offre de services sans toucher directement à la sphère de la production industrielle. »
 - ➔ « La numérisation de l'industrie est un sujet à forts enjeux pour l'Allemagne où l'industrie mécanique et la production de biens d'équipement sont très présentes, moins pour la France. »
 - ➔ « La numérisation vise d'abord l'intensification de l'automatisation dans l'usine et l'introduction de robots. »

Ces idées communes montrent que la numérisation est davantage un sujet repoussoir pour les chefs d'entreprise des PME et ETI en France ou, au mieux, un sujet qu'ils estiment être suffisamment lointain pour ne pas en faire une priorité. Il est donc essentiel de partir des résistances mentionnées plus haut et de ces croyances pour parvenir à mobiliser les chefs d'entreprise.

Si le numérique ne connaît pas de frontières, les méfiances, résistances voire les craintes mêlées d'agacement sont également observables chez nos voisins Outre-Rhin. Avec une différence néanmoins essentielle : Industrie 4.0 est passé dans le langage courant. Ce terme est même devenu un incontournable pour afficher que l'entreprise a fait le grand saut dans la 4^{ème} révolution industrielle. Il est devenu un symbole, un logo, un marqueur d'innovation auquel on se doit d'adhérer car il est acquis que le numérique est en train de faire muter la société.

Cela fait maintenant près de 5 ans que le projet Industrie 4.0 a été lancé en Allemagne. Une durée qui justifie un retour d'expérience en s'abstenant de juger s'il s'agit d'un slogan marketing ou d'une vraie révolution industrielle. Ce n'est pas le sujet. Il est beaucoup plus intéressant d'observer ce que cette dynamique Industrie 4.0 suscite chez les chefs d'entreprise, d'essayer de décrypter les prémisses de cette

transformation, ce qu'elle laisse espérer, les questions qu'elle soulève et les enseignements qu'elle apporte.

Nous n'avons pas été en quête de spectaculaire mais davantage à l'écoute des hommes et des femmes acteurs et témoins de cette transformation Industrie 4.0. Une soixantaine d'interviews ont été menées depuis 2013 par le cabinet KOHLER Consulting & Coaching dont nous vous faisons partager ici les premières conclusions. L'exploitation complète des interviews donnera lieu à une publication début 2016 aux Editions de la Documentation française en partenariat entre Bpifrance, La Fabrique de l'industrie et le cabinet KOHLER Consulting & Coaching.

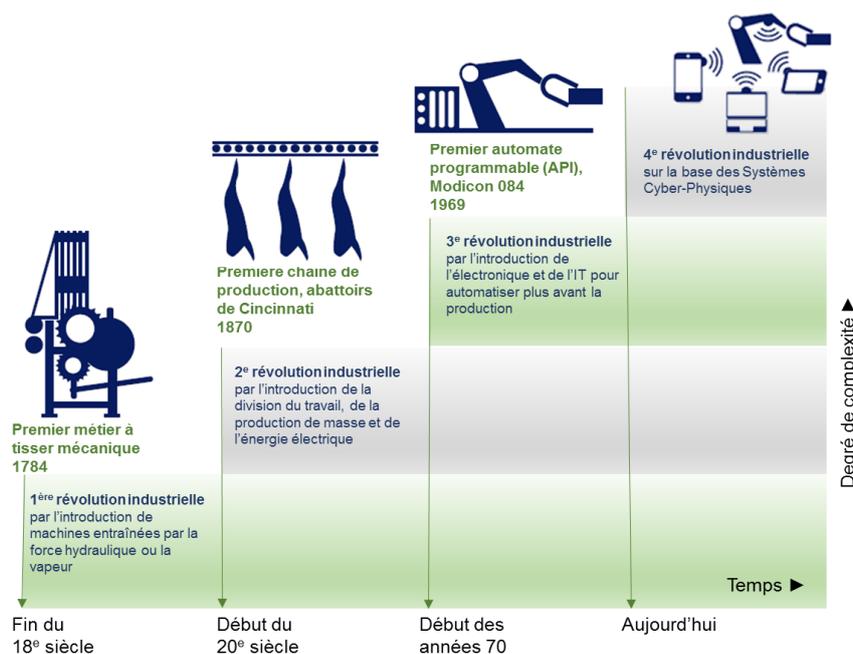
1. Industrie 4.0 : une utopie allemande ?

Dès l'origine, Industrie 4.0 se présente comme un rêve technologique : une application de l'internet des objets au monde des biens d'équipement. Le projet Industrie 4.0 vise ni plus ni moins à dessiner les contours d'une 4^{ème} révolution industrielle portée par la vision d'une mise en réseau de tous les éléments du processus de production pour construire l'usine ultra-connectée du futur, baptisée *integrated industry*, *smart factory* ou encore *digital factory*.

1.1. La vision d'une quatrième révolution industrielle

2.0..., 3.0..., 4.0... : les Allemands ont opté pour la dernière version ! Tous les jours, une étude, un rapport, un article chasse l'autre pour donner sa version des faits et enrichir le spectre du numérique dans l'industrie. Difficile de s'y retrouver dans cette masse de matériaux dont l'abondance à elle seule témoigne de l'enjeu qu'il y a à marquer le territoire, en un mot à normer ce champ naissant.

Figure 1 : La quatrième révolution industrielle



Source : ©DFKI, 2011

Le concept d'une 4^{ème} révolution industrielle a fait florès en Allemagne dès 2011 à la foire de Hanovre avec une représentation partagée par l'ensemble des parties prenantes (Industrie, Etat, syndicats, recherche). Elle démontre que l'Industrie 4.0 s'inscrit dans l'évolution logique de l'histoire industrielle et qu'elle est porteuse non seulement d'avancées technologiques mais également de progrès en termes d'organisation du travail.

Cette représentation des révolutions industrielles articule une avancée technologique avec un mode d'organisation du travail. A la suite des travaux de Jeremy Rifkin, il est surtout question en France de 3^{ème} révolution industrielle avec une approche qui articule des modes de communication avec de nouvelles sources d'énergie. Dans ce schéma, la 1^{ère} révolution industrielle est liée à la vapeur et à l'imprimerie, la seconde aux énergies électriques et aux moyens de télécommunication et la 3^{ème} sera guidée par l'internet et les énergies renouvelables. Cette grille de lecture retient d'autres déterminants que ceux des pères de l'Industrie 4.0. Faut-il y voir une différenciation dans la structure des systèmes productifs et la culture industrielle ?

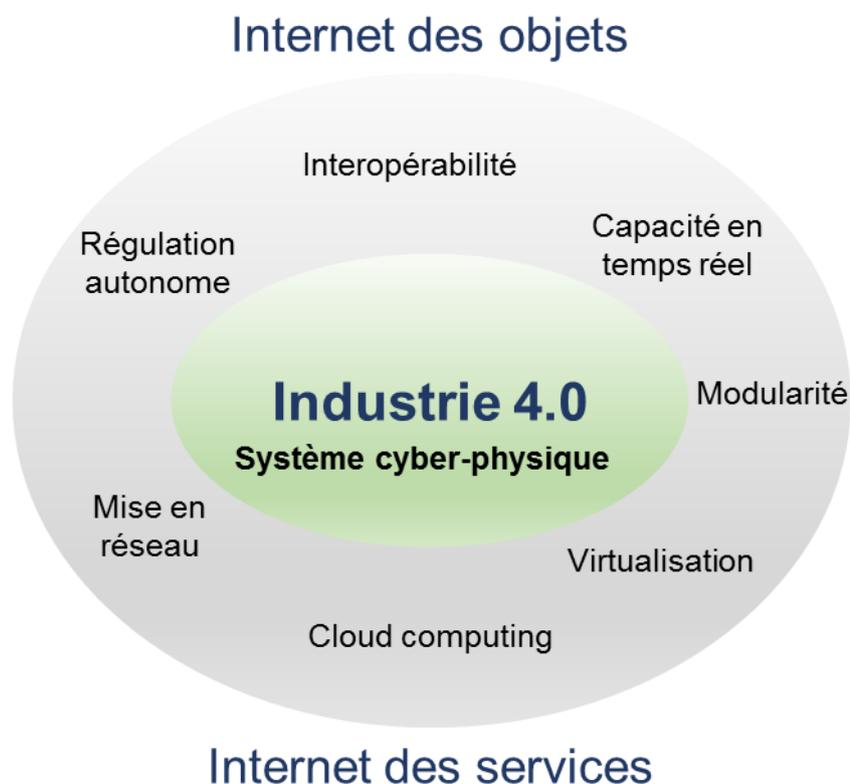
Dans la longue histoire de l'automatisation, depuis le premier métier à tisser mécanique jusqu'à l'introduction de robots industriels programmables, la rupture introduite par Industrie 4.0 repose sur une interconnexion entre les machines via l'intégration de systèmes cyber-physiques.

« Industrie 4.0, ce n'est rien d'autre que l'utilisation de l'internet des objets dans la production, dit autrement un concept marketing pour les systèmes embarqués dans la production. Pour l'industrie mécanique, il s'agit de pouvoir vendre des produits et des services intelligents, quelque chose de plus et de différent que fraiser, percer, souder... »

Directeur adjoint d'un Institut Fraunhofer fortement investi dans l'Industrie 4.0

Selon la définition de la Plateforme Industrie 4.0, « les systèmes cyber-physiques (SCP) regroupent des systèmes embarqués qui utilisent des capteurs pour récupérer des données et qui agissent sur des processus physiques au moyen d'actionneurs. Ils sont connectés les uns aux autres via des réseaux digitaux, utilisent toutes données et services disponibles mondialement et bénéficient d'interfaces hommes-machines multimodales. »

Figure 2 : Au cœur d'Industrie 4.0 : le système cyber-physique



Source : ©KOHLER Consulting & Coaching

Cette focalisation allemande sur les systèmes cyber-physiques s'explique principalement par trois raisons. Tout d'abord, l'Industrie 4.0 est née comme un projet au sein d'une stratégie high-tech du gouvernement fédéral initiée en 2006. Or c'est en 2005 que sont lancés aux Etats-Unis les premiers financements publics via la National Science Foundation pour la recherche sur les systèmes cyber-physiques, événement

qui a été l'un des déclencheurs de l'initiative allemande. Ensuite, la configuration initiale du projet Industrie 4.0 a été principalement pilotée par le ministère de la Formation et de la Recherche qui a mis l'accent sur ce concept central, notamment via la publication d'un rapport clé sur ce sujet. Enfin, cette notion de système cyber-physique fait écho à la culture allemande, fortement ancrée historiquement, d'ingénieurs et de techniciens spécialisés dans la mécatronique.

Un prérequis pour la mise en place de SCP est la compatibilité et l'interopérabilité des systèmes qui pose la question des standards de communication entre machines. Une fois mis en relation, les systèmes communiquent les uns avec les autres et sont en mesure de s'autoréguler sans commande centrale. L'usine est configurable en fonction des besoins avec des modules qui peuvent être ajoutés ou retirés grâce à des fonctions de *plug and work*. Enfin, un modèle virtuel de l'usine sert à tester les différentes configurations de modules, mais également à simuler et piloter l'ensemble du processus de production. L'entreprise allemande Trumpf, fabricant de machines-outils qui participe depuis le début aux travaux de la plateforme Industrie 4.0 illustre ci-dessous les évolutions de l'Industrie 1.0 à l'Industrie 4.0.

Figure 3 : L'Industrie 4.0 selon l'entreprise Trumpf

	Hier Industrie 1.0 et 2.0	Aujourd'hui Industrie 3.0	Demain Industrie 4.0
Supersystème	Communication analogique <ul style="list-style-type: none"> • Marchés nationaux • Gros calculateurs 	Internet et Intranet <ul style="list-style-type: none"> • Marchés à l'export • PC 	Internet des objets <ul style="list-style-type: none"> • Marchés localisés • Mobile & Cloud Computing
Système	Néo-taylorisme <ul style="list-style-type: none"> • Production avec stocks • Tâche d'exécution • Organisation avec contremaître 	Lean Production <ul style="list-style-type: none"> • Production <i>just in time</i> • Orientation process • Team-Organisation 	Smart Factory <ul style="list-style-type: none"> • Production individualisée • Production résiliente • Réalité augmentée pour l'opérateur
Sous-système	Mécanisation <ul style="list-style-type: none"> • Machines conventionnelles • Plans de travail • Planches à dessin • Volants de commande 	Automatisation <ul style="list-style-type: none"> • Machines CNC • ERP/MES • 3D-CAD/CAD-CAM • Pupitre de commande 	Virtualisation <ul style="list-style-type: none"> • Social Machines • Virtual Production • Smart Products • Systèmes mobiles

Source : ©Société Trumpf dans le Rapport final sur Industrie 4.0, octobre 2012, p.12 - traduction KOHLER C&C

L'industrie 4.0 ne correspond pas à un élargissement du *lean manufacturing*. Elle propose une autre manière d'organiser l'espace de production et de travail. Il ne s'agit pas tant d'une rationalisation plus poussée des tâches d'exécution que de l'adaptabilité de la chaîne de production, de l'ajustement en temps réel des process de production en fonction de la variabilité des commandes et de la transmission à partir de capteurs de toutes les données pertinentes.

La transmission d'information devenant la clef de voûte de tout le système, on peut imaginer que là où l'emportait la capacité à segmenter, à hiérarchiser, à réduire la complexité, ce seront dorénavant la capacité de résolution de problèmes en temps réel, l'aptitude à faire converger les savoir-faire de différents métiers et à coupler les dimensions réelles et virtuelles qui primeront.

« Industrie 4.0, n'est pas un produit, mais une mutation technique porteuse de nouvelles technologies dans la communication des données et la mise en réseau... Industrie 4.0 impose d'avoir une approche globale et transversale des différents domaines techniques. »

Le CEO d'une entreprise de fabrication de systèmes d'entraînement
(Rhénanie du Nord-Westphalie)

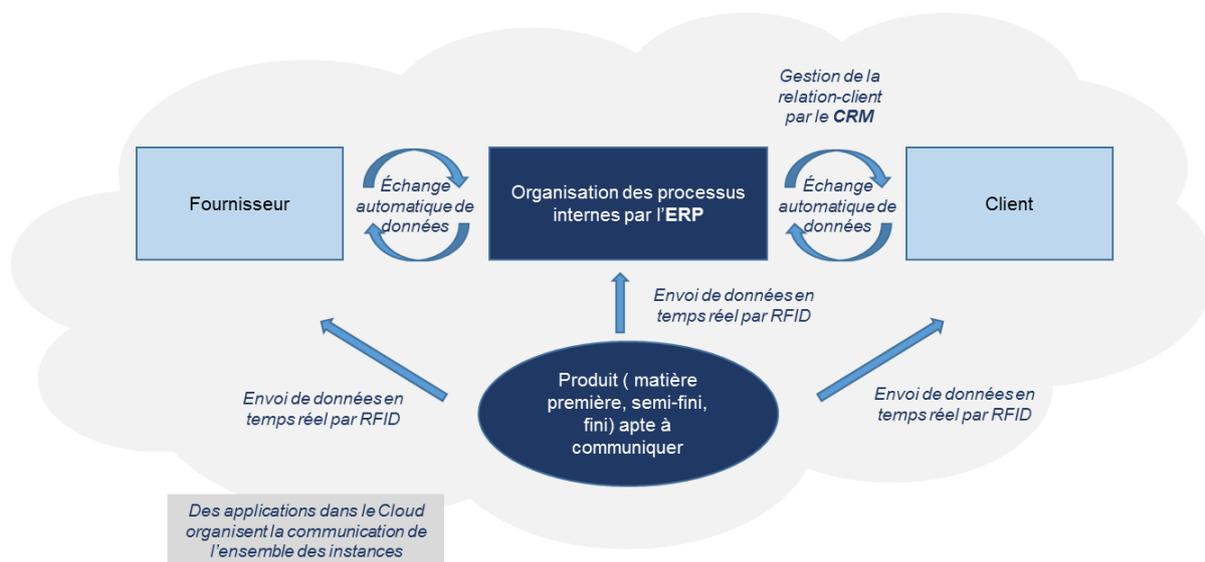
La représentation virtuelle de l'usine, de ses équipements et de leurs composants permet également de développer des applications de réalité augmentée. En cas de panne, l'opérateur de maintenance peut ainsi localiser le composant défectueux et en avoir une représentation en 3D à l'intérieur de l'équipement sans avoir à le démonter. Ou bien, un opérateur qui doit réaliser des opérations d'assemblage manuellement peut voir dans ses lunettes de travail apparaître le processus de montage et le ciblage des bacs où il doit piocher les bonnes pièces.

Dans l'usine 4.0, l'introduction de ces systèmes cyber-physiques vise la production de séries de taille 1 (« *Losgröße 1* ») dans des délais raccourcis et à des coûts identiques à ceux d'une production en grande série.

« La production industrielle sera caractérisée par une forte individualisation des produits sous conditions d'une production en grande série hautement flexible, l'intégration profonde des clients et des partenaires de business au sein des processus de la chaîne de valeur et le couplage entre la production et les services à haute valeur ajoutée. »

Rapport final de la plateforme sur Industrie 4.0, traduction KOHLER C&C

Figure 4 : La numérisation de la création de valeur dans le Cloud



Source : ©Schröder C. (2015) : Auf dem Weg zur vernetzten Wertschöpfung, Ifm Bonn Denkpapier, 18.03.2015, traduction KOHLER C&C

Cette révolution correspond à la diffusion d'une nouvelle architecture de plus en plus éclatée de la production avec des machines et des pièces usinées qui interagissent et

se reconnaissent mutuellement grâce à un pilotage intégré. Produits, processus de production et usine constitueront alors un gigantesque « système productif cyber-physique » bâti sur des communications radio, l'emploi de capteurs et de puces RFID. Selon les paroles d'un expert, « le protocole IP remplace la carte mère » (Prof. Wolfgang Wahlster, DFKI - *Deutsche Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz*).

Sur son site de Homburg en Sarre, la société Bosch-Rexroth a construit une ligne pilote qui est, selon l'avis de plusieurs experts, probablement la plus proche de cette représentation de l'Industrie 4.0. Les gains en termes de productivité, de qualité et de BFR y sont significatifs.

Use case 1 - Industrie 4.0

Une nouvelle conception de l'organisation de la production et du travail

Le site n°2 de l'usine Bosch-Rexroth d'Homburg en Sarre a reçu en décembre 2014 le prix Industrie 4.0 décerné lors du forum annuel Industrie 4.0. Ce site était confronté à des goulots d'étranglement dans la fabrication de valves électrohydrauliques pour les machines agricoles. En l'espace d'une année, une nouvelle ligne d'assemblage a été mise en place. Mobilisant 5 opérateurs, cette ligne pilote remplace 6 lignes de production et permet de fabriquer 6 familles de produits avec plus de 200 variantes et plus de 2000 composants individuels.

Cette ligne illustre 4 dimensions de l'Industrie 4.0 :

- Une identification des produits par puces RFID en lien avec le plan de production, le produit informant la ligne de production flexible des étapes du process ce qui a permis, en lien avec les fournisseurs et les clients, de gagner 10 % de productivité et de réduire le stock de 30 %.
- Des stations de travail modulaires avec une actualisation de la représentation virtuelle de la chaîne en fonction de la configuration de la ligne de production,
- Un ajustement automatique et ergonomique de la station et/ou de la machine à l'opérateur et à son niveau de compétences. Ce dernier porte dans ses vêtements une puce RFID. Des évolutions restent à réaliser, la

reconnaissance automatique du niveau de compétences de l'opérateur ne comprenant pour l'instant que 2 niveaux : novice et expert.

- Un statut de la ligne de production, du produit et des données de stocks remontant en temps réel dans le MES et l'ERP avec un reporting en temps réel.

Cette ligne pilote permet d'importants gains de productivité avec une mise en route quasi instantanée alors que les lignes précédentes demandaient 5 à 30 minutes pour le lancement. Enfin, le niveau de stocks est passé de 2 jours à moins de 24 h.

Le franchissement de ce nouveau palier dans l'organisation de la production vient renforcer les bénéfices classiques de l'automatisation : gains de productivité, amélioration de la qualité, de la maintenance, fiabilisation des machines et économies d'énergie.

Mais l'autre enjeu est également la capacité à répondre plus rapidement aux besoins du client final et de manière individualisée. La réactivité à la demande du client est également au cœur du projet *Speedfactory* d'Adidas pour produire à la demande des chaussures de sport, là où sont localisés les clients.

Use case 2 - Industrie 4.0

L'usine de chaussures au format d'un camion de 38 tonnes

En 2013, plus de 250 millions de paires de chaussures du groupe Adidas ont été produites pour près de 90 % au Vietnam, en Chine et en Indonésie.

Le projet *Speedfactory*, lancé en Allemagne avec le soutien du programme *Autonomik 4.0* du ministère fédéral de l'Économie et de l'Énergie, vise à développer une unité de production de chaussure de la taille d'un camion de 38 tonnes permettant de relocaliser la production de chaussures, voire de vêtements textiles au plus près de la demande, c'est à dire à proximité des agglomérations urbaines.

C'est un projet dont les détails restent très secrets compte tenu de l'enjeu concurrentiel et qui traite des domaines variés comme l'impression 3D, l'interaction homme machine pour l'interface ergonomique de commande et les aspects de *supply chain*. Une méthode de modélisation des processus de production permet de répondre aux enjeux de la production individualisée en temps réel.

Ce type d'usine devrait en 2016 produire les 500 premières paires de chaussure.

D'ici 2017, si le concept s'avère concluant, des *stores factory* devraient voir le jour en Europe et aux USA, permettant aux clients de faire fabriquer directement leurs chaussures personnalisées en magasin.

Une unité de production prototype est en cours de développement en Bavière à Ansbach chez un sous-traitant.

Ce projet regroupe, autour d'une équipe projet d'Adidas, la société Johnson Controls, sous-traitant automobile, la société KSL Keilmann, un expert dans la fabrication de chaînes robotisées et deux instituts de recherche, l'un spécialisé dans les techniques textiles et l'autre dans le transfert technologique.

Ces nouvelles usines dont la conception est guidée par la réactivité à la demande et la déclinaison individuelle des produits induisent une reconfiguration des flux logistiques et une nouvelle localisation des sites de production. Comment se reconfigureront les usines textiles d'Asie du Sud-Est lorsque chaussures et vêtements pourront être produits dans des espaces industriels et urbains en Europe ?

Ces évolutions permettent d'imaginer de nouveaux *business models*, mais aussi de nouvelles localisations pour les fabricants d'équipements industriels.

1.2. Un marché potentiel énorme

Les études sur les perspectives de marché liées à l'internet des objets et à Industrie 4.0 se sont multipliées ces dernières années. Une synthèse réalisée pour le compte du ministère fédéral en charge de l'Economie et de l'Energie (BMWi) évalue le potentiel de croissance du marché Industrie 4.0 en Allemagne à 153,5 Mrd € dans les cinq

prochaines années avec un potentiel d'investissement annuel de près de 91 Mrd € en Europe soit près de 1 350 Mrd € d'ici 2030.¹

Le potentiel de marché de l'Industrie 4.0 offre à l'industrie allemande un formidable champ d'opportunités pour renforcer ses points forts même s'il convient d'établir des distinctions selon les segments de marché. Les prévisions de croissance sont particulièrement élevées dans les domaines suivants : technologie de capteurs, robotique, système de production innovant, logistique, sécurité des données, internet des objets, cloud computing et Big Data.

Figure 5 – Quelques métriques concernant le marché de l'Industrie 4.0

Capteurs	- Marché mondial potentiel : 70 à 120 Mrd \$ (AMA Sensorik, 2014)
Robotique	- Marché mondial de la robotique industrielle en 2013 : 7,5 Mrd € (12 % de croissance annuelle attendue jusqu'en 2017) (IFR 2014). - Marché mondial incluant logiciels, accessoires et intégration de systèmes : 22,7 Mrd € en 2013 (IFR 2014).
Systèmes de production innovants	- 36 Mrd \$ jusqu'en 2025 (McKinsey, 2013) - La communication de machine à machine devrait connaître 300 % de croissance dans les 5 prochaines années (McKinsey 2013).
Logistique	- Une croissance prévue de 3 % par an (Roland Berger, 2014) - Le secteur de la logistique contribue à hauteur de 8 % à la croissance nationale et cette contribution devrait augmenter à 21 % en 2025.
TIC	- La valeur ajoutée se monte à 85 Mrd € (4,7 % de la valeur ajoutée privée en Allemagne (ZEW, 2014) - Les investissements atteignaient 18,2 Mrd € en 2011 (environ 4,5 % des investissements bruts totaux (ZEW 2014)

Source : Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2015), *Industrie 4.0. Volks- und betriebswirtschaftliche Faktoren für den Standort Deutschland*, avril 2015, p. 22.

¹ Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2015), *Industrie 4.0. Volks- und betriebswirtschaftliche Faktoren für den Standort Deutschland*, avril 2015, p.7.

1.3. La peur de perdre le leadership industriel

La bonne nouvelle apportée par ces prévisions et ces opportunités de croissance future n'est pas le seul élément permettant d'expliquer la diffusion du rêve de l'Industrie 4.0. La force d'Industrie 4.0 en Allemagne tient d'abord à la perception d'un sentiment d'urgence. Industrie 4.0 associe de manière volontairement dramatique, le rêve technologique et la peur de menaces susceptibles de faire vaciller le leadership industriel allemand.

Les Allemands anticipent le ralentissement de la croissance et de l'investissement dans les BRIC et parallèlement le positionnement de la Chine ou de la Corée du Sud comme producteurs matures de machines-outils.

Néanmoins la vraie menace, l'épouvantail de chaque manifestation Industrie 4.0 en Allemagne reste Google présenté comme le concurrent n°1. Les industriels allemands craignent, qu'à l'aune d'autres secteurs comme l'édition ou l'hôtellerie, les géants de l'internet n'imposent une relation exclusive avec le client final. Détenant l'accès aux données d'usage et des interfaces guidant le choix des consommateurs, ils seraient alors en position de force pour capter une part importante de la marge, quand ils ne chercheraient pas directement à concurrencer les industriels, à l'image de la voiture autonome.

Industrie 4.0 s'impose clairement comme une vision qui permet de transcender ces peurs et qui donne un caractère offensif à une politique construite, dans un premier temps, sur une base défensive. Un enjeu central consiste à permettre une transformation technologique de l'industrie allemande en mobilisant les acteurs nationaux des technologies de l'information et des télécommunications.

La vision qui sous-tend le projet Industrie 4.0 repose en effet sur 3 convictions :

- l'avenir économique de l'Allemagne passe par l'industrie,
- la priorité est de conserver le positionnement de leader à l'international sur les marchés de biens d'équipement,

- un enjeu vital pour le pays est donc d'anticiper l'impact à venir des technologies de l'information sur les processus de production pour profiter pleinement des opportunités qu'elles offrent.

Une étude² menée en 2011 par l'Institut Fraunhofer pour l'économie du travail et l'organisation (Fraunhofer IAO) a montré que seul un quart des constructeurs allemands de machines-outils a élaboré une stratégie explicite de développement de services basés sur internet et que seul un cinquième d'entre eux ont un *business model* adapté. Le gouvernement fédéral allemand a ainsi lancé en 2011 un projet industriel très ambitieux baptisé **Industrie 4.0** pour signifier que le système productif allemand devait passer à l'offensive concernant la révolution digitale et maintenir son leadership mondial. Cet objectif a été réaffirmé avec force fin 2013 lors de la signature du contrat de coalition de gouvernement entre le parti chrétien-démocrate (CDU), son allié chrétien sociaux (CSU) et le parti social-démocrate (SPD).

Extrait du contrat de coalition de gouvernement entre la CDU, la CSU et le SPD :

« *Nous allons poursuivre la numérisation de l'industrie classique avec le projet d'avenir Industrie 4.0 et l'étendre lors d'une étape prochaine aux services intelligents (Smart services)...*

Pour maintenir notre leadership technologique dans la construction mécanique, nous voulons occuper activement le champ de l'Industrie 4.0. »

Deutschlands Zukunft gestalten. Koalitionsvertrag zwischen CDU, CSU und SPD (décembre 2013), p. 15. <https://www.cdu.de/sites/default/files/media/dokumente/koalitionsvertrag.pdf>

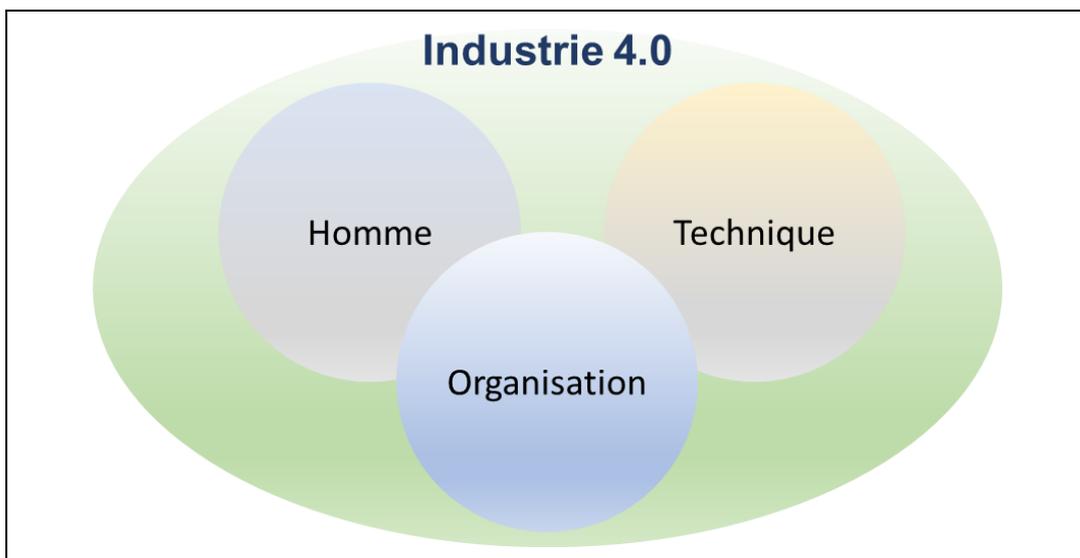
² Spath D. (ed.) (2011) Produktionsarbeit der Zukunft, Fraunhofer IAO, Fraunhofer Verlag, 155 p.

1.4. Quand la construction d'un nouvel imaginaire industriel chasse la peur

L'Industrie 4.0, comme le concept de l'économie sociale de marché (*soziale Marktwirtschaft*) ou celui du *Mittelstand*, fait partie en Allemagne de ces concepts allemands emblématiques, acceptant plusieurs définitions. A l'instar de ces notions, l'Industrie 4.0 représente un mythe qui crée des effets mobilisateurs au sein de la société civile. Cette stratégie dépasse largement les seules frontières de l'usine. Elle a vocation à nommer un projet de société dans un pays où l'attachement à l'industrie est inscrit dans l'ADN national.

Les dimensions technologiques promues par Industrie 4.0 sont conçues en interaction avec le facteur humain et l'organisation du travail. L'Industrie 4.0 est présentée par les Allemands comme un triptyque articulant ces 3 dimensions d'où la tentation de parler de l'avènement d'un nouveau paradigme industriel et sociétal.

Figure 6 : Le triptyque Homme – Technique - Organisation



Source : ©KOHLER Consulting & Coaching

2. Quel est l'impact du numérique sur la chaîne de valeur ?

Pour les entreprises industrielles, l'enjeu du numérique accompagne le développement de trois nouveaux champs de création de valeur : la production d'objets connectés pour le consommateur final, la production d'équipements connectés pour les entreprises industrielles et le développement de marchés liés à l'exploitation des données d'usage, qu'elles proviennent d'objets ou d'équipements connectés. Ce dernier point est stratégique car il ne s'agit pas seulement de mieux connaître les utilisations et les usages de ses clients pour les fidéliser et concentrer ses ressources sur leurs besoins précis. Ces données d'usage matérialisent également la frontière entre la relation client et le savoir-faire de l'entreprise.

L'enjeu est donc triple :

- capter de nouvelles sources de valeur liées aux données d'usage,
- garder la main sur la répartition de la marge au sein de la chaîne de création de valeur,
- sauvegarder les actifs immatériels liés à la propriété intellectuelle et au savoir-faire.

2.1. Des impacts sur toute la chaîne de valeur

La première conséquence anticipée de l'introduction de l'Industrie 4.0 dans les entreprises industrielles est une intégration entre clients et fournisseurs le long des réseaux de la chaîne de création de valeur. Les Allemands ne parlent pas de filière, mais de chaîne de création de valeur (*Wertschöpfungskette*) qui lie les différents acteurs, leurs valeurs ajoutées et savoir-faire pour concourir à la fabrication d'un produit donné.

A court terme, la commande est soumise à un impératif croissant de réduction du délai de livraison et de personnalisation qui tend toute la chaîne de production, depuis le client jusqu'aux fournisseurs de rang 1 et 2. A moyen terme, les systèmes de gestion du cycle de vie du produit exerceront également une forte contrainte sur toute la chaîne

de création de valeur avec une conception en continu du produit pour tenir compte de l'évolution des besoins des clients.

En se donnant une représentation schématique de l'industrie allemande, 5 grands types d'activités industrielles peuvent être distingués qui sont touchées à des degrés divers par cette transformation digitale :

- les activités d'extraction et de transformation des matières premières,
- les activités de fabrication de biens de consommation,
- les activités de fabrication de composants électroniques,
- les activités de fabrication d'équipements,
- les activités d'intégration des équipements.

Les fabricants de ces équipements connectés doivent à la fois intégrer l'Industrie 4.0 dans leurs propres équipements et dans ceux qu'ils vendent. C'est le cas de l'usine Siemens d'Amberg où le système d'automatisation Simatic produit des composants Simatic.

Use case 3 - Industrie 4.0

L'automatisation au service du zéro défaut

L'usine d'Amberg est le démonstrateur de l'offre intégrée « Software pour l'Industrie » de Siemens. Une usine-sœur a été également construite en Chine à Chengdu.

Cette usine, qui emploie 1000 personnes, fabrique plus de 1000 composants de la gamme de systèmes d'automatisation Simatic de Siemens pour plus de 60 000 clients. L'usine est elle-même équipée de matériels intégrant ces composants : « les Simatic produisent des Simatics »

Elle assemble des cartes mères à la vitesse d'un produit à la seconde et avec un degré impressionnant de fiabilité. Le zéro défaut semble devenir réalité avec un taux de qualité de 99,9988 % (12 ppm).

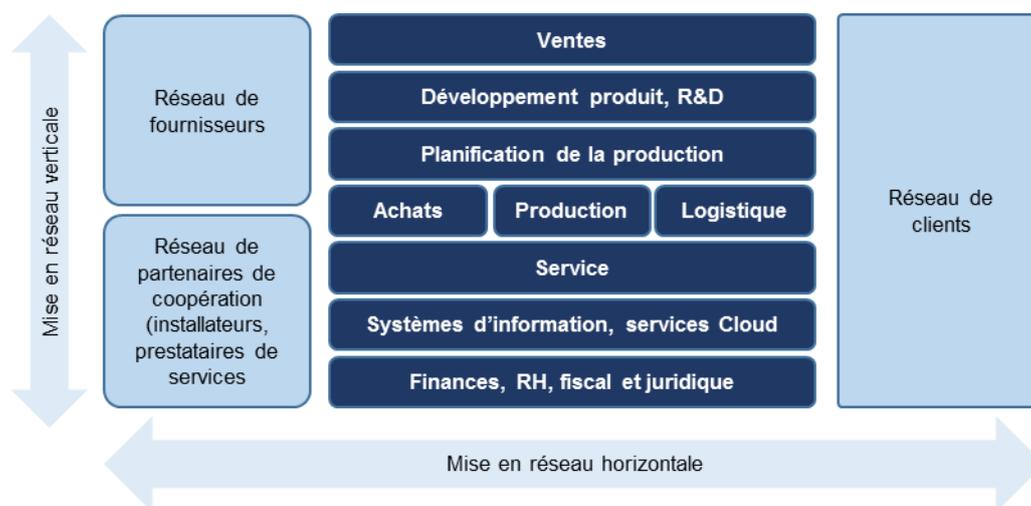
Cette performance est obtenue grâce à un taux d'automatisation de plus de 75 % dans la production et les flux de matériaux et d'information qui a permis de réduire les coûts de près de 25 %.

Le délai de livraison est de 24 heures grâce à une intégration du développement et de la production. Avec l'utilisation de son outil de gestion du cycle de vie du produit (PLM), Siemens affirme que le délai de *time to market*, entre la conception du produit et sa mise sur le marché, peut être réduit de 50 %.

2.2. L'éclatement de la chaîne de valeur

Le deuxième impact de l'Industrie 4.0 est perceptible sur l'organisation même de la chaîne de valeur de l'entreprise. Cette chaîne de valeur articule les fonctions qui concourent à la production, des achats de matières premières jusqu'à la livraison du produit fini, en passant par la conception et tous les processus de fabrication associés et sous-tendus par la *supply chain*.

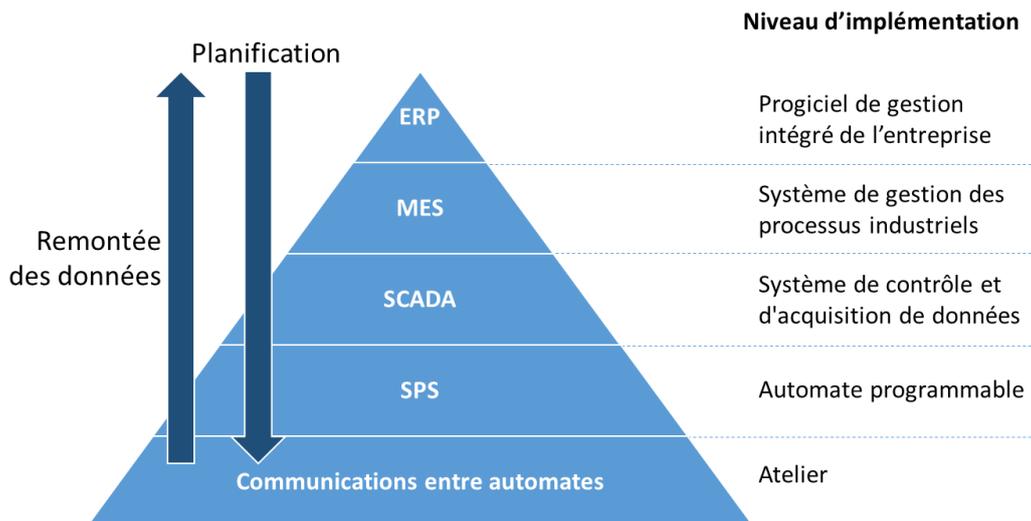
Figure 7 : La représentation classique de la chaîne de valeur



Source : Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2015), Industrie 4.0. Volks- und betriebswirtschaftliche Faktoren für den Standort Deutschland, avril 2015, p. 15.

Structurant cette chaîne de valeur, les flux d'informations sont organisés selon une « pyramide de l'automatisation ».

Figure 8 : La pyramide de l'automatisation



Source : Industrie 4.0 – durchgängig vom Sensor bis zum ERP-System, ein neuer Ansatz, Vortrag Clusterforum 2013

A la tête de cette pyramide de l'automatisation se trouve le progiciel de gestion intégré (ERP) qui est lié avec le progiciel de gestion de production (MES) dans lequel remontent des informations de production depuis l'atelier (systèmes communication entre automates et robots industriels Profinet, Ethercat).

Dans la chaîne de valeur traditionnelle, la communication reste limitée entre ce qui relève du *core business* et des activités périphériques pour la partie amont, composée du réseau des sous-traitants et des partenaires (installation d'équipements ou de services) et pour la partie aval, constituée du réseau des clients.

« Nous avions auparavant une pyramide avec à son sommet le niveau de la cellule, puis en dessous le système de pilotage puis les robots et à sa base les capteurs. Aujourd'hui nous assistons à un renversement de la pyramide où tous les niveaux doivent communiquer entre eux et où le produit est lui-même intelligent. Nous n'avons plus besoin d'ordinateur central et les machines communiquent ensemble via internet. Nous sommes passés d'une architecture de pilotage top-down à une architecture pilotée par le produit. »

Le directeur R&D d'une entreprise de fabrication de robots industriels (Bavière)

La révolution numérique se caractérise par la réorganisation de la « chaîne de création de valeur » en fonction du besoin final du client. Elle approfondit d'abord la mise sous tension de la *supply chain*. Toute la chaîne de production doit être en mesure de fabriquer en mode *pull* des biens individualisés demandés par le client : la commande déclenche directement les approvisionnements tout le long de la *supply chain*. L'entreprise doit également réagir rapidement en mode *push* aux évolutions des usages du client qu'elle capte, non plus seulement à travers les sources traditionnelles que sont les processus de veille ou les remontées de son réseau commercial, mais à un rythme croissant, à travers les données d'usage livrées par les produits et les équipements vendus.

Pour les équipementiers, cela implique la construction de machines qui communiquent les unes avec les autres, indifféremment de leur date de construction et de la marque de leur constructeur. Les équipements doivent également être modulaires pour produire des petites séries. L'usine devient une sorte de mécano composé de pièces de *lego*, des briques qui peuvent être agencées en fonction des évolutions des commandes des clients.

Dans la vision allemande, des cycles de fabrication plus courts et la production de séries de taille 1 exigent une coopération plus efficace et plus rapide entre les

différentes parties prenantes. L'intégration des différents systèmes d'information entre eux charpente la nouvelle architecture de la chaîne de création de valeur.

Use case 4 - Industrie 4.0

Quand une nouvelle génération de robots réduit la complexité³

En coopération avec l'entreprise KUKA Roboter GmbH, Mercedes-Benz a choisi d'introduire des robots légers dotés de capteurs les rendant sensibles à la présence humaine sur la ligne la plus complexe servant à monter le pont arrière de la Classe C. Il s'est agi de trouver de nouvelles solutions d'automatisation pour les opérations manuelles les plus chronophages en distinguant les opérations à haute valeur ajoutée et celles relevant de la logistique ou de mise à disposition du matériel.

Dans la nouvelle configuration modulaire de la ligne de montage, les convoyeurs et les porteurs de pièces ont disparu et des opérations à haute valeur ajoutée sont dorénavant réalisées par 45 robots KUKA mis en réseau et 12 postes de travail manuel. Les temps de production ont été considérablement réduits et la plateforme modulaire est suffisamment flexible pour s'ajuster en temps réel aux variations des commandes. La ligne de production ne répond plus à une conception séquentielle du *process* de fabrication mais est conçue sur un schéma articulant simultanément différents modules de production. La construction simultanée de différents modèles de voiture est rendue possible par un dispositif d'interopérabilité technique – machines et robots sont nomades et compatibles entre eux, quelle que soit la configuration de la ligne de production – et un dispositif d'interopérabilité sémantique – utilisation de l'Automation Machine Langage permettant aux machines d'opérer réciproquement en utilisant des schémas compatibles de métadonnées.

³ D'après Steegmüller Dieter, Zürn Michael (2014), « Wandlungsfähige Produktionssysteme für den Automobilbau der Zukunft » dans Bauernhansl, Thomas; ten Hompel, Michael, Vogel-Heuser, Birgit (dir.) : Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik: Anwendung - Technologien – Migration, Wiesbaden, Springer, p. 103 -119.

Toutes les données concernant le montage sont enregistrées dans une banque de données sur la qualité afin de garantir une totale traçabilité du processus de production. Alors que jusqu'à présent l'automatisation était dédiée à l'exécution de tâches identiques destinées à augmenter la productivité, elle devient le ressort d'une nouvelle flexibilité. Le mode de production devient modulaire et flexible mais c'est également toute l'organisation de l'usine qui va être repensée à partir de ces notions de modularité et de flexibilité.

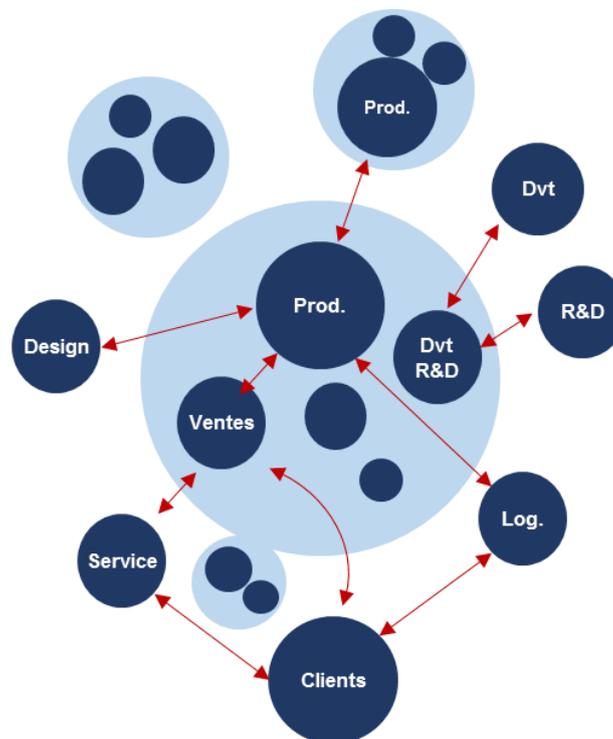
Cela a impliqué un changement d'équipements, la révision de tout le mode opératoire et cela a permis de réduire la complexité du processus de fabrication et de limiter les dysfonctionnements.

En rendant possible l'échange de données entre les fonctions internes et externes des différents sites de l'entreprise, la numérisation conduit à une hybridation des activités industrielles et servicielles. Elle provoque un réagencement global de la chaîne de valeur articulée autour du client.

Certaines fonctions de production peuvent être outsourcées à quelques kilomètres de là (cf. *use case* suivant) avec des conséquences importantes sur l'organisation de la production et du travail. Les frontières entre branches volent en éclat, en même temps qu'on assiste à une convergence entre des marchés autrefois distincts.

Le « rêve Industrie 4.0 » prend forme : à terme, il est possible d'imaginer que la commande du client sera automatiquement relayée à un ensemble d'unités de production et de prestataires logistiques et que cette commande déclenchera la réalisation d'un ensemble de services de fabrication et de logistique qui s'autoréguleront.

Figure 9 : Fragmentation fonctionnelle et spatiale des activités de la chaîne de valeur



Source : d'après ©Kagermann H. (2013) : Impuls – Zukunftsbild Industrie 4.0, BITKOM Kick-Off „Industrie 4.0“ Berlin, 9. Januar 2013. Modifié par KOHLER C&C

Use case 5 - Industrie 4.0

Le logisticien devient fabricant industriel

A Neckarsulm, en Bade-Wurtemberg, une chaîne automatisée assure la production de l'Audi A6. Une fois la carrosserie peinte, les portières sont démontées et envoyées dans l'usine d'un sous-traitant à Offenau, à 10 km de là, où sont réalisées les opérations de montage fortement consommatrices de main d'œuvre : pose des équipements, des garnitures et des rétroviseurs.

Les portières équipées doivent revenir à temps dans l'usine Audi pour être remontées sur la voiture qui a continué entretemps de suivre son processus de finition. Elles doivent impérativement être remontées sur la carrosserie avec laquelle elles ont été peintes, sinon, des différences de teintes peuvent être perçues. C'est

tout un système de coordination entre les deux usines qui a été mis en place pour suivre en temps réel la progression des tâches et la localisation des portières.

Le sous-traitant d'Audi n'est pas une entreprise industrielle, mais un logisticien, la société DHL, filiale de la poste allemande. Deux raisons permettent d'expliquer ce choix.

L'équipement des portières est un vrai défi logistique compte tenu du nombre de pièces à approvisionner, justifiant le recours à l'expertise d'un partenaire logistique. Le logisticien est devenu assembleur, voire un producteur de la taille d'une entreprise du *Mittelstand* qui fabrique également des éléments de pare-chocs ainsi que des sièges pour Recaro qui sont ensuite montées dans des voitures sportives de luxe.

La seconde raison illustre l'impact que peut avoir la recomposition de la chaîne de production sur les relations industrielles. Les employés de DHL qui réalisent ce travail « industriel » sont payés selon les tarifs des conventions collectives des services logistiques : les salaires conventionnels y sont de 20 % inférieurs à ceux de la métallurgie⁴. Cette évolution peut être également interprétée comme un coup porté au système allemand de conventions collectives par branches.

2.3. Une frontière de plus en plus ténue entre industrie et services

La représentation de l'usine digitalisée est celle d'un espace modulaire – « une usine Lego ». Cette modularité destinée à répondre aux exigences de la production de série de taille 1 s'accompagne d'un déplacement des lieux de création de valeur. Nous sommes en train d'assister à une migration du centre de gravité de l'entreprise vers

⁴ Preuß Suzanne : « Fertigungsprozesse wandeln sich : warum ein Paketdienst gerne auch Autositze baut und sich trotzdem treu bleibt », Frankfurter Allgemeine Zeitung, 19 octobre 2007.

des lieux où sont récupérées et exploitées les données d'usage des clients. C'est dans ces lieux que la marge bénéficiaire sera de plus en plus captée. Comme le souligne François Bourdoncle : « *La révolution du Big Data repose sur la capacité [des entreprises opérant sur le marché du numérique] à analyser ces données et à en tirer profit en matière d'innovation, de production, de relation commerciale et in fine de marges bénéficiaire.* »⁵ Le *just in time customized*, la réorganisation de la chaîne de valeur à partir de la satisfaction en temps réel du besoin des clients va progressivement faire de la gestion des flux d'information et de leur exploitation le cœur névralgique de l'entreprise.

Lorsque Porsche fait rouler une voiture bardée de capteurs sur des milliers de kilomètres pour obtenir les données sur la performance du moteur et optimiser ainsi son fonctionnement, on reste dans le domaine du secret industriel et du savoir-faire technique qui fait la réputation de la marque. Si ces données sont captées demain par un système embarqué relié au système de navigation et transférables sur des plateformes de données ouvertes dans le cloud qui bénéficient de l'apport de milliers d'utilisateurs, se pose alors la question de la propriété de ces données. Cet exemple montre à quel point avec le numérique, la création de valeur au sein de l'entreprise ne s'élabore plus dans l'enceinte de l'entreprise mais en système ouvert dans une très forte intimité avec le client. Cette nouvelle donne relationnelle amène à redéfinir les process d'innovation, de production, de sécurisation des données, de propriété industrielle, *in fine* tout ce qui touche à la réputation de la marque.

Après la presse, la distribution de biens culturels, le tourisme, cette industrie BtoC est aujourd'hui en première ligne. Les géants de l'internet n'hésitent pas à se transformer en industriels, comme Google et Apple, et deviennent des concurrents du jour au lendemain à la fois dans la construction de prototypes automobiles et dans la création

⁵ Bourdoncle François (2015), « La révolution Big Data », dans Veltz Pierre, Weil Thierry (dir.), *L'Industrie, notre avenir*, Paris, Eyrolles, p. 64.

de services liés aux données d'usage. Il n'y a pas de congrès Industrie 4.0 sans mention de cette « menace Google », d'un système de captation d'une partie des marges opérationnelles » qui peut émerger « partout où on peut dématérialiser ou re-intermédiaire »⁶. Les grands constructeurs allemands, BMW, Daimler et Volkswagen ont senti le danger et réagi en 2015 en s'alliant pour racheter l'application de cartographie *Here* à Nokia afin de garder la main sur les systèmes de navigation et faire le lien avec la voiture autonome.

Face à l'arrivée de ces nouveaux concurrents et le développement de l'économie de partage où le consommateur privilégie désormais la valeur d'usage, les industriels n'ont d'autre choix que de repenser leurs *business models*. Les constructeurs automobiles de demain tireront-ils l'essentiel de leurs revenus de la vente de véhicules ou de la location avec l'exploitation de services associés ?

Qu'en est-il des fournisseurs d'équipements ? Cette révolution numérique laissera-t-elle, au moins pour un certain temps, les fabricants de biens d'équipements et de services liés (BtoB) à l'abri ?

Les fabricants d'équipements sont en fait impliqués à deux niveaux. Ils doivent d'abord enrichir leur offre de services vers leur client direct, l'utilisateur de leurs machines et de leurs composants. Un fabricant de compresseur pour l'industrie pourra ainsi, grâce à des capteurs et des algorithmes proposer des services de suivi à distance, d'assistance et de maintenance. Cette évolution est déjà engagée dans l'industrie, la nouveauté vient de la mutualisation des données de multiples clients par l'équipementier qui lui offre de nouvelles opportunités. La mobilisation du *big data* permet notamment de proposer des services de maintenance prédictive en identifiant de nouvelles causes de défaillances potentielles.

⁶ Bpifrance - Le Lab (2015), *Le numérique déroutant*, 2015, p. 23-26.

L'exploitation des données ne se limite pas au client direct. L'utilisation des données d'usage du client final peut avoir des conséquences sur toute la chaîne de valeur en amont : insérer de nouveau capteurs, améliorer la modularité des équipements pour plus de réactivité, créer de l'interopérabilité avec d'autres systèmes, développer de nouveaux matériaux...

« Dans quelques années, la vente de mes machines se fera probablement à marge nulle et je réaliserai mon résultat avec la vente de services associés. ».

Le CEO d'une entreprise BtoB du *Mittelstand* (région de Stuttgart)

L'exploitation des données d'usage représente une opportunité de positionnement pour les entreprises du *Mittelstand* sur des marchés de niche dans le domaine des services, du développement produits et de l'analyse des données.

« Dans l'industrie on pourrait mettre en place au sein de la machine un enregistreur dont les données online et offline pourraient être analysées en continu. Cela pourrait s'apparenter à un genre de boîte noire comme dans les avions »

Les dirigeants d'une entreprise d'IT (région de Stuttgart)

Mais comment garder dès lors la maîtrise sur l'accès à ces services ? La machine intelligente pourra certes requérir sur la base d'algorithmes de maintenance prédictive liés aux données d'usage des autres utilisateurs le changement anticipé d'une pièce d'usure. Mais quel sera la marge de manœuvre de l'industriel si un outil de navigation propose à l'utilisateur de la machine plusieurs fournisseurs potentiels capables de

réaliser cette pièce par fabrication additive et de l'acheminer dans des délais records grâce au partenariat avec un logisticien ?

Enfin, le développement de ces services requiert des compétences dont l'entreprise ne dispose pas forcément et qui représentent un investissement significatif. D'où la mise en place de nouveaux réseaux d'interdépendances et de coopération, à l'image de ce que pratiquent déjà les *global players*.

2.4. Coopérations au sommet pour les *global players* de l'Industrie 4.0

Industrie 4.0 a été portée sur les fronts baptismaux par trois grands Groupes allemands : Siemens, Bosch et SAP. Deutsche Telekom et T-Systems sont arrivés un peu plus tard dans la course. Siemens et Bosch se distinguent par leur capacité à construire l'intégralité d'un site de production 4.0 symbolisée par deux usines phares, celle de Siemens à Amberg et celle de Bosch à Homburg. Chez ces *global players*, la stratégie Industrie 4.0 est dominée par le renforcement dans les TIC qui passe par des rachats et des alliances.

L'organisation interne de Siemens a été reconfigurée par rapport à la vision Industrie 4.0 avec la création d'une division « usine numérique » à côté des autres divisions du conglomérat. Dans l'IT, Siemens poursuit sa stratégie d'alliance avec Atos⁷, entreprise à laquelle il avait cédé en 2011 son informatique (Siemens IT Solutions and Services GmbH, holding regroupant toutes les activités informatiques de Siemens). Mi-juin 2015, Siemens a retenu Atos pour se doter de la plateforme SAP HANA® basée sur des serveurs ultra-puissants Bullion de Bull.

Siemens et Atos ont étendu en juillet 2015 leur alliance stratégique à l'analyse de données, à la cybersécurité et aux équipements connectés en mobilisant un fonds

⁷ Siemens est à la fois le premier client et avec 12,7 % du capital le premier actionnaire d'Atos.

d'investissement de 150 M€ qui a notamment permis de financer la mise en place d'une plateforme d'analyse de données industrielles destinée à leurs clients respectifs. L'ambition de Siemens ne se limite pas à la gestion de sa propre informatique. Il s'agit de développer une plateforme cloud ouverte permettant d'analyser des sets de données provenant de l'industrie. L'objectif est de permettre « aux clients industriels de créer de la valeur à partir de l'internet des objets et de booster leur production tout comme leur offre de produits et de services.⁸ »

Le groupe poursuit une politique de rachats de start-ups du numérique et d'intégration à une offre globale (visualisation, automatisme, commande numérique, supervision, etc.) susceptible de fédérer l'ensemble des logiciels industriels de l'entreprise.

« *Siemens a aujourd'hui autant d'ingénieurs IT que Microsoft⁹!* »

Dr. Christian Kellermann-Langhagen (ZVEI)

Du côté de Bosch, sa filiale informatique Bosch Software Innovations multiplie les acquisitions dans le domaine de l'IT. L'entreprise a lancé une coopération sur l'internet des objets avec l'Université de Saint Gall où elle finance un laboratoire dont l'un des axes de recherche concerne les plateformes pour l'internet des objets.

Avec sa filiale Bosch Rexroth, le groupe se positionne comme leader dans l'offre et l'utilisation de solutions Industrie 4.0. Bosch Rexroth participe à l'aventure du

⁸ SAP Unveils SAP HANA Cloud Platform for the Internet of Things, <http://www.news-sap.com/sapphire-now-sap-hana-cloud-platform-for-the-iot/>

⁹ Interview avec Dr. Christian Kellermann-Langhagen, Referent Forschung & Entwicklung, Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie (ZVEI), Mitglied der Geschäftsstelle, Plattform Industrie 4.0, 26 mars 2015.

démonstrateur de la Smart Factory de Kaiserslautern. Et l'usine d'Homburg en Sarre est présentée comme un modèle par le Groupe.

Pour SAP, l'enjeu est de réussir l'intégration verticale entre les ERP, les MES et les systèmes de pilotage de la production jusqu'aux capteurs installés sur les machines. SAP qui est leader sur le marché des ERP auprès des entreprises industrielles en Allemagne cherche à intégrer depuis 2010 ses solutions existantes au sein d'un nouveau produit à la technologie « in memory¹⁰ » appelé HANA (High-Performance Analytic Appliance). Ce système, basé sur une plateforme cloud répond à une logique SaaS (*Software as a service*) et doit remplacer à terme la suite SAP R3. Début mai 2015, les potentialités de la plateforme ont été étendues à l'internet des objets, permettant de relier les équipements au système de suivi avec un pilotage en temps réel et une communication entre les machines : « construisant à partir de ses données et services applicatifs existants, qui comprennent analyse prédictive, télématique, géolocalisation et plus encore, le nouveau service IoT (*Internet of Things*) de SAP propose un équipement de cloud permettant... gestion des équipements, échange d'information IoT et des applications dédiées comme la modélisation des données »¹¹.

Dernier acteur, Deutsche Telekom et sa filiale T-Systems, société de services informatiques et de télécommunications, jouent la carte de la coopération avec SAP. Partant du constat d'un retard allemand dans le domaine des standards, il s'agit de développer « facilement, rapidement et de manière pragmatique des standards *de facto*¹². » Telekom promeut également une plateforme cloud, une « *Connected Industry Platform* » destinée aux clients industriels, notamment aux grands Groupes. Pour le *Mittelstand*, Deutsche Telekom propose également un « package industrie

¹⁰ La technologie « in-memory » permet des calculs plus rapides grâce au stockage des données en mémoire sur des disques SSD ou de la RAM.

¹¹ SAP Unveils SAP HANA Cloud Platform for the Internet of Things, <http://www.news-sap.com/sapphire-now-sap-hana-cloud-platform-for-the-iot>.

¹² « Telekom will Wirtschaftswunder 4.0 », <https://www.telekom.com/medien/konzern/271960>.

4.0 » permettant de connecter les équipements et qui contient logiciel, cartes SIM et accès à la plateforme. Pour assurer la sécurité de sa plateforme, Deutsche Telekom a enfin noué des partenariats avec quatre sociétés informatiques spécialisées : Avira (logiciels antivirus), Steganos (connection VPN cryptée), Strato (backup de sécurité sur des serveurs allemands) et Secomba (stockage crypté de données sur des supports).

Aujourd'hui les *global players* comme Siemens, Bosch, SAP, Deutsche Telekom se sont donc positionnés, ont conclu des alliances et déclinent des offres Industrie 4.0 tout en développant des démonstrateurs.

Au niveau du *Mittelstand* premium, l'équivalent de nos ETI et des petites GE, la plupart des équipementiers offreurs de solutions, qu'ils soient dans l'industrie mécanique, électrotechnique ou dans l'IT cherchent à se positionner comme pionniers sur le marché de l'Industrie 4.0 (cf. figure 10). L'enjeu est clairement d'initier le plus tôt possible des coopérations au sein des réseaux qui se constituent, d'influencer la détermination des conditions cadres technologiques, juridiques... et de capter les ressources rares, notamment en capital humain.

Les acheteurs pionniers, par exemple des fournisseurs de l'industrie automobile comme l'équipementier ZF Friedrichshafen ou de grandes entreprises industrielles comme ThyssenKrupp, définissent une stratégie digitale et planifient leur transformation numérique à 10 ans. L'accès aux ressources rares est crucial.

Pour les entreprises du *Mittelstand*, les offreurs de solutions que nous avons rencontrés se posent bien évidemment la question de l'évolution de leur catalogue de produits. C'est surtout au niveau des acheteurs de solutions que la question de la transformation digitale se pose avec de multiples freins liés à une culture fortement tournée vers l'innovation incrémentale.

Figure 10 : Industrie 4.0 – La matrice KCC des typologies d’acteurs

Suiveurs	<p>« Industrie 4.0 ? Rien de nouveau sous le soleil »</p> <ul style="list-style-type: none"> • Risque de perte d’avantage de leur positionnement concurrentiel • Sceptiques par rapport à la valeur créée par Industrie 4.0 • Difficulté à entrer dans les réseaux Industrie 4.0 	<p>« Industrie 4.0 ? Attendons que les solutions parviennent à maturité, pour l’instant nous en sommes au stade de l’expérimentation. »</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ne savent pas par où commencer • Absence de visibilité sur les bénéfices à tirer • Peur de dilapider des ressources
Pionniers	<p>« Aujourd’hui nous assistons à un renversement de la pyramide où tous les niveaux doivent communiquer entre eux et où le produit est lui-même intelligent. »</p> <ul style="list-style-type: none"> • Construction d’un avantage concurrentiel durable • Réseau de coopération I4.0 • Captation des ressources rares (profils hybrides) • Participation à la définition du cadre : choix technologiques, normes, architecture de référence, formation professionnelle, environnement juridique 	<p>« Mes machines doivent communiquer entre elles, même si elles sont d’âges et de constructeurs différents ! »</p> <ul style="list-style-type: none"> • Compréhension du nouvel environnement concurrentiel et recherche d’un nouveau positionnement • Conception et mis en œuvre d’un nouveau <i>business model</i> • Déploiement d’une vision de la transformation digitale de l’entreprise • Définition d’une <i>roadmap</i> Industrie 4.0 à 5 ans
	Offreurs de solutions	Acheteurs de solutions

Conception et réalisation ©KOHLER C&C

3. Comment les entreprises du *Mittelstand* réagissent face à la numérisation ?

Face à l'enjeu de mobilisation du *Mittelstand*, l'Etat fédéral allemand a lancé une politique destinée à la fois à soutenir le développement d'une offre technologique et à accompagner le processus de transformation numérique des entreprises du *Mittelstand*.

Au-delà du financement des projets de recherche sur l'offre technologique, ce deuxième objectif de conversion du *Mittelstand* à l'Industrie 4.0 apparaît comme un défi majeur. Pour cela, deux leviers sont essentiels : la preuve par l'exemple à l'aide de démonstrateurs et les effets de réseau et d'entraînement entre entreprises du *Mittelstand*.

3.1. Un désintérêt apparent du *Mittelstand* face à la numérisation

De nombreuses études ont souligné un manque d'intérêt relatif du *Mittelstand* pour la numérisation. Une étude de la DZ Bank¹³ publiée en 2014 montrait que 35 % des entreprises du *Mittelstand* pensaient que la numérisation était peu pertinente par rapport à leur chaîne de valeur et 14 % supplémentaires qu'elle jouait un rôle faible.

« Il est nécessaire d'expliquer très tôt l'Industrie 4.0 aux petites entreprises du *Mittelstand* et de leur proposer des produits pour soutenir le développement de standards. »

Le Directeur du département spécialisé dans l'Industrie 4.0
d'une grande entreprise (région de Stuttgart)

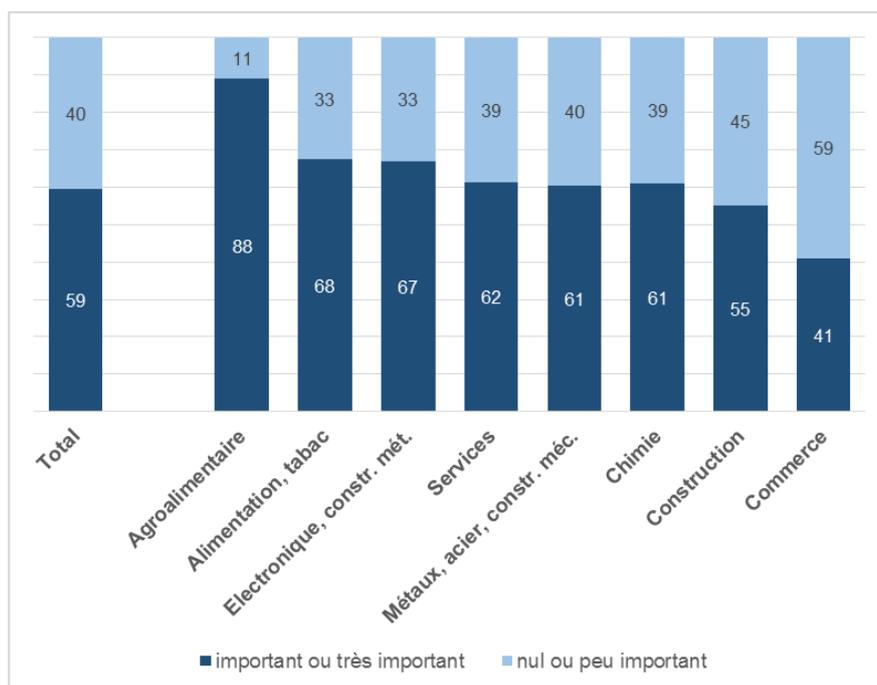
¹³ Etude menée sur un échantillon de 1000 entreprises ayant un chiffre d'affaires compris entre 500 k€ et 125 M€.

DZ Bank, GfK Enigma (2014), Umfrage in mittelständischen Unternehmen Digitalisierung – Bedeutung für den Mittelstand, juin/août 2014, 40 p.

Près de la moitié des entreprises du *Mittelstand*, soit 49 % ne considèrent pas la prise en compte des enjeux liés à la numérisation comme une priorité. A contrario, elles sont tout de même 29 % à penser qu'elle joue un rôle important, 22 % estimant même que ce rôle est très important, soit 51 % au total. Quand elles se projettent dans l'avenir ce pourcentage des entreprises concernées par la numérisation monte à 59 %.

La vision par branche est instructive. Cette analyse souligne en effet que le pourcentage d'entreprises estimant que la numérisation représente l'enjeu le plus important est de 88 % dans l'agroalimentaire. A contrario, ce pourcentage n'est que de 61 % dans l'industrie mécanique, des métaux et de l'acier.

Figure 11 : Evaluation par les chefs d'entreprises du *Mittelstand* du rôle futur de la numérisation selon les branches



D'après DZ Bank, GfK Enigma (2014), Umfrage in mittelständischen Unternehmen Digitalisierung – Bedeutung für den Mittelstand, juin/août 2014

Si ces études soulignent à ce stade une posture frileuse du *Mittelstand* pour la numérisation, comment expliquer cette situation ?

3.2. Le rôle des barrières culturelles et psychologiques

Une première explication est d'ordre psychologique. L'industrie 4.0 oblige le chef d'entreprise à penser son entreprise comme une brique d'un système plus vaste et virtuel. Pour beaucoup de chefs d'entreprise du *Mittelstand*, Industrie 4.0 représente un saut dans l'inconnu qui entre en résonance avec certaines peurs de par le caractère encore très immatériel d'Industrie 4.0 accompagné de menaces bien réelles.

S'approprier Industrie 4.0 demande de se confronter avec ses propres peurs, elle oblige à ouvrir les barrières, à être dans l'interdisciplinarité et l'open innovation. »

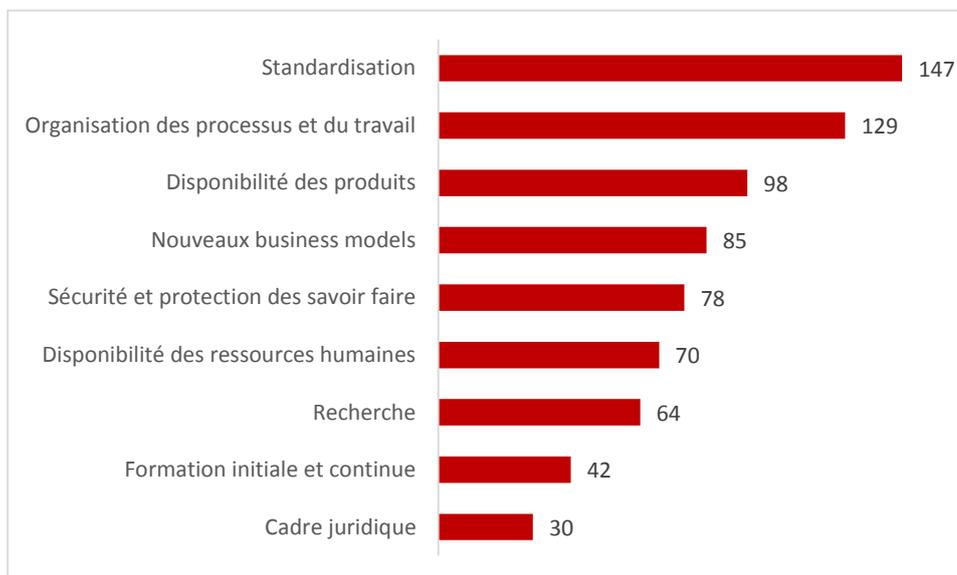
Le CEO d'une PME spécialisée dans l'automatisation
et la construction d'environnements pédagogiques (région de Stuttgart)

La figure 12 fait apparaître les nombreuses sources d'incertitude pour les chefs d'entreprise qui sont autant de freins pour l'introduction de l'Industrie 4.0. Certains sujets sont des interrogations très pragmatiques : est-il raisonnable de consentir des investissements importants alors que la question des standards qui vont s'imposer reste ouverte ? Les équipements sont-ils disponibles ? Les questions de propriété industrielle et de cybersécurité sont-elles suffisamment traitées pour rassurer un entrepreneur ?

L'Industrie 4.0 pose également des questions en lien avec la future organisation du travail et les nouveaux *business models*. Avec quelle ampleur et à quelle vitesse cette nouvelle manière de produire et de vendre va-t-elle obliger à repenser la manière de travailler ? Quel impact le numérique va-t-il avoir sur les métiers ?

Enfin, le sujet de la disponibilité des ressources et de leur formation est évidemment au cœur du débat.

Figure 12 : Les freins perçus par les chefs d'entreprise dans le déploiement d'Industrie 4.0



Source : Forschungsunion, Acatech (2013) : Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0, p. 29.

Pour Christian Kellermann-Langhagen du ZVEI, « les *Mittelständler* ne pensent pas de manière abstraite à leur potentiel de développement de leur chaîne de création de valeur. Ce qui rend un *Mittelständler* compétitif, c'est son savoir-faire, pas le prix de ses produits. Il est donc capital de protéger ce fameux savoir-faire technique qui permet un positionnement de niche sur des segments de marché haut de gamme. »¹⁴

Avec Industrie 4.0, on peut se demander si une des composantes clés de l'ADN du *Mittelstand* ne va pas être remise en cause ? Industrie 4.0 ne représente-t-elle pas une menace pour ces entreprises familiales qui ont parfois plus de 100 ans et qui cultivent

¹⁴ Interview avec Dr. Christian Kellermann-Langhagen, Referent Forschung & Entwicklung, Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie (ZVEI), Mitglied der Geschäftsstelle, Plattform Industrie 4.0, 26 mars 2015.

la tradition de l'innovation incrémentale ? Dans quelle mesure, le développement de nouveaux *business models* concerne-t-il les champions cachés (*Hidden Champions*) ?

« Dans la fabrication d'équipements spéciaux, personne ne parle d'Industrie 4.0, mais simplement de la résolution des problèmes des clients. Le cœur du sujet, c'est que le souhait du client aille directement dans la machine. »

Le CEO d'une PME spécialisée dans l'automatisation
et la construction d'environnements pédagogiques (région de Stuttgart)

L'exemple de l'entreprise de fabrication d'objectifs et d'appareils photographiques haut de gamme Leica montre à quel point une entreprise leader de niche et propriétaire d'une marque forte peut se retrouver en danger de mort face à l'irruption de la révolution numérique.

La question est de savoir si ces spécialistes de la perfection du banal¹⁵ vont prendre la vague de la numérisation de l'industrie qui impose un changement radical de culture en lien avec les changements d'usages ? Comme le souligne Christian Kellermann-Langhagen cette vague de numérisation est tirée par des consommateurs qui cherchent de plus en plus à acheter une valeur d'usage et non plus forcément à acquérir un produit ou une machine.

Au final, c'est la capacité de l'équipe dirigeante à se poser la question de la pertinence d'une stratégie digitale pour l'entreprise qui est déterminante. Pour cela, le chef d'entreprise doit se faire une représentation concrète des bénéfices qu'il pourra tirer

¹⁵ Kohler Dorothee, Weisz Jean-Daniel (2012) : Pour un nouveau regard sur le *Mittelstand*, Paris, La documentation française, p. 55.

du numérique et des changements à opérer dans la stratégie et dans l'organisation. C'est une démarche difficile qu'il ne peut accomplir sans accompagnement.

« Dans notre région où les habitants sont certes un peu renfermés sur eux-mêmes, mais où il y a un fort sentiment d'appartenance au collectif, l'entreprise a osé bousculer ses croyances en adoptant une stratégie d'innovation fondée sur la combinaison entre une innovation process et une innovation produit. »

Le CEO d'une entreprise de fabrication de systèmes d'entraînement
(Rhénanie du Nord-Westphalie)

Il faut en effet être prêt à oser une remise en cause de son *business model* tout en identifiant les nouvelles menaces et opportunités. Face à la transformation numérique, il ne s'agit plus d'être suiveur. Ceux qui se positionnent en premier sont susceptibles de construire de redoutables barrières à l'entrée. Dans ce contexte, le dirigeant du *Mittelstand* doit construire sa vision, la décliner en axes stratégiques et la traduire dans une stratégie de conduite du changement à l'échelle de l'entreprise.

« Industrie 4.0, ça n'est pas quelque chose qu'on peut acheter, chacun doit se faire sa religion sur le sujet. »

Une responsable en charge de l'Industrie 4.0 au sein d'une fédération professionnelle de l'industrie
(région de Francfort)

Les postures des chefs d'entreprise que nous avons rencontrés sont très diverses en fonction de leurs domaines d'activités et l'analyse SWOT réalisée pour le ministère de

l'Economie et de l'Energie souligne bien les freins à surmonter pour déployer Industrie 4.0 dans les entreprises.

Figure 13 : SWOT - Analyse du déploiement Industrie 4.0 dans les entreprises

Forces	Faiblesses
<ul style="list-style-type: none"> Le management ne se focalise plus autant sur la réduction des coûts mais sur de nouveaux <i>business models</i>. Les technologies des TIC sont aujourd'hui largement diffusées dans le pilotage de process. Les collaborateurs font déjà preuve de flexibilité. Industrie 4.0 nécessite le développement de nouvelles compétences et le système dual de formation est un atout. La majorité des entreprises s'attendent grâce à Industrie 4.0 à une augmentation du CA et une augmentation de la productivité ainsi qu'une production plus flexible. 	<ul style="list-style-type: none"> Les interactions (digitales) avec les clients sont encore trop peu nombreuses. Les coûts de la documentation des directives et des normes sont très nettement supérieurs aux bénéfices. Peu d'entreprises utilisent des SCP dans la production. Les processus de numérisation sont insuffisamment coordonnés dans la phase de mise en œuvre. Il n'y a pas de proposition d'indicateurs pour mesurer le niveau de déploiement des processus digitaux. La majorité des entreprises produisent encore de manière manuelle ou éventuellement de manière hybride. Tout juste 4 % des entreprises ont réalisé des efforts concrets de déploiement.
Chances	Risques
<ul style="list-style-type: none"> Un potentiel de croissance est associé à la numérisation. L'Industrie 4.0 peut être introduite en complément du travail humain. Aujourd'hui un grand nombre de technologies de l'information sont introduites dans la production mais la connexion des systèmes entre eux fait défaut. Le management reconnaît qu'il sera nécessaire de réagir très rapidement demain aux désirs des clients. Les tablettes vont réduire l'ampleur des notices. Les dirigeants sont convaincus du potentiel qui peut émerger de la thématique Industrie 4.0. Prise de conscience que les technologies IT généreront les transformations les plus importantes dans la production industrielle. 	<ul style="list-style-type: none"> Les ressources financières manquent aux entreprises pour mettre en œuvre Industrie 4.0. Les acteurs semblent sous-estimer les contraintes liées à la mise en œuvre d'Industrie 4.0 (notamment en ce qui concerne les besoins d'investissements). Le risque existe de louper le coche Industrie 4.0. Côté managérial, on note l'absence de vision digitale. Les dirigeants ont du mal à percevoir le potentiel d'Industrie 4.0. Le pouvoir futur des consommateurs est sous-estimé. La majorité des entreprises se trouve aujourd'hui dépassée par la complexité du thème Industrie 4.0.

Source : Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2015), Industrie 4.0. Volks- und betriebswirtschaftliche Faktoren für den Standort Deutschland, avril 2015, p. 38.

Si seulement 4 % des entreprises se sont lancées dans des déploiements concrets, le besoin d'accompagnement se fait très nettement sentir, tant pour la prise de

conscience des évolutions stratégiques induites par la numérisation que pour celle de l'ampleur des investissements à lancer.

Un frein à la diffusion de l'Industrie 4.0 sera le financement. Par comparaison avec la France, un acteur manque en effet dans le paysage des multiplicateurs de l'Industrie 4.0 : ce sont les banques. Les banques privées n'ont pas encore investi le sujet. Quant aux banques publiques (KfW et banques régionales d'investissement), elles restent pour l'instant en retrait.

De nombreux dispositifs existent pour le financement de la recherche en Industrie 4.0 comme les programmes de recherches « Autonomik 4.0 »¹⁶ ou le *Zentrales Innovationsprogramm*¹⁷ (ZIM) qui encouragent les coopérations en R&D. Ces programmes financent seulement les étapes pré-concurrentielles. Commercialiser un produit à partir d'un prototype demeure une phase critique en matière d'investissement car l'entrepreneur est face à un pic de risques et à des banques frileuses. De plus, une enquête réalisée pour le ministère fédéral de la Formation et de la Recherche montre que ce n'est qu'au bout de 6 ans que le retour sur investissement est réalisé et que l'entreprise peut espérer des bénéfices positifs.¹⁸

La banque publique d'investissement allemande, la KfW, ne dispose pas à l'heure actuelle d'un programme dédié à l'Industrie 4.0. La banque mène des réflexions internes sur l'adéquation des instruments de garantie de prêt et de capital risque aux besoins des entreprises qui décident d'investir dans Industrie 4.0. Les banques régionales estiment qu'il est de leur responsabilité de « rendre les nouvelles technologies digitales accessibles pour le *Mittelstand* et d'agir comme moteur pour le

¹⁶ Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, „Autonomik 4.0“, <http://www.autonomik40.de/Was%20ist%20Autonomik%20fuer%20Industrie%2040.php>.

¹⁷ Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, „Zentrales Innovationsprogramm“, <http://www.zim-bmwi.de>.

¹⁸ Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (Mars 2015) : *Industrie 4.0, Volks- und betriebswirtschaftliche Faktoren für den Standort Deutschland.*, p.8.

développement économique», comme l'explique Dr. Peter Güllmann, directeur des participations, de la NRW.Bank¹⁹. En Allemagne, la disponibilité des fonds en capital risque est suffisamment abondante. D'après Christian Kellermann-Langhagen, c'est avant tout la disponibilité en capital de développement lorsque l'entreprise traverse cette fameuse vallée de la mort de mise sur le marché de ces innovations qui pose problème.

Dans ce contexte, le cluster d'excellence it's OWL propose une démarche exemplaire : un accord a été passé entre les banques de la région Ostwestfalen Lippe et les entreprises du cluster afin d'octroyer à chaque créateur d'entreprise un prêt à la hauteur de 20 000 € si it's OWL a estimé que celle-ci était viable. Cet accord représente un accompagnement très concret des banques, en lien direct avec la transformation numérique.

3.3. Cybersécurité : une peur justifiée

Tenant une part non négligeable dans les peurs liées à la numérisation, la défiance dans la sécurité des données semble être un des principaux freins à la diffusion de l'Industrie 4.0 dans le *Mittelstand*²⁰. Le rapport séminal sur les recommandations pour la mise en place de l'Industrie 4.0 consacrait un chapitre à ce thème²¹.

A de nombreuses reprises, nos interlocuteurs ont évoqué le virus Stuxnet²² ou l'espionnage par la NSA, avec la crainte très présente que le réseau énergétique ou

¹⁹ VC Magazin „Kolumne von Dr. Peter Güllmann, NRW.Bank“, 3 novembre 2014, <http://www.vc-magazin.de/finanzierung/venture-capital/item/3138-vc-kolumne-von-dr-peter-g%C3%BCllmann-nrwbank>.

²⁰ Deloitte (2013), *Digitalisierung im Mittelstand*, p. 12, DZ Bank, GfK Enigma (2014), *Umfrage in mittelständischen Unternehmen Digitalisierung – Bedeutung für den Mittelstand* p.20.

²¹ Acatech, Forschungsunion (2013), *Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0: Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0*, avril 2013, p 50 et suiv.

²² Découvert en 2010, ce virus avait infecté les centrifugeuses nucléaires iraniennes. En ciblant le système interne de contrôle des ordinateurs Siemens (PLC), le virus a pu manipuler la vitesse des moteurs des centrifugeuses et ainsi saboter le fonctionnement des centrifugeuses. Cf. Jacques

bien les entreprises industrielles puissent être victimes d'une cyberattaque ou d'une piraterie commerciale. Le sujet a déjà inspiré des romanciers, comme Marc Elsberg dont le roman « Blackout » a reçu un écho médiatique important et que certains *Mittelständler* ont sur leur bureau. Il y est question de sabotages terroristes des réseaux électriques, d'abord en Europe, puis aux Etats-Unis qui paralysent l'ensemble du système du monde civilisé.

Ces projections et les attaques bien réelles qui ont déjà eu lieu peuvent expliquer la réticence de certains *Mittelständler* envers Industrie 4.0 et notamment pourquoi seuls 5 % des *Mittelständler* utilisent le *cloud computing* en Allemagne²³. Les menaces les plus significatives pour les entreprises de l'industrie mécanique sont les suivantes²⁴ :

1. infection des équipements avec un logiciel malveillant via les réseaux de bureaux,
2. insertion de logiciel malveillant par clé USB ou par du matériel externe,
3. accès illicite par un réseau de télémaintenance,
4. sabotage délibéré ou comportement erroné,
5. incitation à révéler des données personnelles notamment mots de passe par l'hameçonnage (emails frauduleux, *phishing*) et par le « social engineering » (des criminels prennent une fausse identité, par exemple dans un email où ils peuvent se présenter comme le fisc ou un interlocuteur des ressources humaines).

Benillouche « Comment le virus Stuxnet s'en est pris au programme nucléaire iranien », 21.11.2010, <http://www.slate.fr/story/30471/stuxnet-virus-programme-nucleaire-iranien>.

²³ Schröder Christian (2015), Auf dem Weg zur vernetzten Wertschöpfung: Existiert eine Digitalisierungslücke im deutschen Mittelstand?, Institut für Mittelstandsforschung, p. 12.

²⁴ Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (2014), *Die Lage der IT-Sicherheit in Deutschland 2014*, p.15, 19.

Si les cyberattaques dans les entreprises ne sont pas soumises à déclaration par la loi en Allemagne, les exemples d'incidents relevés en 2014 communiqués par l'agence de sécurité numérique²⁵ donnent un aperçu des menaces :

- a. une attaque chez des producteurs de logiciels industriels victimes de l'insertion d'un logiciel malveillant Havex qui a piraté des données d'utilisateurs.
Conséquences : une trentaine d'entreprises allemandes concernées
- b. le sabotage d'une aciérie où les attaquants ont piraté le réseau par hameçonnage et mobilisé des techniques de *social engineering* ce qui leur a permis d'avoir accès au réseau de production
Conséquence : impossibilité d'éteindre un haut-fourneau et dégâts importants dans l'usine
- c. le chantage exercé sur l'entreprise britannique Code Spaces par des cybercriminels qui ont piraté un secteur de sauvegarde de données de l'entreprise dans le cloud et ont menacé de supprimer des données
Conséquence : l'entreprise refuse les demandes criminelles et fait faillite
- d. des anomalies dans les réseaux d'énergies autrichiennes, source inconnue
Résultat : préservation de la stabilité de réseau moyennant un effort démesuré, mais l'effondrement du fichier-journal pendant l'incident empêche l'analyse de la source du problème.

Pour l'académie allemande des technologies (Acatech), il n'y a pas de déficience des solutions de sécurité, seulement celles qui existent ne sont pas utilisées systématiquement.

²⁵ Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (2014), *Die Lage der IT-Sicherheit in Deutschland 2014*, p.31-34.

« Bien que les offreurs allemands de solutions de sécurité numérique soient correctement positionnés sur le marché mondial, l'industrie allemande en tant qu'acheteur s'intéresse encore peu à ces solutions. »

Le CEO d'une société spécialisée dans la cybersécurité (région de Stuttgart)

Dans le rapport de la Plateforme Industrie 4.0 de 2015, *la security by design* est présentée comme constitutive d'Industrie 4.0²⁶ : la conception des produits doit intégrer en amont la dimension de cybersécurité. Le chapitre propose des mesures exemplaires pour les entreprises. En même temps il souligne que la cybersécurité ne peut jamais être garantie de manière permanente et nécessite une constante actualisation des protections. Parmi les mesures recommandées figurent la gestion d'identité pour éviter les accès non-autorisés, le codage et le cryptage des données importantes tout comme le recours à un *broker d'identité de confiance* pour sécuriser les accès à distance.

L'académie allemande des technologies (Acatech) recommande aussi d'instaurer l'équivalent du TÜV – organisme de certification automobile – pour assurer une « sécurité relative » des produits, la sécurité totale n'étant possible que dans les systèmes fermés²⁷. Toutes ces mesures resteront cependant inefficaces si elles ne sont pas accompagnées par une formation des employés.

²⁶ Plattform Industrie 4.0 (2015), *Umsetzungsstrategie Industrie 4.0 : Ergebnisbericht der Plattform Industrie 4.0*, Bitkom/VDMA/ZVEI, p. 71 ff.

²⁷ Acatech (2015), *Smart Service Welt. Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Internet-basierte Dienste für die Wirtschaft*, mars 2015, p. 21.

3.4. Des démonstrateurs pour évangéliser

Pour vaincre les réticences des dirigeants du *Mittelstand* face à la transformation digitale, une première piste est un travail de persuasion. Il passe par des forums, des conférences où les chambres de commerce et des organismes de recherche comme les Instituts Fraunhofer sont fortement impliqués.

Mais un levier encore plus puissant consiste à réaliser des démonstrateurs intégrant les fonctionnalités de l'Industrie 4.0. Ces démonstrateurs réunissent plusieurs entreprises et des institutions de recherche. Ils permettent de démontrer aux dirigeants du *Mittelstand* que l'Industrie 4.0 est à portée de main.

La particularité de ces démonstrateurs vient de ce que les composants qu'ils utilisent sont principalement des composants standards, disponibles sur le marché.

La vraie valeur ajoutée est la mise en relation et l'interopérabilité. Ainsi la Smart Factory^{KL} de Kaiserslautern se compose de plusieurs modules *plug & work* provenant de différents constructeurs pour démontrer leur compatibilité dans la fabrication d'un produit. (<https://www.youtube.com/watch?v=X7ZDeVsBDbY>).

Use case 6 - Industrie 4.0

Le démonstrateur Smart Factory^{KL}

Pionnier des démonstrateurs Industrie 4.0, la Smart Factory^{KL} se trouve à Kaiserslautern (Land de Rhénanie-Palatinat) dans les locaux du centre allemand de recherche en intelligence artificielle (DFKI) .

C'est ici que le Professeur Detlef Zühlke a le premier cherché à concrétiser l'idée selon laquelle les technologies émergentes du *smart home* pourraient aussi être décisives pour la *smart factory*. En 2011/2012 à Kaiserslautern a ainsi été développée une installation SCP.

Mais elle a vite montré à quel point la complexité de l'Industrie 4.0 peut être un obstacle majeur à sa compréhension et à l'adhésion des entreprises. La rupture était

telle que l'industrie l'a boudé : « Il est toujours dangereux d'avoir une solution sans problème ! »

Ce que montrait le démonstrateur était un rêve de scientifiques trop innovant pour permettre de sensibiliser efficacement des industriels à des enjeux futurs. Ses promoteurs ont vite conclu qu'ils devaient faire machine arrière et construire une étape intermédiaire pour susciter l'intérêt et l'adhésion des chefs d'entreprise. Conscient qu'il était allé trop vite et trop tôt, le Prof. Zühlke s'est attaché à travailler l'appropriation de cette nouvelle usine par des entreprises emblématiques du « *Mittelstand premium* » telles que Festo, Pilz ou Phoenix Contact. Chaque entreprise a alors contribué au projet dans son domaine de compétences bien délimité.

A la foire de Hanovre de 2014, l'installation de la Smart Factory^{KL} réalisée avec les industriels a été présentée pour la première fois. Alors que cette installation reste moins développée techniquement que celle qui existait à Kaiserslautern en 2012, elle est plus en phase avec les besoins des entreprises partenaires. Il s'agit d'une installation modulaire fonctionnant en mode « *plug and work*²⁸ ». Un produit est fabriqué en passant successivement sur des machines de fabricants différents, toutes capables de décrypter en temps réel les informations transmises par le produit concernant les spécificités de sa fabrication.

A Lemgo, à l'ouest de la Westphalie, les démonstrateurs du cluster It's OWL présentent des solutions dans le domaine de la logistique interne et de la production. Lors d'une visite à Lemgo, nous avons pu dénombrer au moins trois installations. A côté de démonstrateurs dédiés à des problématiques ciblées, comme la logistique

²⁸ Cette expression désigne la capacité de raccorder rapidement des modules de production à une ligne de fabrication à l'aide d'une interface standard avec une reconnaissance automatique, à l'image du raccordement d'une clé USB sur le port USB d'un ordinateur.

interne par exemple, le site de Lemgo dispose de démonstrateurs plus ambitieux avec des points forts sur la modularité, l'efficacité énergétique et l'ergonomie. L'un de ces démonstrateurs est conçu comme une installation *plug and work* (<https://www.youtube.com/watch?v=goUYutcO4bc>).

Use case 7 - Industrie 4.0

Le démonstrateur It's OWL

Le plus grand cluster lié à Industrie 4.0 se trouve en Rhénanie-du-Nord-Westphalie. Il s'agit du cluster d'excellence « it's OWL » (intelligente technische System Ostwestfalen-Lippe). Ce cluster est exemplaire de par ses projets de transfert de technologie avec des entreprises du *Mittelstand*.

It's OWL a bénéficié de conditions initiales très favorables, avec un financement du Land qui s'élevait à 1 M€ et qui a permis de préparer et de remporter le concours fédéral pour devenir « cluster d'excellence » en 2012.

Au cœur de it's OWL se trouvent les projets de recherche collaborative pré-concurrentielle qui sont financés pour une durée de cinq ans. Dans ce cadre, les concurrents se réunissent pour développer des technologies innovantes, sachant que pour ces entreprises qui se trouvent souvent à moins de 50 km de distance les unes des autres, le vrai concurrent est la Chine. A titre d'exemple : dans le projet « Une performance accrue dans l'électronique (*Mehr Leistung in der Elektronik*) », deux producteurs de semi-conducteurs, Infineon et Hesse Mechatronics, collaborent avec l'université de Paderborn dans le développement des connecteurs en cuivre. Plusieurs démonstrateurs sont développés dans le cadre de projets de recherche avec l'appui du Fraunhofer IOSB qui y a investi 500 k€.

Sur ces démonstrateurs sont testés des composants comme le processeur ultraperformant Tiger à 7 millions de portes, résultat d'une collaboration entre

Siemens et Phoenix Contact. Elle se présente comme une solution économique pour introduire des solutions Industrie 4.0 ou bien encore un serveur OPC-UA²⁹ miniature. Ces démonstrateurs sont d'autant plus importants que les dirigeants du cluster it's OWL se sont fixés des enjeux quantitatifs ambitieux. Les projets d'Industrie 4.0 ne doivent pas seulement bénéficier aux entreprises, ils doivent aussi générer des externalités positives pour le territoire.

3.5. L'effet d'entraînement du *Mittelstand premium*

Un dernier levier essentiel concerne l'effet d'entraînement des entreprises équivalentes en termes de taille à nos ETI vis-à-vis de plus petites entreprises du *Mittelstand* dans leur transformation numérique.

De nombreuses entreprises du *Mittelstand premium* participent depuis le début à l'aventure Industrie 4.0 et ont été membres des différentes initiatives fédérant ce champ dont la *Forschungsunion*, Union entre la recherche et l'industrie, qui a défriché les thèmes de l'Industrie 4.0, le comité stratégique de la plateforme Industrie 4.0 pilotée par 3 fédérations professionnelles allemandes, les initiatives lancées au niveau des Länder...

Ces entreprises du *Mittelstand premium* fabriquent des composants, des équipements, proposent des services d'intégration : Festo, Trumpf, Wittenstein, Beckhoff, Phoenix Contact, Pilz, Harting...

²⁹ L'architecture unifiée OPC est un protocole d'interopérabilité pour la communication entre machines.

Entreprises de poids dans la colonne vertébrale économique que représente l'industrie mécanique allemande, ces entreprises jouent le rôle de fournisseurs de solutions partielles et de composants qui permettent à une myriade d'entreprises plus petites de développer des offres originales et de se positionner sur des niches Industrie 4.0.

Use case 8 - Industrie 4.0

La stratégie du meccano digital

Une entreprise est leader sur le marché des systèmes d'entraînement mécaniques, électroniques et mécatroniques pour des systèmes de convoyage (glissement, chaîne, palettes, modulaire...).

Pour son dirigeant, l'équation Industrie 4.0 n'a pas été facile à résoudre. L'objectif consiste à construire des systèmes de transport décentralisés, qui s'affranchissent de la commande centrale et des Automates Programmables Industriels (API).

Mais l'entreprise ne maîtrise pas tous les éléments technologiques et notamment la connectique. Elle est confrontée à des clients qui sont des constructeurs d'installation, très attentifs au coût, et des exploitants pour lesquels l'argument principal est la maintenance. Ses clients ne s'enthousiasment pas pour de belles solutions technologiques. Ils raisonnent sur la base d'une stricte analyse coût-bénéfice. Enfin, l'entreprise réalise en interne une grande partie de la production et a l'habitude de maîtriser tout le cycle de vie de son produit, de la conception jusqu'à la production en série.

L'entreprise a construit son positionnement Industrie 4.0 grâce à une collaboration avec une entreprise du *Mittelstand* beaucoup plus grande et spécialisée dans la connectique industrielle (4 800 collaborateurs et 673 M€ de chiffre d'affaires en 2014).

En utilisant sa connexion de bus d'énergie, l'entreprise peut proposer des systèmes de convoyage composés de différents modules à propulsion autonome pilotés de manière totalement décentralisée. Ils peuvent être utilisés dans la logistique interne d'entreprises, dans des entrepôts, des centres postaux ou pour de la logistique

aéroportuaire. Chez un client, 53 km de câbles en cuivre ont ainsi pu être économisés.

Outre le fonctionnement décentralisé de l'installation, l'utilisation de composants standard et le montage simplifié de l'installation (petite armoire électrique, interface entre le moteur et le système de bus d'énergie) sont source d'économies pour le client. La modularité de l'ensemble permet d'adapter l'installation aux évolutions de la production.

Les entreprises du *Mittelstand* sont considérées à la fois comme des producteurs, des utilisateurs mais aussi des "essaimeurs" d'industrie 4.0. Comme le remarque le dirigeant d'une grande entreprise de la mécanique : « *nos clients demandent ce que nous faisons avec Industrie 4.0 ; nous voulons leur montrer la voie pour qu'ils se saisissent du sujet.* »

« *Je ne livre pas de l'Industrie 4.0, mais des idées qui montrent le chemin vers l'Industrie 4.0.* »

Le CEO d'une PME spécialisée dans l'automatisation
et la construction d'environnements pédagogiques (région de Stuttgart)

En revanche pour les prestataires et fournisseurs de solutions IT, le bilan est plus contrasté. Là réside probablement le talon d'Achille de l'Industrie 4.0. Dans les technologies de l'information, l'Allemagne dispose de trop peu d'acteurs et trop petits. On ne retrouve pas comme dans l'industrie mécanique et électronique ces entreprises de taille moyenne qui peuvent avoir un effet d'entraînement significatif, même si de nombreuses PME spécialisées dans les TIC sont mobilisées dans les projets Industrie 4.0 du ministère fédéral de la Formation et de la Recherche (BMBF).

Use case 9 - Industrie 4.0

La fabrique d'apprentissage hybride

La PME Adiro, est un fournisseur de Festo, une entreprise spécialiste des systèmes d'entraînement pneumatique et électrique, et tout particulièrement de sa filiale Festo Didactic spécialisée dans le développement et la fabrication de systèmes dédiés à l'apprentissage. Adiro est illustrative de la relation entre petites et grandes entreprises au sein du *Mittelstand*. Adiro a une grande capacité d'innovation, notamment dans le domaine de la conception et de la construction de « fabriques hybrides pour l'apprentissage » (*hybride Lernfabrik*).

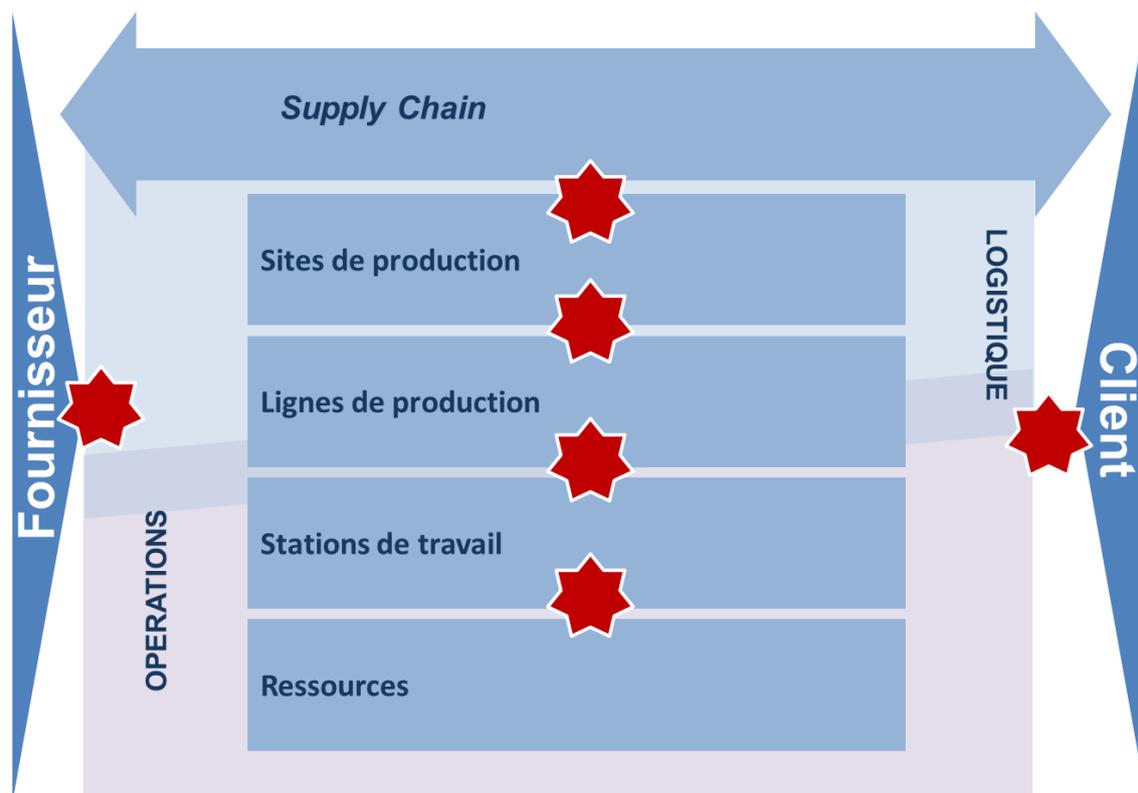
Ces modèles réduits d'usines sont composés de plusieurs stations réalisant des opérations industrielles comme le filtrage, la réalisation de mélanges, la séparation de composants, la préparation, le remplissage, la logistique et le stockage. Ils s'adressent à des départements de formation de grandes entreprises, à des centres de formation de Chambres de Commerce et d'Industrie (IHK), à des écoles professionnelles, des IUT et des universités.

Si les industries de process sont aujourd'hui les principaux clients, Adiro développe son offre sur la partie industries de fabrication et construit notamment une « station de manipulation » pour le démonstrateur *Smart Factory* de Kaiserlautern.

Adiro conçoit sa mission comme celle d'un détecteur de tendances (*trendsetter*) dans le domaine des avancées technologiques. Elle traduit ensuite ces changements technologiques en outil de formation professionnelle commercialisés sous la marque Festo Didactic. Elle joue ainsi un rôle important dans l'accompagnement du système de formation professionnelle dans le processus de transformation Industrie 4.0 et la création de nouveaux contextes d'apprentissage.

Le défi de la diffusion de l'Industrie 4.0 dans le *Mittelstand* est donc immense. Pour les *Mittelständler* qui ont commencé à franchir le pas, cela a impliqué une remise en question des routines et une capacité à sortir du *business* quotidien pour se projeter dans un monde porteur d'opportunités mais où les questions sont aujourd'hui plus nombreuses que les réponses. Industrie 4.0 suppose de concevoir l'entreprise comme un monde ouvert où les flux d'échanges avec les clients et le monde de la recherche, les interactions avec les autres entreprises ou autres branches gagnent en intensité. Les barrières tombent, les critères de compétitivité mutent et les risques changent de nature.

Figure 14 – Industrie 4.0 : Les interfaces à prendre en compte



Source : ©Conception et réalisation KOHLER Consulting & Coaching

Dans chaque entreprise, c'est un processus de transformation qui implique une conduite du changement à 3 niveaux : le niveau 1 : celui de l'entreprise et son

environnement élargi (fournisseurs, entreprises partenaires,...) ; le niveau 2 : celui des sites et des lignes de production avec notamment les interfaces entre machines ; enfin le niveau 3 : celui des postes de travail avec l'interface homme-machine.

Toutes les dimensions de l'entreprise sont concernées, comme le montre la figure 15, avec un premier défi : identifier les lieux où la mise en place de l'industrie 4.0 dans la production peut être génératrice de gains et de nouveaux avantages compétitifs. Et au-delà de l'environnement de la production, il est nécessaire de questionner les fondements du *business model* pour tenir compte de l'irruption de nouveaux compétiteurs.

Figure 15 – Industrie 4.0 : Les enjeux de transformation pour les entreprises du *Mittelstand*



Source : ©Conception et réalisation KOHLER Consulting & Coaching

Conclusion

En prenant du recul par rapport aux éléments très spécifiques du contexte allemand, se pose évidemment la question des leçons à en tirer, et tout particulièrement pour le programme Industrie du futur en France.

Il ressort de ce travail **3 constats** qui expliquent la vitalité de l'industrie 4.0 en Allemagne.

1. La création d'un nouvel imaginaire collectif industriel

Les Allemands sont des champions de la création de mythe sociaux. L'économie sociale de marché, le *Mittelstand*, l'Industrie 4.0 aujourd'hui, sont des concepts qui peuvent sembler fragiles du point de vue analytique : autant de définitions que d'interlocuteurs, une grande malléabilité du contenu conceptuel. Et pourtant ces concepts se gravent dans le marbre et produisent des effets très concrets de cristallisation des intérêts et de mobilisation des acteurs pour produire ce qui est jugé comme une avancée pour le bien commun.

L'Industrie 4.0 est bien plus qu'un concept marketing, c'est un vecteur de transformation de la société industrielle allemande.

2. La recherche centrale d'effets de coopération : expérimenter ensemble

A trop se focaliser sur la dimension technologique, on en oublie un élément essentiel d'Industrie 4.0 : la volonté des chefs d'entreprise d'expérimenter ensemble avec l'appui des instituts de recherche. Ce projet s'affirme comme un horizon commun destiné à mettre en mouvement de manière collective des acteurs des TIC, de la mécanique et de l'électrotechnique dans un contexte d'incertitude radicale.

Démonstrateurs et usines-pilotes donnent à voir en grandeur réelle la numérisation de l'industrie et la font passer du stade virtuel au stade opérationnel.

3. L'accent mis sur le rôle d'entraînement des grosses PME et des ETI

Un dernier enseignement de l'Industrie 4.0 en Allemagne est le poids donné à la mobilisation d'entreprises industrielles du *Mittelstand* premium, l'équivalent de nos belles ETI qui ont un rôle d'entraînement majeur vis à vis du tissu industriel régional.

Cette manière de conduire un processus de changement entre pairs permet de susciter de nouvelles solidarités et de construire de nouveaux atouts compétitifs. Utiliser le potentiel de croissance du numérique fait de la coopération une nécessité.

Bibliographie sélective

Acatech (2015), *Smart Service Welt. Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Internet-basierte Dienste für die Wirtschaft*, mars 2015, 76 p.

Arbeitskreis Industrie 4.0 (2012), Deutschlands Zukunft als Produktionsstandort sichern, Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0, Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0, Vorabversion, Berlin 2. Oktober 2012, 72 p.

Bauernhansl Thomas, ten Hompel Michael, Vogel-Heuser Birgit (2014), *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik: Anwendung - Technologien – Migration*, Wiesbaden, Springer, 648 p.

Bourdoncle François (2015), « La révolution Big Data », dans Veltz Pierre, Weil Thierry (dir.), *L'Industrie, notre avenir*, Paris, Eyrolles, p. 64-70.

Bpifrance - Le Lab (2015), *Le numérique déroutant*, 2015, 99 p.

Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (2014), *Die Lage der IT-Sicherheit in Deutschland 2014*, 44 p.

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2015), *Industrie 4.0. Volks- und betriebswirtschaftliche Faktoren für den Standort Deutschland*, avril 2015, 56 p.

Deloitte (2013), *Digitalisierung im Mittelstand*, 34 p.

DZ Bank, GfK Enigma (2014), Umfrage in mittelständischen Unternehmen Digitalisierung – Bedeutung für den Mittelstand, juin/août 2014, 40 p.

Forschungsunion, Acatech (2013) : *Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0*, 116 p.

Gimelec (2014), *Industrie 4.0 : les leviers de la transformation*, 84 p.

Greffier A., Mercier F. (2015) : « Industrie 4.0 : slogan marketing ou vraie révolution industrielle ? », intervention au séminaire ressources technologiques et innovation de l'Ecole de Paris du management, séance du 12 février, compte rendu.

Kagermann H. (2013) : Impuls – Zukunftsbild Industrie 4.0, BITKOM Kick-Off „Industrie 4.0“ Berlin, 9. Januar 2013

Kohler Dorothee, Weisz Jean-Daniel (2012), Pour un nouveau regard sur le *Mittelstand*, Rapport au FSI, Paris, La documentation française, 136 p.

Plattform Industrie 4.0 (2015), *Umsetzungsstrategie Industrie 4.0 : Ergebnisbericht der Plattform Industrie 4.0*, Bitkom/VDMA/ZVEI, avril 2015, 96 p.

Preuß Suzanne (2007) « Fertigungsprozesse wandeln sich : warum ein Paketdienst gerne auch Autositze baut und sich trotzdem treu bleibt », Frankfurter Allgemeine Zeitung, 19 octobre 2007.

Schröder C. (2015), Auf dem Weg zur vernetzten Wertschöpfung: Existiert eine Digitalisierungslücke im deutschen Mittelstand?, Ifm Bonn Denkpapier, 18.03.2015.

Spath D. (ed.) (2011), Produktionsarbeit der Zukunft, Fraunhofer IAO, Fraunhofer Verlag, 155 p.

Stegmüller Dieter, Zürn Michael (2014), « Wandlungsfähige Produktionssysteme für den Automobilbau der Zukunft » dans Bauernhansl, Thomas; ten Hompel, Michael, Vogel-Heuser, Birgit (dir.) : *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik: Anwendung - Technologien – Migration*, Wiesbaden, Springer, p. 103 -119.

Remerciements

Nous adressons nos remerciements à Bpifrance, Nicolas Dufourcq et Jean-Yves Gilet qui nous ont accordé toute leur confiance pour réaliser cette étude inédite sur Industrie 4.0 et à Bertrand Finet pour qui l'accélération de la croissance des ETI est un sujet clé. Nos remerciements vont aussi à Pascal Lagarde, Philippe Mutricy et à Elise Tissier pour leurs remarques et leur enthousiasme sur ce thème stratégique.

Pour la qualité de sa contribution, son regard affûté et sa curiosité sans relâche, nous remercions Katharina Ehrhart, analyste chez KOHLER Consulting & Coaching.

Enfin, nous tenons à remercier nos nombreux interlocuteurs allemands qui, dans des agendas très denses, nous ont consacré un temps précieux. Ces entretiens qui ont duré entre 2 et 4 heures ont permis de nourrir une réflexion approfondie sur le sujet.

- Dipl.-Ing. Judith Binzer, animatrice du Forum Industrie 4.0, VDMA, Frankfurt.
- Dieter Faude, Geschäftsführer, Faude, Gärtringen.
- Dr. Andreas Goerdeler, Ministerialdirigent, Unterabteilungsleiter „Digitale Agenda, Digitale Medien“, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Berlin.
- Dr.-Ing. Michal Haag, Leiter Research & Development, Mitglied des Management Teams, KUKA, Augsburg.
- Sascha Heymann, B.Sc., Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Fraunhofer IOSB-INA, Lemgo.
- Joachim Hörnle, Geschäftsführer, Blue Elephant Systems, Stuttgart.
- Dipl.-Wirt.-Ing. Ralph Jeschabek, Produktmarketing, ALMIG, Köngen.
- Dipl.-Ing. Bernd Kärcher, Abteilungsleiter mechatronische Komponenten, Industrie 4.0, Festo, Esslingen.
- Dr. Christian Kellermann-Langhagen, Referent Forschung und Entwicklung, ZVEI, Frankfurt.
- Prof. Dr. Tobias Kollmann, Beauftragter für die Digitale Wirtschaft NRW, Ministerium für Wirtschaft, Energie, Industrie, Mittelstand und Handwerk des Landes Nordrhein-Westfalen, Düsseldorf.
- Günther Korder, Geschäftsführer, it's OWL, Paderborn.

- Dr. Simone Koslowski, Grundsatzfragen der Branchen-und Industriepolitik, Ministerium für Wirtschaft, Energie, Industrie, Mittelstand und Handwerk des Landes Nordrhein-Westfalen, Düsseldorf.
- Klaus Kronberger, Geschäftsführer, Adiro, Esslingen.
- Dr. Constanze Kurz, Ressortleiterin „Zukunft der Arbeit“, IG Metall, Frankfurt.
- Benedikt Lücke, B.Sc., Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Fraunhofer IOSB-INA, Lemgo.
- Dr. Jan Stefan Michels, Leiter Standard- und Technologieentwicklung, Weidmüller, Detmold.
- Dipl.-Ing. Wolfgang Neifer, Business Development, WIBU, Karlsruhe.
- Stefan Pannenberg, Solution Architect, Blue Elephant Systems, Stuttgart.
- Michael Püschner, Referent Henning Kagermann, Acatech, Berlin.
- Dr. Gisela Philipsenburg, Referatsleiterin Referat 111, Grundsatzfragen der Innovationspolitik, Bundesministerium für Bildung und Forschung, Berlin.
- Dipl.-Wirt.-Ing. Christian Rau, Product Marketing, ALMIG, Köngen.
- Ingo Ruhmann, Forschungsförderung, Bundesministerium für Forschung und Bildung, Berlin.
- Dr.-Ing. Olaf Sauer, Stellvertreter des Institutsleiters, Geschäftsfeld Automatisierung, Fraunhofer IOSB, Karlsruhe.
- Dr. Christian Schröder, Forscher, Institut für Mittelstandsforschung, Bonn.
- Veronika Stumpf, Wissenschaftliche Referentin Technologien, Acatech, Berlin.
- Dr. Alexander Tettenborn, Ministerialrat, Leiter des Referats „Entwicklung digitaler Technologien“, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Berlin.
- Dr.-Ing. Volker Tippmann, Deutsch-französische Projekte, Fraunhofer Zentrale, Paris.
- Dr.-Ing. Thomas Usländer, Abteilungsleiter Informationsmanagement und Leittechnik, Fraunhofer IOSB, Karlsruhe.
- Karl-Ernst Vathauer, Geschäftsführer, MSF Vathauer, Detmold.
- Steffen Zinke, Sachbearbeiter ZIM, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Berlin.
- Prof. Dr.-Ing. Dr.h.c. Detlef Zühlke, Vorstandsvorsitzender SmartFactory^{KL}, Kaiserslautern.

Table des illustrations

Figure 1 : La quatrième révolution industrielle.....	10
Figure 2 : Au cœur d'Industrie 4.0 : le système cyber-physique.....	12
Figure 3 : L'Industrie 4.0 selon l'entreprise Trumpf.....	13
Figure 4 : La numérisation de la création de valeur dans le Cloud	15
Figure 5 – Quelques métriques concernant le marché de l'Industrie 4.0.....	19
Figure 6 : Le tryptique Homme – Technique - Organisation	22
Figure 7 : La représentation classique de la chaîne de valeur	25
Figure 8 : La pyramide de l'automatisation	26
Figure 9 : Fragmentation fonctionnelle et spatiale des activités de la chaîne de valeur	30
Figure 10 : Industrie 4.0 – La matrice KCC des typologies d'acteurs.....	39
Figure 11 : Evaluation par les chefs d'entreprises du <i>Mittelstand</i> du rôle futur de la numérisation selon les branches	41
Figure 12 : Les freins perçus par les chefs d'entreprise dans le déploiement d'Industrie 4.0	43
Figure 13 : SWOT - Analyse du déploiement Industrie 4.0 dans les entreprises	46
Figure 14 – Industrie 4.0 : Les interfaces à prendre en compte.....	59
Figure 15 – Industrie 4.0 : Les enjeux de transformation pour les entreprises du <i>Mittelstand</i>	60